

Technische Universität München

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

**Konzeption und Langzeittest der Mensch-Maschine-
Schnittstelle für das hochautomatisierte Fahren im
Lkw**

Natalie Tara Richardson, M. Sc.

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

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzende: Prof. Dr. rer. nat. Sonja Berensmeier
Prüfende/-r der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp
2. Prof. Dr. Mark Vollrath

Die Dissertation wurde am 14.10.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 23.12.2019 angenommen.

„As scientists who are interested in studying people's mental models, we must develop appropriate experimental methods and discard our hopes of finding neat, elegant mental models, but instead learn to understand the messy, sloppy, incomplete, and indistinct structures that people actually have“.

Donald A. Norman [1, S. 14]

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München in Kooperation mit der MAN Truck & Bus AG von 2015 bis 2019.

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.- Ing. Markus Lienkamp, der mir die Möglichkeit zur Promotion gab. Ich bedanke mich für das von ihm entgegengebrachte Vertrauen und die Entscheidungsfreiheit bei der Gestaltung des Projektes. Auch meinem Zweitprüfer Prof. Dr.- phil. Mark Vollrath danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und die wertvollen Ratschläge. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Prof. Dr. Sonja Berensmeier.

Meiner Mentorin bei der MAN Truck & Bus AG, Dr. Britta Michel gebührt ein besonderer Dank, insbesondere für die fortwährende Unterstützung, bereichernde Diskussionen und das entgegengebrachte Vertrauen. Meinen MAN Kollegen Dr. Anna Sprung, Daniel Blank, Dr. Tobias Glohr und Jennifer Latka - Vielen Dank für eure Unterstützung. Ich kann mich glücklich schätzen, in euch nicht nur Kollegen, sondern Freunde für das Leben gefunden zu haben.

Meinen ehemaligen FTM Kollegen aus dem Fahrsimulator-Team, Dr. Sonja Hofauer, Jana Fank und Christian Knies danke ich besonders. Ihr habt die Arbeit am FTM zu dem gemacht, was es war – eine spannende, ereignisreiche und unvergessliche Zeit. Vielen Dank für euer Engagement, eure Unterstützung und die gemeinsame Zeit.

Den Festangestellten des FTM, insbesondere Günter Anthuber, Florian Biechl, Sylvia Brinkmann, Nina Julius und Bettina von Stokar danke ich für Ihren unermüdlichen Einsatz.

Ein großer Dank geht an meine Studentinnen, Studenten und Hilfskräfte, die mich bei der Durchführung des Projektes in allen Phasen tatkräftig unterstützten und scheinbar endlose Stunden am Lkw-Simulator und in Workshops mit mir verbrachten. Besonderer Dank geht an Christoph Lehmer, Lukas Flohr und Tobias Kerbl, die mit ihrem Einsatz und außerordentlichen Engagement einen wesentlichen Beitrag leisteten.

Dr. David Rügamer danke ich für die fachliche und mentale Unterstützung während der gesamten vier Jahre und darüber hinaus. Vielen Dank für Alles – Kamsahamnida.

Meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und meinem Bruder, gebührt der größte Dank. Ihr habt mich in all meinen Vorhaben bestärkt und immer unterstützt. Ich danke euch für euren fortwährenden Rückhalt.

München, im Oktober 2019

Natalie Tara Richardson

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
Formelzeichen	VII
1 Motivation	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	2
2 Stand der Wissenschaft und Technik	5
2.1 Grundlagen des Mensch Maschine Systems	5
2.1.1 Modelle der Fahraufgabe	5
2.1.2 Mentale Modelle	7
2.1.3 Lernen	9
2.1.4 Verhaltensadaptation	10
2.1.5 Situationsbewusstsein	13
2.2 Automation und Automationseffekte	15
2.2.1 Definition	15
2.2.2 Klassifikation der Automationsstufen	16
2.2.3 Automationseffekte	17
2.3 Modelle zur Vertrauensentwicklung	21
2.3.1 Das dynamisches Vertrauensmodell nach Lee und See	21
2.3.2 Das dreistufige Automations- Vertrauensmodell nach Hoff & Bashir.....	22
2.4 Automations-Akzeptanz-Modell	23
2.5 Einflussfaktoren auf den Lernprozess im Kontext des hochautomatisierten Fahrens	24
2.6 Langzeitstudien	26
2.6.1 Relevante Studien zur Untersuchung von Langzeiteffekten	26
2.6.2 Kritik und Implikationen	29
2.7 Konzeptstudien für das hochautomatisierte Fahren	30
2.7.1 HAVEit (2011).....	30
2.7.2 Volvo Intellisafe (2015).....	30
2.7.3 Bosch Automated Driving (2015).....	31
2.7.4 Audi Jack (2015).....	32

2.7.5	BMW iVision (2016)	32
2.7.6	Mercedes Benz Future Truck 2025 (2014)	33
2.7.7	Scania – Active Frame (2014).....	33
2.8	Konzeptorientierte Literaturanalyse	33
2.8.1	Haptisches Feedback	34
2.8.2	Akustische Reize	34
2.8.3	Head-Up- Display und kontaktanalogen Head-Up-Display	34
2.8.4	Periphere Lichtreize	35
2.8.5	Abgestuftes Rückholkonzept.....	35
2.8.6	Verbale Instruktionen zur Handlungsanweisung	35
2.8.7	Multimodale Warnungen	36
2.8.8	Darstellung von Informationen auf einem zusätzlichen Display	36
2.8.9	Darstellung kontinuierlicher Systeminformationen.....	36
3	Aufstellung der Forschungsfragen	39
3.1	Fazit zum Stand der Wissenschaft	39
3.2	Themeneingrenzung und Ableitung der Fragestellung	41
4	Vorgehen.....	43
4.1	Methodik.....	43
4.2	Normen und Gestaltungsrichtlinien	44
5	Explorative Anforderungsanalyse.....	47
5.1	Fokusgruppe zur Erfassung des Informationsbedarfs.....	48
5.1.1	Vorgehen.....	48
5.1.2	Ergebnisse und Diskussion	48
5.2	Fahrsimulatorstudie zur Erfassung des Informationsbedarfs.....	49
5.2.1	Methode	49
5.2.2	Ergebnisse und Diskussion	50
5.3	Zusammenfassung der Anforderungen	50
6	HMI Konzeptentwicklung und Evaluation	53
6.1	Formativer Expertenworkshop	54
6.2	Methode der analytischen Expertenstudien.....	55
6.2.1	Methodik der heuristischen Expertenevaluation mittels Papierprototyp.....	55
6.2.2	Methodik der Validierungsstudie mittels Videoprototyp	56
6.3	Ergebnisse der analytischen Expertenstudien	56
6.3.1	Heuristische Expertenevaluation mittels Papierprototyp.....	56

6.3.2	Validierungsstudie mittels Videoprototyp	57
6.4	Optimierung des Anzeigekonzepts	59
6.5	Formative Fahrstudie	59
6.5.1	Fragestellung.....	59
6.5.2	Methode und Stichprobe	60
6.5.3	Ergebnisse und Diskussion	61
6.6	Finale Anzeigekonzept.....	65
7	Summative Fahrstudie zur Erfassung von Langzeiteffekten.....	69
7.1	Zielsetzung und Fragestellung	69
7.2	Experimentelles Design	71
7.2.1	Versuchsaufbau.....	72
7.2.2	Versuchsdesign	72
7.2.3	Testzenarien und Versuchsstrecken.....	72
7.2.4	Material	76
7.2.5	Versuchsablauf.....	78
7.2.6	Beschreibung des Probandenkollektivs	79
7.3	Ergebnisse.....	80
7.3.1	Entwicklung des mentalen Modells.....	81
7.3.2	Globale Vertrauensentwicklung.....	84
7.3.3	Situationsspezifische Vertrauensentwicklung.....	87
7.3.4	Akzeptanzentwicklung	89
7.3.5	Entwicklung der Nutzungsintention.....	90
7.3.6	Entwicklung der blickbasierten Interaktion	92
7.3.7	Einfluss der Persönlichkeit und der Technikbereitschaft.....	93
7.4	Diskussion der summativen Evaluationsergebnisse.....	93
7.4.1	Hypothesenüberprüfung und Interpretation der Ergebnisse	93
7.4.2	Grenzen der Studie.....	99
7.5	Zusammenfassung der Erkenntnisse.....	102
8	Diskussion und Ausblick.....	103
8.1	Diskussion der Entwicklungsmethodik.....	103
8.2	Einsatz von Schulungskonzepten	104
8.3	Entwicklung des Informationsbedarfs mit zunehmender Systemerfahrung	105
8.4	Übertragbarkeit auf höhere Automatisierungsgrade	105
9	Zusammenfassung	107

Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	v
Literaturverzeichnis	vii
Anhang	xxiii

Um die Arbeit lesefreundlich zu gestalten, wurde auf eine durchgehend explizite Nennung beider Geschlechter verzichtet.

Abkürzungsverzeichnis

A	Akzeptanz
AAM	Automations Akzeptanz Modell
AOI	Area of Interest
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur
BAG	Bundesagentur für Güterverkehr
BFI-10	Big Five Inventory – 10
BZP	Befragungszeitpunkt
ED	Entertainment Display
F	Forschungsfrage
FAS	Fahrerassistenzsysteme
FFT	Fahrfremde Tätigkeit
GAMM	Generalisiertes additives gemischtes Modell
HAF	Hochautomatisiertes Fahren
HMI	Human Machine Interface
HUD	Head-Up-Display
KÜ	Kurzfristige Übernahme
LED	Light Emitting Diode
Lkw	Lastkraftwagen
LM	Linear Model
LMM	Linear Mixed Model
LÜ	Langfristige Übernahme
MAN	Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg
MD	Median
MM	Mentales Modell
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
MT	Misstrauen
MW	Mittelwert
NDS	Naturalistic Driving Study
NF	Nutzerfreundlichkeit

NI	Nutzungsintention
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OOTLUF	Out of the Loop Unfamiliarity
PEP	Produktentwicklungsprozess
Pkw	Personenkraftwagen
PLoL	Power Law of Learning
PLoP	Power Law of Practice
RCoP	Response Code of Practice
r_{sp}	Spearman's Rangkorrelation
RG	Randomisierungsgruppe
SA	Situation Awareness
SAE	Society of Automotive Engineers
SD	Standardabweichung
SH	Situation handhabbar
SHRP	Strategic Highway Research Program
SRK	Skills Rules Knowledge Modell
SV	Situationspezifisches Vertrauen
TAM	Technologie Akzeptanz Modell
TFT	Thin-film transistor-Display
TGS	Trucknology Generation schwer (MAN Bezeichnung)
TTC	Time to Collision
TUM	Technische Universität München
UEQ	User Experience Questionnaire
UX	User Experience
DALI	Driver Load Activity Index
VT	Vertrauen
WN	Wahrgenommene Nützlichkeit

Formelzeichen

Formelzeichen	Beschreibung
y_{it}	mittlere Zustimmung des Probanden
η_{it}	linearer Prädiktor
ε_{it}	Fehlerterm
t	t -te Fahrt
β_0	Intercept
z_{it}	Anzahl Primings des i -ten Probanden
$f(t, z_{it})$	nicht-linearer Priming-Fahrten-Effekt
$b_{0,i}$	probandenspezifischer Intercept des Probanden i
$b_{1,i}$	probandenspezifischer Fahrteneffekt
$b_{2,it}$	probandenspezifischer Primingeffekt
$x_i\beta_1$	Einfluss der Technikbereitschaft x_i mit Effekt β_1
μ_{it}	Erwartungswert
γ	Fahrteneffekt
$f(s_{it})$	nicht-lineare Effekt des Szenarios
u_{it}	Art der Übernahme
δ_1, δ_2	Effekt der Art der Übernahme
β_1, β_2	Fahrten verändernder Effekt der Art der Übernahme
$p_i\nu$	Effekt ν für die Persönlichkeit p_i des Probanden i

1 Motivation

Eine zentrale Herausforderung der Transportbranche im Straßengüterverkehr stellt der sich abzeichnende und bereits spürbare Fahrermangel dar [2, S. 7]. Die zukünftige Entwicklung erwartet eine weitere Verschärfung des Fahrermangels [2, S. 35]. So gehen bis 2027 etwa 40 % der aktuell beschäftigten Lkw-Fahrer in Rente [2, S. 40]. Fehlender Nachwuchs verschärft die Situation zusätzlich. Gründe für den Nachwuchsmangel liegen unter anderem im vorherrschenden schlechten Image des Berufsbildes [3], ausgelöst durch spezielle Arbeitsbedingungen, fehlende Entwicklungsperspektiven, mangelnde Versorgungsbedingungen und zeitliche Belastungen (bspw. Just-in-Time Belieferung). Diese Einflüsse erfordern eine hohe Stressresistenz seitens des Fahrers. Neben psychischen Belastungen (dichter Verkehr, Lärm, Zeitdruck, Monotonie, lange Wartezeiten) ist der Fernfahrer auch physischen Belastungen ausgesetzt [4, S. 12]. Hierzu zählen das Heben und Tragen schwerer Lasten, Bewegungsmangel und langes Sitzen [5, S. 52].

Dem Fahrermangel steht ein steigendes Transportaufkommen entgegen [6, S. 14]. So rechnet die Europäische Kommission bis 2030 mit einem sektoralen Wachstum von 44 % im Straßengüterverkehr (Abbildung 1.1). Das Bundesamt für Güterverkehr (BAG) [7, S. 31] kommt zu dem Schluss, dass: „Die Unternehmen [...] aufgrund der zunehmend geringen Verfügbarkeit qualifizierter Fahrer gefordert (sind), flexible Lösungen zu entwickeln, um den Bedürfnissen der Fahrer zu entsprechen“. Es gilt, die Arbeitsbedingungen zu verbessern und die Attraktivität des Berufsbildes zu steigern, um dem Fahrermangel entgegenzuwirken.

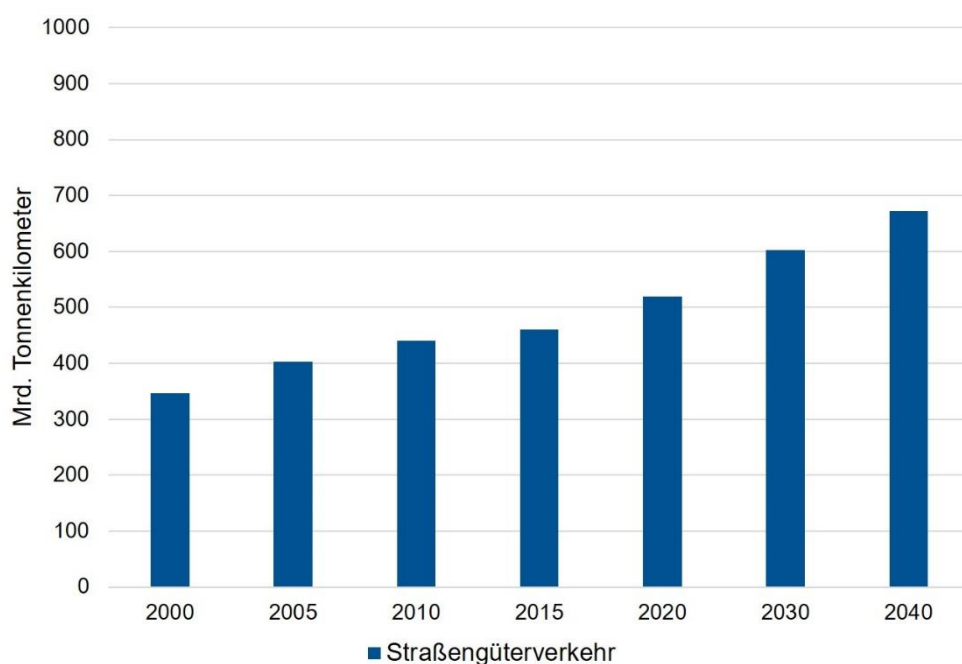


Abbildung 1.1: Prognose der Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr bis 2040 [8, S. 244-245, 9, S. 14]

Die Durchführung langer, monotoner Fahrten, wie im Lkw Fernverkehr üblich, führt zu Müdigkeit sowie Unaufmerksamkeit und erhöht das Unfallpotenzial. Die Unfallstatistik des Jahres 2017 bestätigt diesen Trend und zeigt, dass 88 % aller Verkehrsunfälle auf menschliches Versagen zurückzuführen sind [10, S. 11]. 5 % des Gesamtanteils der Unfälle geht auf Unfälle in Verbindung mit Lkw zurück. Zwar sind Unfälle mit Lkw seltener als mit dem Pkw, resultieren jedoch in schwerwiegenderen Unfallfolgen [10, S. 32].

Die Einführung automatisierter Systeme im Lkw könnte das Berufsbild, die Sicherheit und die Rentabilität des Gesamtsystems positiv beeinflussen. Mögliche Vorteile, die mit einer Automatisierung der Fahrzeugführung einhergehen, liegen in einer erhöhten Kraftstoffeffizienz und folglich geringeren CO₂-Bilanz, einem verbesserten Verkehrsfluss und einer erhöhten Sicherheit des Gesamtsystems Fahrer-Fahrzeug [11, S. 68].

Ab Level 3, dem hochautomatisierten Fahren (HAF), muss der Fahrer die Aktionen des automatisierten Systems nicht mehr überwachen [12, 13]. Das System erkennt Systemgrenzen selbständig und fordert den Fahrer zur Übernahme der Fahrzeugführung auf. Fahrfremde Tätigkeiten (FFT) können ausgeübt werden. Durch das zusätzliche Bearbeiten FFT, könnten die Entwicklungsperspektiven positiv beeinflusst und die Beanspruchung des Fernfahrers gesenkt werden, insbesondere bei langen, monotonen Fahrten.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Automatisierung der Fahraufgabe geht auch mit einer Reihe negativer Effekte einher. Die Rolle des Fahrers ändert sich von einer aktiven zu einer monitiven Tätigkeit [14, S. 318]. Der Ausschluss des Fahrers aus dem Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis kann zu einem verringerten Situations- und Modusbewusstsein führen. Dies äußert sich darin, dass der Fahrer kein akkurates Bild der vorliegenden Verkehrssituation hat und nicht weiß, was gerade passiert, warum dies passiert und wie sich die Situation weiter entwickeln wird [14, S. 316].

Um den Fahrer zu einer erfolgreichen und sicheren Systeminteraktion zu befähigen, fordert die Ethikkommission des BUNDESMINISTERIUMS FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (BMVI) [15, S. 13] die Gestaltung einer „transparente[n] und kontrollierbare[n] Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS), bei der zu jedem Zeitpunkt klar geregelt ist, welche Zuständigkeiten auf welcher Seite liegen“. Weiterhin gilt es, die Fähigkeiten und Fertigkeiten des menschlichen Fahrers bei der Gestaltung zu berücksichtigen.

Die Einführung einer Automatisierung führt nur zu einem Erfolg, wenn der Nutzer bereit ist, das System zu nutzen [16, S. 1] - ein Phänomen, das VENKATESH [17, S. 186] als Productivity Paradox beschreibt. "One barrier to successful deploy automation may be a lack of consumer trust" [18, S. 614]. GARCIA ET AL. [18, S. 614] und BRANDENBURG ET AL. [19, S. 10] kommen zu dem Schluss, dass das Vertrauen und die Akzeptanz des Fahrers in das automatisierte System eine entscheidende Rolle bezüglich der erfolgreichen Interaktion und der schlussendlichen Nutzung des Systems spielen. Eine geeignete Nutzerschnittstelle für das hochautomatisierte Fahren sollte nicht nur transparent und kontrollierbar gestaltet sein, sondern auch das Vertrauen und die Akzeptanz des Nutzers in das System fördern.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine geeignete, nutzerzentrierte MMS für das hochautomatisierte Fahren im Lkw zu konzipieren und zu evaluieren. Hierbei gilt es, relevante psychologische Aspekte zur Gestaltung von Fahrer-Fahrzeug-Schnittstellen und bestehende Normen und Richtlinien zu berücksichtigen. Die MMS soll den negativen Automationseffekten entgegenwirken und

den Fahrer zu einer sicheren und effizienten Handhabung des hochautomatisierten Systems befähigen. Weiterhin soll die MMS den Fahrer befähigen, ein angemessenes Vertrauen gegenüber der Automation und ein geeignetes mentales Modell (MM) hinsichtlich der Funktionsweise des automatisierten Systems zu entwickeln [14, S. 317].

Lernprozesse bilden die Grundlage für eine erfolgreiche Systeminteraktion und stellen bei der Interaktion mit einem hochautomatisierten System einen ausschlaggebenden Faktor dar [17, S. 187]. So entscheiden diese, ob das System durch den Fahrer genutzt wird oder nicht. Aufgrund des hohen forschungsökonomischen Aufwands ist aktuell unklar, wie Lern- und Adaptationsprozesse in der Interaktion mit hochautomatisierten Systemen verlaufen. Auch gibt es keine Evidenz bezüglich der Beziehung zwischen Systemvertrauen, MM und Lernprozessen über einen längeren Zeitraum [20, S. 33]. BRANDENBURG ET AL. [19, S. 9F] vermuten, dass Fahrer ihre Fahrleistung mittelfristig, mit zunehmender Übung, verbessern. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit liegt folglich in der Untersuchung auftretender Langzeiteffekte mit zunehmender Systemerfahrung. Hierbei werden insbesondere die Entwicklung des MM, des Vertrauens und der Akzeptanz betrachtet, um Rückschlüsse auf eine dauerhafte Nutzung des hochautomatisierten Systems ziehen zu können.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Dieses Kapitel zeigt den Stand der Wissenschaft und Technik der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion auf und geht dabei speziell auf die Grundlagen des Mensch Maschine Systems, relevante psychologische Konstrukte sowie die Veränderung der Fahraufgabe durch den Einsatz eines hochautomatisierten Systems ein.

2.1 Grundlagen des Mensch Maschine Systems

Um eine geeignete Mensch-Maschine-Interaktion zu gestalten, ist ein Überblick über die theoretischen Grundlagen des Zusammenspiels zwischen Mensch und Maschine nötig. Kapitel 2.1 bezieht sich hierbei speziell auf die Interaktion von Fahrer und Fahrzeug. Zunächst wird auf die Rolle des Fahrers bei der Fahrzeugführung eingegangen und relevante Einflüsse einer Automatisierung auf die Fahraufgabe abgeleitet. Aufbauend werden relevante kognitionspsychologische Konstrukte erläutert, welche die Leistung des Mensch Maschine Systems beeinflussen.

2.1.1 Modelle der Fahraufgabe

Die Fahrzeugführung stellt eine komplexe Aufgabe für den menschlichen Fahrer dar und setzt sich aus der Regelungsaufgabe, der Fahrzeugführung sowie der permanenten Überwachungsaufgabe der eigenen Fahrzeugbewegungen- und -umgebung zusammen [21, S. 1].

Nach GEISER [22, S. 77] kann die Fahrzeugführung in drei hierarchische Ebenen (primäre, sekundäre und tertiäre Aufgaben) unterteilt werden. Primäre Aufgaben umfassen alle Handlungen, die nötig sind, um das Fahrzeug von A nach B zu bewegen. Das Lenkrad sowie Gas- und Bremspedal dienen als Schnittstelle am Fahrzeug, um Einfluss auf die Quer- und Längsdynamik zu nehmen.

Um die primären Aufgaben effizient und sicher erfüllen zu können, entstehen weitere, sekundäre Aufgaben für den Fahrer, wie bspw. die Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern, Überwachungsaufgaben (bspw. Beobachten des Straßenverkehrs) sowie die Anpassung an sich ändernde Umweltbedingungen (bspw. Fahrumgebung).

Tertiäre Aufgaben sind nicht direkt mit dem Fahrprozess verbunden, sondern beziehen sich auf die Erfüllung von Komfortbedürfnissen des Fahrers (bspw. Unterhaltung). Die Ausführung der tertiären Aufgaben erfolgt parallel zur den primären und sekundären Aufgaben und kann bei manueller Fahrt zu einer Verbesserung aber auch Verschlechterung der Fahrleistung führen [23, S. 27].

SPIEßL [24, S. 8] merkt an, dass primäre und sekundäre Tätigkeiten auch unter dem Begriff der Hauptfahraufgabe zusammengefasst werden („tasks related to driving“). Tertiäre Tätigkeiten werden zu Neben- bzw. Sekundäraufgaben („tasks that are not driving-related“).

BERNOTAT [25], DONGES [26] und MICHON [27] unterteilen die primären Tätigkeiten weiterhin in die Bereiche der Navigation (Transportaufgabe), Bahnführung (Festlegung von Solltrajektorie und Geschwindigkeit) und Stabilisierung (Anpassung der Fahrzeugbewegungen an die geplante Trajektorie). Alle Ebenen bilden hierarchisch verknüpfte Regelkreise (Abbildung 2.1) [23, S. 29]. Die Ergebnisse der obersten Ebene stellen die Sollvorgabe für die jeweils folgende Ebene dar. Die Umwelt beeinflusst hierbei alle drei Ebenen der Fahrzeugführung [28, S. 7].

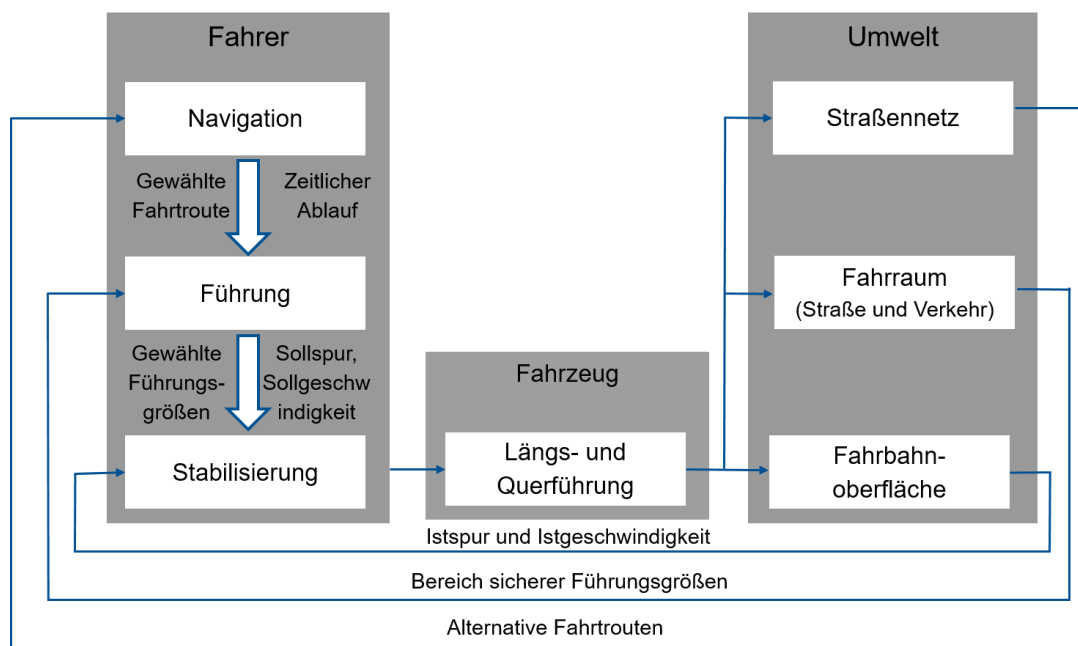


Abbildung 2.1: Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe [26, 28, S. 6]

Die hierarchische Einteilung der drei Ebenen spiegelt auch das zu Verfügung stehende Zeitbudget wider, um die mit der Fahraufgabe verknüpften Aufgaben zu erfüllen [29, S. 11]. Führt eine verspätete Entscheidung auf Navigationsebene noch zu keinerlei negativer Konsequenzen, kann ein Fehler auf Stabilisierungsebene zu kritischen Fahrsituationen und Unfällen führen [29, S. 11].

Um die Anforderungen und Vorgänge der drei Ebenen zu verdeutlichen, verknüpft DONGES [30] die drei Ebenen der Fahrzeugführung mit den Ebenen des Skills-Rules-Knowledge (SRK) Modells nach RASMUSSEN [31]. Der Fähigkeitserwerb unterteilt sich in drei Phasen und unterscheidet zwischen fertigkeiten-, regel- und wissensbasiertem Verhalten.

Während der Mensch wissensbasiertes Verhalten in unsicheren, unbekanntem Situationen, in denen noch keine Regeln zur Kontrolle der Umweltbedingungen im Gedächtnis vorhanden sind, anwendet, wird die regelbasierte Stufe in vertrauten Situationen mit gespeicherten Regeln, durch bewusste Kontrolle, abgerufen. Auf dem Level des fertigkeitenbasierten Verhaltens werden Verhaltensmuster ohne bewusste Kontrolle ausgeführt, was bei hochtrainierten Tätigkeiten auftritt [31, S. 264].

Eine Verdeutlichung der erläuterten Zusammenhänge ist in Abbildung 2.2. dargestellt. Diese suggeriert eine eindeutige Zuordnung der jeweiligen Ebenen des SRK Modells mit den Ebenen der Fahrzeugführung. Zu beachten ist, dass alle Stufen des SRK Modells auf die Ebenen der

Navigation, Führung und Stabilisierung wirken können [23, S. 32]. Der Übergang zwischen den Verarbeitungsebenen erfolgt durch Erfahrung. Während anfangs auf wissensbasierter Ebene höhere kognitive Prozesse unter bewusster Kontrolle stattfinden, entwickeln sich durch Übung Verhaltensmuster. Das Zurückgreifen auf Wissen und Regeln verringert sich bis eine automatisierte Verhaltensausführung ohne bewusste Kontrolle möglich wird [32].

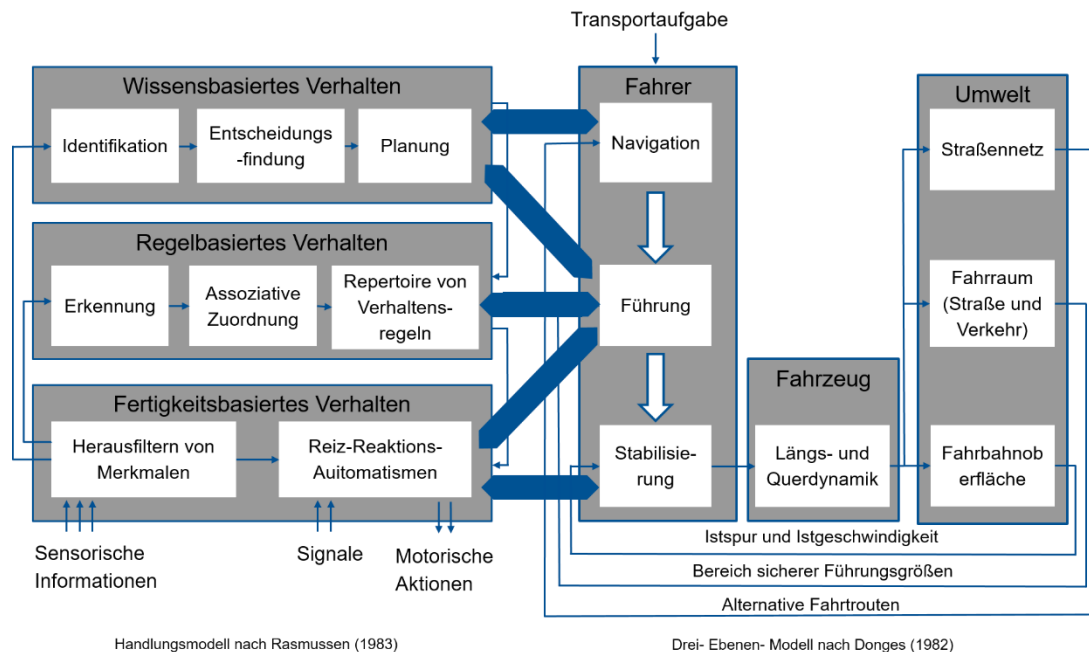


Abbildung 2.2: Verknüpfung des 3-Ebenen Modells nach DONGES [30, S. 19] mit dem Handlungsmodell nach RASMUSSEN [31, S. 258]

Zur Erfüllung der Fahraufgabe muss der Fahrer Informationen des Fahrzeugs und aus der Umgebung aufnehmen, verarbeiten und abgeben [29, S. 4].

Der menschlichen Informationsaufnahme werden alle Prozesse zugeordnet, die das Entdecken und Erkennen von Informationen betreffen. Die Informationsaufnahme erfolgt über die Sinneskanäle des Menschen. Im Kontext der Fahrzeugführung werden meist die optische, akustische und haptische Modalität beansprucht [29, S. 5].

Diese Signale werden auf der Stufe der Informationsverarbeitung (Kognition) weiterverarbeitet. Ergebnis des Informationsverarbeitungsprozesses stellt eine Entscheidungs- und Handlungsauswahl dar [29, S. 7]. Die Wahl der Verhaltensebene zur Informationsverarbeitung hängt hierbei von den individuellen Charakteristiken des Fahrzeugführers und den Erfahrungen im Bereich der gegebenen Anforderungen ab [29, S. 7]. Die Umsetzung der getroffenen Entscheidung in Handlungen erfolgt auf der Ebene der Informationsabgabe [29, S. 8].

2.1.2 Mentale Modelle

Um sich die Welt und ihr Verhalten erklären zu können, kombinieren Menschen Wissen, Regeln und Fertigkeiten zu Modellen [33, S. 415]. Mithilfe des MM ist der Mensch in der Lage, Systemverhalten zu erklären und vorherzusagen [28, S. 9].

Im Kontext der Mensch-Maschine-Interaktion definieren CAROLL & OLSON [34, S. 12] ein MM als „[...] a rich and elaborate structure, reflecting the user's understanding of what the system contains, how it works, and why it works that way.“

WILSON & RUTHERFORD [35, S. 619] beziehen in Ihrer Definition die Auswirkungen MM auf das menschliche Verhalten explizit ein und beschreiben MM als: „[...] a representation formed by a user of a system and/or task, based on previous experiences as well as current observation, which provides most (if not all) of their subsequent system understanding and consequently dictates the level of task performance.“

Die Annahmen des MM über Systemfunktionalitäten stehen als gespeichertes Langzeitwissen zur Verfügung und können für die Interaktion mit Systemen oder auch zum Lösen von Problemen direkt abgerufen werden [36, 36, S. 61-62].

Neben der statischen Wissenskomponente weisen MM auch einen dynamischen Charakter auf. So aktualisieren sich Erwartungen durch die Interaktion mit der Umwelt und Systemen [1, 1, S. 7]. Das mentale Modell korrigiert bzw. verfeinert sich mit Feedback und steigender Erfahrung [37, S. 77]. Während kompatible Elemente des MM durch aktive Nutzung aktiviert werden, wird inkompatibles Wissen unterdrückt. Nicht aktivierte Wissensaspekte verschwinden aus dem MM [38, S. 177].

Trifft der Mensch auf eine Maschine, deren Verhalten er nicht vollständig aus bekannten Modellen vorhersagen kann, baut dieser während der ersten Bedienung wissensbasiert ein neues MM auf [1, 28, S. 9].

Sind MM unvollständig oder falsch, können diese Fehler hervorrufen [37, S. 76], bspw. bei der Interpretation von Systemeigenschaften [39, S. 21]. Mit zunehmender Systemerfahrung kann die interne Repräsentation jedoch kalibriert werden [37, S. 76]. Das MM nähert sich der realistischen und idealen Systemfähigkeit an [38, S. 177].

Für MM gilt nach NORMAN [1, S. 8, 28, S. 9-10] folgendes:

1. MM sind unvollständig.
2. Die Fähigkeiten der Nutzer, diese MM einzusetzen, sind stark begrenzt.
3. MM sind instabil: Menschen vergessen Details des Systems, vor allem, wenn sie diese Details oder das gesamte System einige Zeit nicht genutzt haben.
4. MM haben keine festen Grenzen – ähnliche Geräte und Bedienhandlungen werden miteinander verwechselt.
5. MM sind unwissenschaftlich: Menschen bleiben bei abergläubischen Verhaltensmustern, selbst wenn diese unnötig sind – weil sie den geringen physischen Aufwand einem geistigen Zusatzaufwand vorziehen.
6. MM sind sparsam: Häufig führen Menschen lieber unnötige manuelle Handlungen aus, anstatt nachzudenken, wie sie diese Handlungen vermeiden könnten. Sie nehmen also einen höheren physikalischen Aufwand in Kauf, um geistige Komplexität zu vermeiden. Das gilt vor allem dann, wenn die zusätzlichen Handlungen einer einfachen Regel folgen, die sich für mehrere Geräte anwenden lässt und damit weniger verwirrend ist.

Die empirische Erfassung MM ist schwierig, weil sie individuell verschieden sind, bei der Bildung keinerlei festen Regeln folgen und Nutzer nur diejenigen Aspekte ihres MM berichten, dessen sie sich bewusst sind.

CHERRI ET AL. [40, S. 23] führen eine Reihe von Messmethoden auf, die zur Erfassung MM angewendet werden. Hierzu zählen Fokusgruppen, in-depth Interviews, Fragebögen, Card Sorting-/Tagebuchtechniken und Aufgabenanalysen. Ein wesentlicher Vorteil qualitativer Methoden bildet die detaillierte und flexible Erfassung des MM. Nachteile liegen in einer komplexen, zeitaufwändigen Durchführung und einer eingeschränkten Verallgemeinerung der Erkenntnisse. Es wird ein Messinstrument benötigt, das in der Lage ist, das MM und die Veränderung des MM (bspw. durch Interaktion mit einem System) zu erfassen. Zusätzlich sollen die erhobenen Daten vergleichbar sein, um die Berechnung inferenzstatistischer Tests zu ermöglichen. Zusätzliche Anforderungen an ein Messinstrument zur Erfassung mentaler Modelle liegen in der Einfachheit der Anwendung und im Analyseverfahren. Auf Basis dieser Anforderung entwickelt BEGGIATO [39] einen Fragebogen zur Erfassung des MM bei ACC Nutzung. Das MM wird in Form von Strukturwissen erfasst.

BUTZ & KRÜGER [41] unterscheiden bei der Gestaltung interaktiver Systeme zwischen implementiertem, präsentiertem und konzeptuellem Modell. Während das implementierte Modell die tatsächliche Funktionsweise eines Systems darstellt, beschreibt das präsentierte Modell: „die Art und Weise, wie sich die Funktion eines Systems dem Nutzer darstellt“. Das präsentierte Modell erzeugt das MM des Nutzers [41, S. 55]. Das konzeptuelle Modell stellt die Vorstellung des Entwicklers bezüglich der Funktionsweise und Bedienbarkeit dar. Die drei Modellvorstellungen interagieren miteinander (Abbildung 2.3). Das konzeptuelle Modell des Entwicklers und das MM des Nutzers sollten übereinstimmen, um eine geeignete Bedienbarkeit sicherzustellen. Hierfür muss das präsentierte Modell die Inhalte des konzeptuellen Modells widerspiegeln.

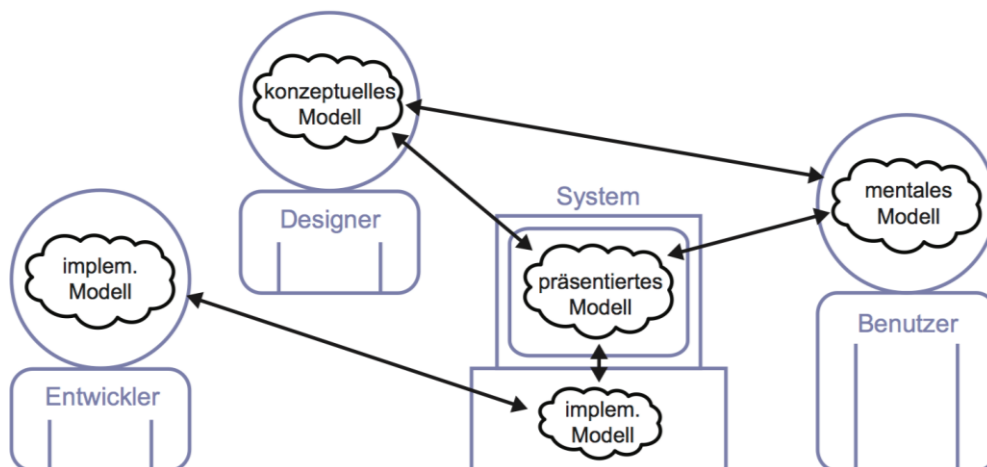


Abbildung 2.3: Nutzermodell und Entwicklermodell nach [41, S. 51]

2.1.3 Lernen

„Benutzer müssen die Funktion der Benutzerschnittstelle zunächst lernen“ [41, S. 35]. SCHMIDTKE & BERNOTAT [42, S. 83] beschreiben Lernen dabei als relative überdauernde, manifeste oder latente Verhaltensänderung infolge von Erfahrung. Der Erwerb von inneren Modellen bzw. inneren Repräsentationen stellt einen wichtigen Aspekt des Lernens dar [42, S. 86].

Zur Beschreibung von Lernprozessen gibt es eine Reihe von Theorien [43–45]. Bezogen auf den Kontext der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion unter Einbezug zunehmender Automatisierung ist davon auszugehen, dass der Fahrer sich als Folge von expliziten, deklarativen und impliziten

Lernvorgängen an automatisierte Systeme gewöhnt. Explizites Lernen steht hierbei für ein absichtliches, bewusstes Lernen, das verbalisierbar ist [46, S. 28]. Der Lernprozess ist geplant, Lerninhalte werden bewusst eingeprägt und Lernziele sind festgelegt. Explizites Lernen wird durch die bewusste Aufnahme von Informationen geleitet [46, S. 28]. Implizites Lernen beschreibt das unbewusste Lernen ohne Aufmerksamkeitszuwendung [46, S. 28].

Die Behaltensleistung steigt, wenn zu lernende Elemente mit bereits existierenden Gedächtnisinhalten in Verbindung gebracht werden [41, S. 38]. Als entscheidender Faktor wird die Trainingseffizienz definiert [41, S. 35]. Diese ist am größten, wenn

- der beste Lerneffekt in kürzester Zeit erzielt wird
- die längste Erinnerungsleistung erreicht wird
- und dieses einfach und günstig in einer Benutzerschnittstelle umgesetzt werden kann.

Ebenfalls mit dem Lernen verknüpft, sind Vergessensprozesse. Diese bezeichnen den Verlust der Erinnerung [46, S. 37]. Die Fähigkeit, sich an Elemente aus dem Langzeitgedächtnis zu erinnern, geht verloren [41, S. 37-38]. EBBINGHAUS [47] stellt fest, dass auch Vergessensprozesse einen logarithmischen Verlauf aufweisen. Der Vorgang des Vergessens kann durch mehrfaches Wiederholen abgeschwächt werden.

Während die vorherig erläuterten Ansätze qualitative Aspekte des Lernens behandeln, beschreibt das Power Law of Practice (PLoP), auch als Power Law of Learning (PLoL) bezeichnet, auftretende Lernprozesse quantitativ [48]. NEWELL & ROSENBLOOM [48] setzen hierbei die Zeit zur Aufgabenausführung und die Anzahl an Übungsdurchgänge in Beziehung zueinander. Die Lernleistung wird nicht als lineare Funktion, sondern als logarithmisches Verhalten dargestellt. Die Lernleistung steigt anfangs stark an und nähert sich daraufhin der optimalen Performanz [49]. LACROIX & COUSINEAU [49] prüfen die Gültigkeit des PLoP für verschiedenste Bereiche u.a. für perzeptuell-motorische Fertigkeiten als auch für die Wahrnehmung und das Gedächtnis. Aktuell existieren keine Studienerkenntnisse, ob das PLoL auch bei auftretenden Lernprozessen in der Interaktion mit hochautomatisierten Systemen gültig ist.

2.1.4 Verhaltensadaptation

Die Anpassung von Verhalten an neue, geänderte Bedingungen wird als Verhaltensadaptation bezeichnet [37, S. 77] und ist eng mit dem Konstrukt des Lernens verknüpft. Die ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD) [50, S. 23] definiert Verhaltensadaptation speziell für den automobilen Kontext als: „[...] behaviours which may occur following the introduction of changes to the road-vehicle-user system [...], they create a continuum of effects ranging from a positive increase in safety to a decrease in safety.“

Die Definition zeigt, dass sowohl korrekte, angemessene als auch fehlerhafte, unerwartete Verhaltensadaptation das Ergebnis einer Systeminteraktion sein können [37, S. 77]. Um fehlerhafte Adaptationen zu verhindern, ist ein Verständnis über Einflussfaktoren auf die Verhaltensadaptation und den Lernprozess über einen längeren Zeitraum notwendig.

Prozessmodell der Verhaltensadaptation nach Schlag und Weller

Neben motivationalen Größen kann ein falsches oder inkorrektes MM bezüglich der Funktionsweise oder Einsatzgrenzen von FAS, einen Einfluss auf die Bildung unerwarteter Adaptationen

haben [37, S. 78]. SCHLAG & WELLER [37, S. 79] fassen die motivationalen Einflussgrößen auf die Verhaltensadaptation in einem dynamischen Prozessmodell zusammen (Abbildung 2.4). So kommt eine Verhaltensadaptation zustande, wenn die resultierende Adaptation durch Interaktion mit dem zugrundeliegenden System einen subjektiven Nutzen aufweist [37, S. 79]. Der subjektive Nutzen wird hierbei als: „Möglichkeit zur Erreichung von Zielen“ definiert [37, S. 80].

Wird das MM nicht durch eine geeignete MMS korrigiert, können fehlerhafte Verhaltensanpassungen die Folge sein [37, S. 78].

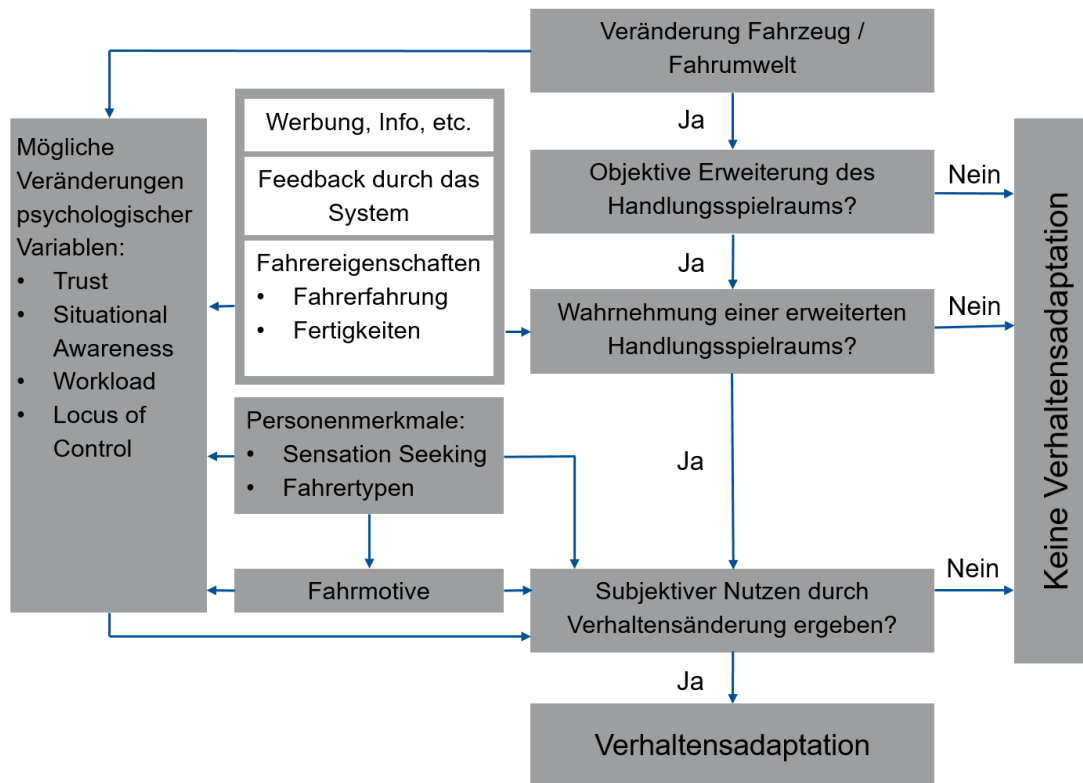


Abbildung 2.4: Prozessmodell der Verhaltensadaptation [37, S. 79, 51]

Dynamisches Modell zur Verhaltensanpassung nach Rudin-Brown

Mit dem qualitativ, dynamischen Modell der Verhaltensanpassung zeigen RUDIN-BROWN & NOY [52] den Zusammenhang zwischen MM und Verhaltensadaptation auf (Abbildung 2.5) [53, S. 61] .

Das individuelle MM einer Person beeinflusst das Fahrverhalten auf strategischem, taktischem und operationalem Level. Neben einem Kontrollmechanismus, der einen Abgleich zwischen dem sichtbaren Ergebnis und dem Fahrverhalten durchführt, wird das MM auch über eine Feedbackschleife (Erfahrung) aktualisiert.

Aus dem Modell wird ersichtlich, dass eine Reihe weiterer Einflussfaktoren (Persönlichkeit, Vertrauen) die Bildung des MM und die darauffolgende Verhaltensanpassung beeinflusst.

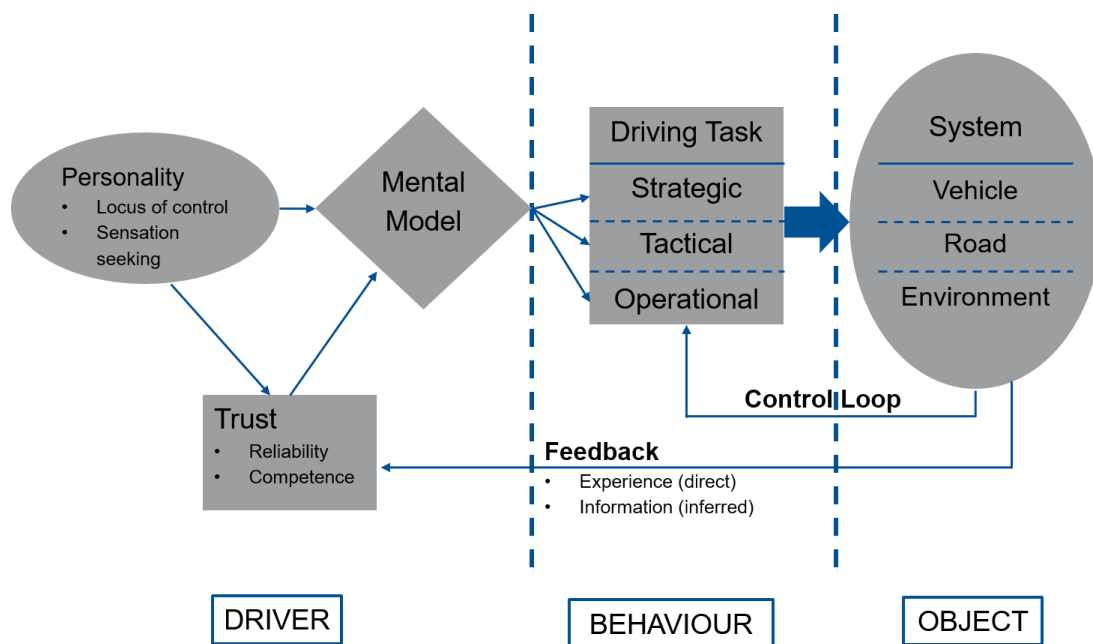


Abbildung 2.5: Qualitatives Modell der Verhaltensadaptation nach RUDIN-BROWN & NOY [52, 53, S. 61]

Driver Appropriation Modell nach Cotter & Mogilka

COTTER & MOGILKA [54] erweitern die Modelle von SCHLAG & WELLER [37] und RUDIN-BROWN & NOY [52] für die Verhaltensadaptation, die im Zusammenhang mit der Nutzung von FAS entsteht (Abbildung 2.6).

COTTER & MOGILKA [54, S. 8] sprechen in diesem Zusammenhang über *Driver Appropriation* (Fahrerverhaltensadaptation) und definieren den Prozess als: „Acquisition of knowledge, skills and attitudes underlying short term and long term changes in behavior“. Driver Appropriation tritt sowohl kurzfristig bei der ersten Interaktion mit einem FAS als auch nach langfristiger FAS Nutzung auf und bewegt sich auf operationalem (Fertigkeitserwerb), taktischen (tatsächliche Nutzung, behaviorale Adaptation) und strategischem Level (Wissen, Einstellungen, Motive) [27, 54, S. 8]. Durch den interagierenden Charakter der drei hierarchischen Ebenen, wirkt sich die Verhaltensadaptation auf einem Level auf die jeweiligen anderen Level aus [54, S. 9].

Das Modell postuliert drei Einflussfaktoren auf die Driver Appropriation: Das System, die Situation und den Fahrer mit seinen Eigenschaften und Charakteristiken. Auf Basis der Systemeigenschaften und des Systemverhaltens erarbeitet sich der Fahrer eine mentale Repräsentation des Systems. Diese aktualisiert und verfeinert sich mit Systemerfahrung. Der vorherrschende Automationslevel, die Leistung und die Zuverlässigkeit des FAS wirken sich auf die mentale Repräsentation aus.

Auch die Gestaltung der MMS hinsichtlich Transparenz, Verständlichkeit und Vorhersagbarkeit beeinflussen die Bildung des MM. Ein korrektes MM bezüglich der Systemfähigkeiten und Systemgrenzen stellt die Grundvoraussetzung für ein angemessenes Vertrauenslevel dar. Das MM dient dem Fahrer als Heuristik bei der Suche nach Informationen [37, S. 77] und ermöglicht dem Fahrer unerwartete Situationen zu detektieren und korrekt zu reagieren [54, S. 13].

Das Vertrauen beeinflusst das Verhalten und den Informationsverarbeitungsprozess. Die Konsequenzen eines Verhaltens in einer Situation aktualisieren das MM. Alle ablaufenden Prozesse werden durch individuelle Charakteristiken des Fahrers beeinflusst.

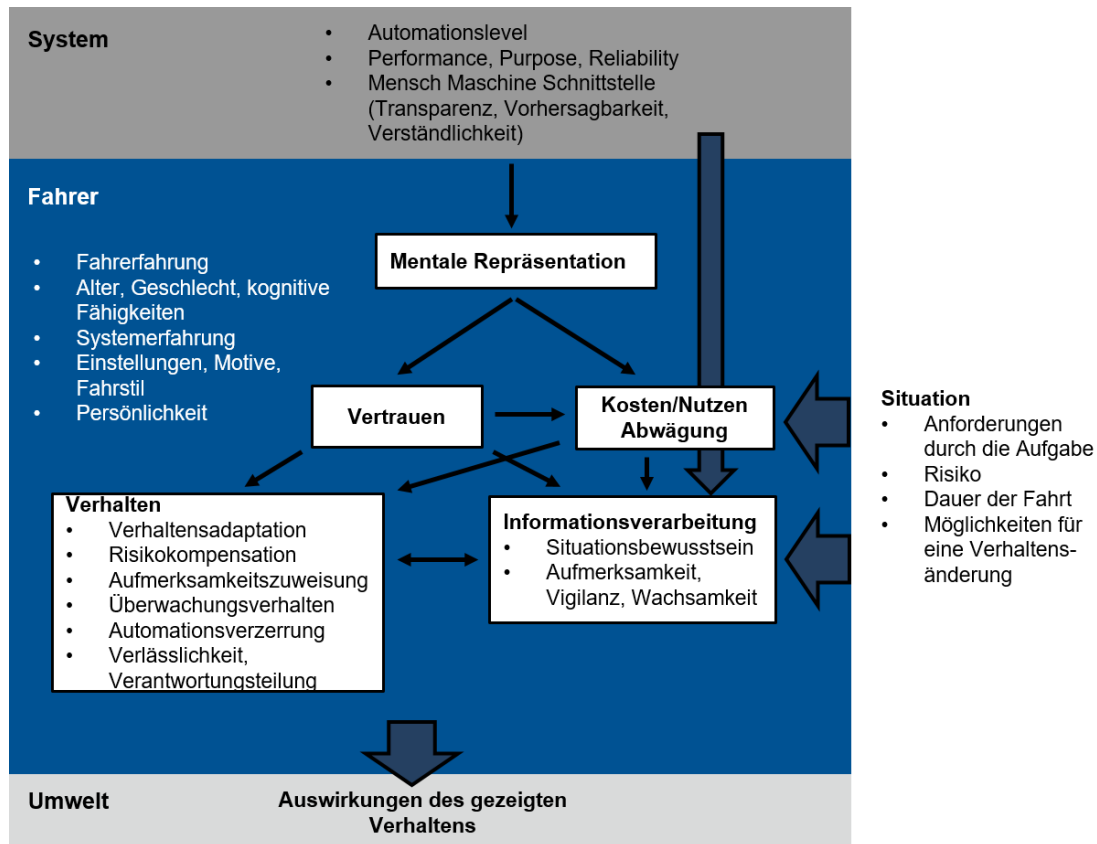


Abbildung 2.6: Driver Appropriation Modell nach COTTER & MOGLIKA [54, S. 14]

2.1.5 Situationsbewusstsein

Das Lernen wird neben dem vorhandenen inneren Modell auch durch das vorhandene Situationsbewusstsein beeinflusst [39, S. 14]. Das Konzept des Situationsbewusstseins stammt ursprünglich aus der Human-Factors Forschung im Bereich der Luftfahrt [55, S. 164]. Durch einen steigenden Grad an Automatisierung im Fahrzeug, kann das Konzept dennoch auf die Fahrzeugführung übertragen werden [39, S. 60]. So müssen auch in diesem dynamischen und komplexen Umfeld Informationen aus der Umwelt aufgenommen, verarbeitet und zukünftige Ereignisse antizipiert werden.

Nach ENDSLEY [55, S. 164] beschreibt der Begriff *Situation Awareness* die Wahrnehmung und Bedeutungserfassung von Elementen in einer dynamischen Umwelt sowie deren Zustandsprojektion in die nahe Zukunft. Das aus diesem Prozess entstehende Verständnis einer Situation dient als Grundvoraussetzung für ein effizientes Handeln und Eingreifen in einer komplexen und dynamischen Umgebung [56, S. 5].

Basierend auf dieser Definition entwickelt ENDSLEY [55, 57] ein Modell mit drei hierarchischen Ebenen des Situationsbewusstseins (Abbildung 2.7). Auf der ersten Ebene (perception) werden vorhandenen Informationen, Attribute und dynamische Eigenschaften relevanter Objekte aus der Umwelt wahrgenommen, um eine mentale Repräsentation der Situation zu schaffen. Auf der zweiten Ebene (comprehension) erfolgt eine Verknüpfung der Einzelinformationen zu

einem holistischen Gesamtbild. Ein Verständnis für die Bedeutung der jeweiligen Elemente wird aufgebaut. Auf Ebene drei (projection) wird die zukünftige Entwicklung der Situation, auf Basis der wahrgenommenen und integrierten Informationen antizipiert.

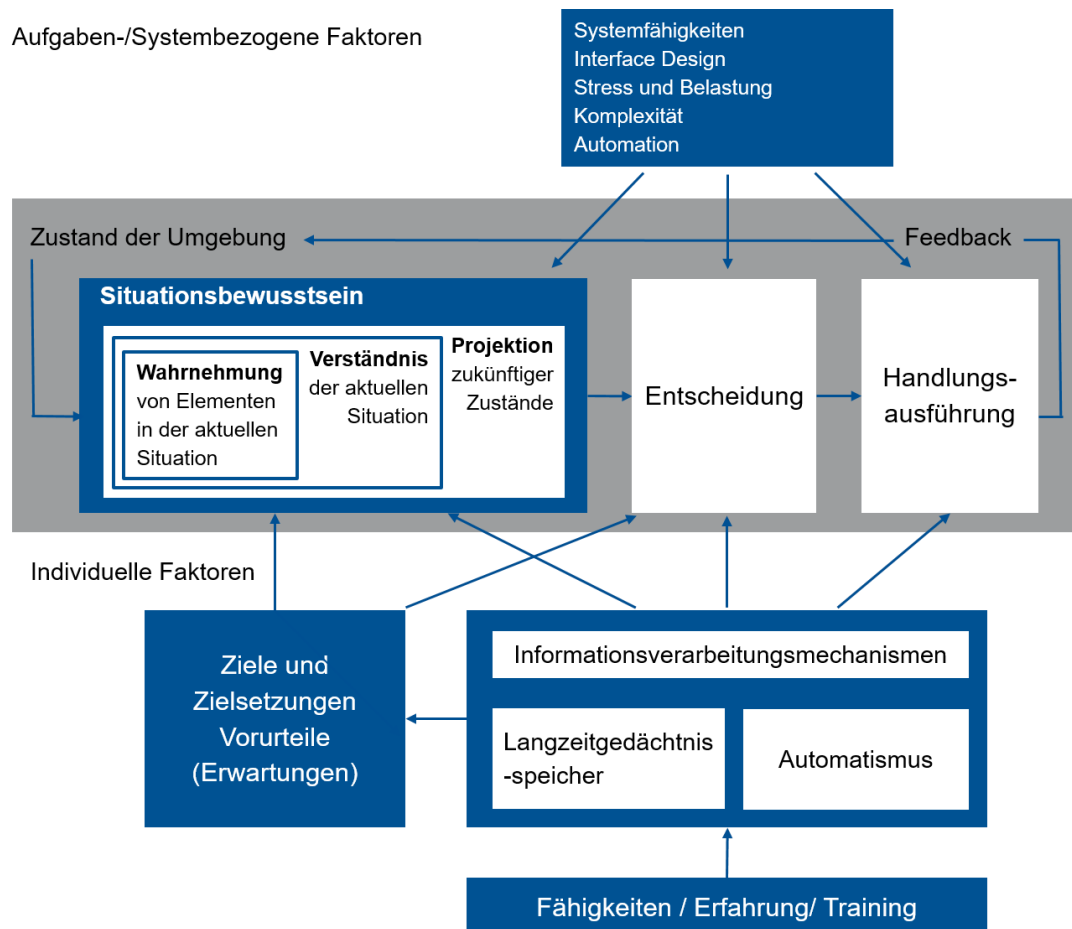


Abbildung 2.7: Darstellung des Situationsbewusstseins [57, S. 35]

Das Situationsbewusstsein beeinflusst die Entscheidungsprozesse und die Handlungsausführungen des Menschen. ENDSLEY'S [36] Modell berücksichtigt auch externe Faktoren, welche die Bildung des Situationsbewusstseins beeinflussen. Hierzu zählen neben individuellen Faktoren des Operators (Fähigkeiten, Training und Erfahrung) auch aufgabenspezifische Faktoren wie die vorherrschende Arbeitsbelastung oder das Ausmaß der Automatisierung eines Systems und die Gestaltung der MMS. Die zeitliche Dynamik der zugrundeliegenden Situation stellt einen weiteren Einflussfaktor dar und beeinflusst den Entscheidungs- und Handlungsprozess [58, S. 4]. So muss der Fahrer in hochdynamischen Verkehrssituationen permanent entscheiden, welche Aufgabe priorisiert werden muss und welchen Einfluss die wahrgenommene Information auf das aktuelle Geschehen hat [58, S. 4].

FAS können auf allen drei Ebenen des Situationsbewusstseins wirken und dabei das Situationsbewusstsein verringern [37, S. 74]. Gründe hierfür können in der zugrundeliegenden MMS liegen, bei der entweder fehlerhafte, ungenaue oder zu viele bzw. zu wenige Informationen zum falschen Zeitpunkt oder am falschen Ort angezeigt werden [37, S. 74-75].

Wissensstrukturen im Langzeitgedächtnis in Form von MM stellen ein zentrales Element des Situationsbewusstseins dar [57, 59]. Das MM beeinflusst das Situationsbewusstsein auf allen

drei Ebenen (Abbildung 2.8). Inkorrekte MM stellen einen Grund für ein fehlerhaftes Situationsbewusstsein dar [36, S. 61, 60].

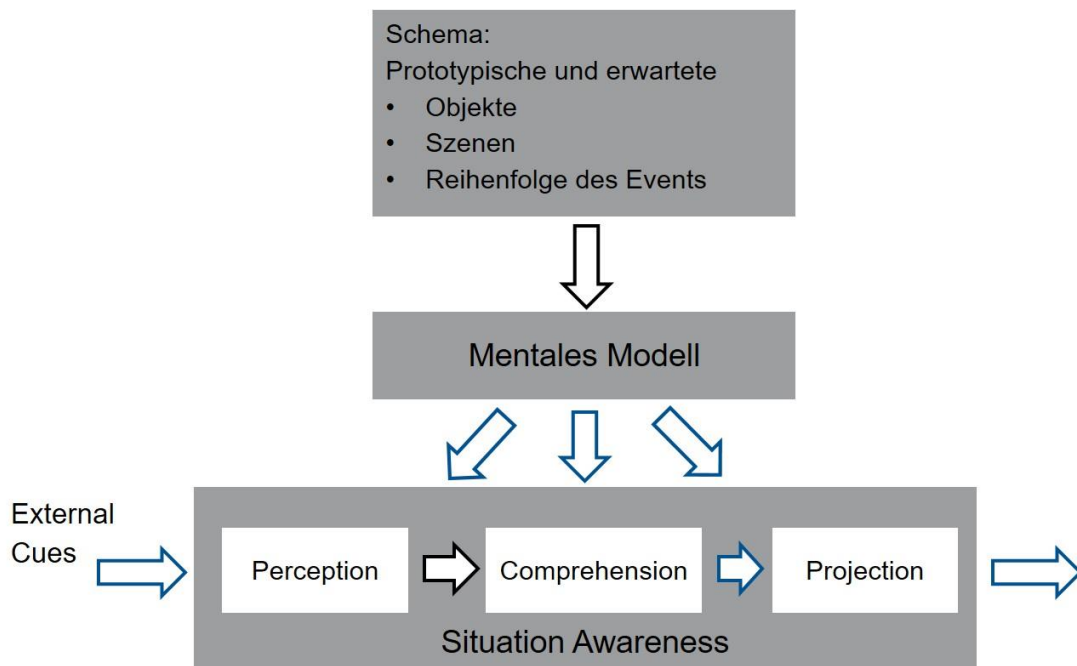


Abbildung 2.8: Darstellung des Zusammenhangs zwischen mentalem Modell und dem Situationsbewusstsein [36, S. 62]

2.2 Automation und Automationseffekte

Der zunehmende Einsatz einer Fahrzeugautomatisierung soll den Fahrer bei der Fahraufgabe (Kapitel 2.1.1) unterstützen und entlasten. Fahrkomfort, Sicherheit und Effizienz des Fahrens sollen gesteigert werden [11, S. 65].

2.2.1 Definition

„Automation can be defined as a [...] system that accomplishes (partially or fully) a function that was previously, or conceivably could be, carried out (partially or fully) by a human operator“ [61, S. 287, 62, S. 232].

Der Begriff der Automation ist vom Begriff der Automatisierung abzugrenzen. Handelt es sich bei einer Automatisierung um einen Prozess, wird unter Automation das Resultat dieser Übertragung verstanden [14, S. 310]. Allgemein wird von Automatisierung bzw. Automation gesprochen, wenn einzelne Funktionen oder ganze Tätigkeiten vom Menschen auf eine Maschine übertragen werden [14, S. 309]. Im Kontext der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion können alle Übernahmen von Aufgaben des Menschen seitens der Maschine als Automatisierung bezeichnet werden [62, S. 231].

Aus den obigen Definitionen wird ersichtlich, dass ein automatisiertes System eine variierende Anzahl an Aufgaben für den Menschen übernehmen kann. Dies erfolgt durch den Einsatz verschiedenster FAS. SCHLAG & WELLER [37, S. 72] definieren FAS als Systeme, bei denen entscheidende Komponenten der menschlichen Kognition (bspw. Wahrnehmung und Evaluation)

übernommen werden. Die Ausführung einer Handlung zählt nicht zum Begriff der Fahrerassistenz [37, S. 72]. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung von Sensortechnologien, Umfeldwahrnehmung und Aktorik, ist es möglich einzelne FAS (Längs- und Querverführung betreffend) miteinander zu kombinieren [63, S. 16]. Je nachdem, in welchem Umfang die Funktionen an Mensch oder Maschine übertragen werden, ergibt sich ein Spektrum der Fahrzeugautomatisierung [23, S. 36].

2.2.2 Klassifikation der Automationsstufen

Es existiert eine Reihe von Systematiken zur Klassifikation automatisierter Systeme. Zu unterscheiden sind Klassifikationen, die ihren Ursprung in der Luftfahrt oder Prozesstechnik haben [61, S. 287, 64, S. 358, 65], und daher nur bedingt auf den Kontext der Fahrzeugführung anwendbar sind [66, S. 514].

Die Klassifikationen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) [12], des Verbands der deutschen Automobilindustrie (VDA) [13], der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) und der Society of Automotive Engineers (SAE) werden explizit für den Anwendungsfall der Fahrzeugführung aufgestellt. Die Nomenklaturen des NHTSA und des SAE stellen die aktuell gültigen Klassifikationen für das automatisierte Fahren im amerikanischen Raum dar und sind nicht auf die deutsche Rechtsgrundlage übertragbar.

Grundlage der Arbeit bilden die Klassifikationsschemata des VDA [13] und der BAST [12], die eine hohe Übereinstimmung aufweisen. Vorteile der Klassifikationen liegen in Ihrer Vereinbarkeit mit der aktuell gültigen rechtlichen Lage in Deutschland. Die Nomenklaturen sind somit der rechtlichen Bewertung zugänglich [12, 12, S. 1]. Widmet sich die BAST Nomenklatur speziell der Aufgabenteilung zwischen Fahrer und Automation, bezieht die VDA Definition weitere wichtige Aspekte zur Beschreibung der Stufen mit ein, wie bspw. die Rückfallebene bei dem Erreichen von Systemgrenzen, den spezifischen Einsatzbereich, die benötigte Reaktionszeit bei Übernahme-szenarien sowie die Verfügbarkeit des Fahrers [13, S. 7].

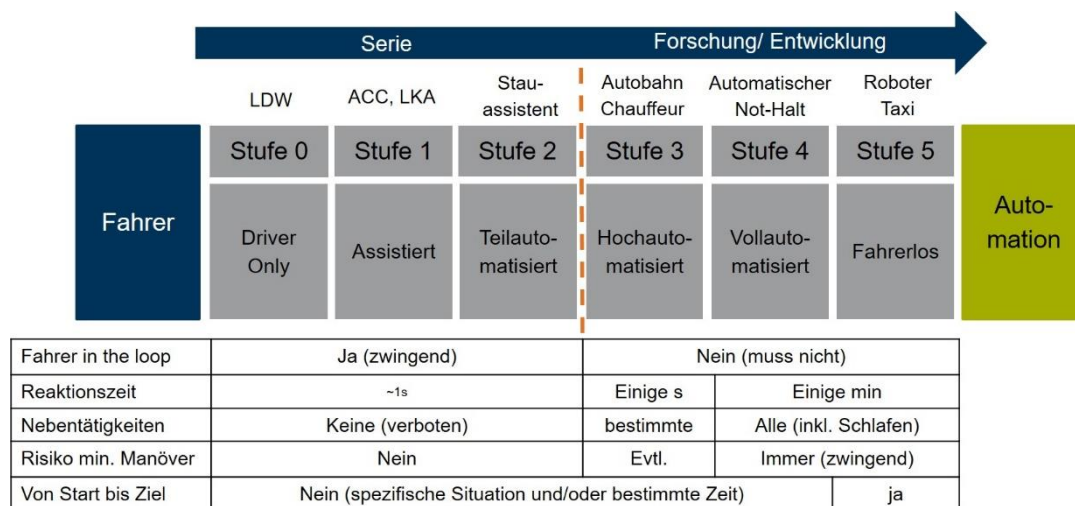


Abbildung 2.9: Einteilung der Automatisierungsgrade nach VDA [13]

Abbildung 2.9 zeigt die Einteilung der Stufen des automatisierten Fahrens des VDA [13, S. 7]. Das Kontinuum reicht hierbei vom manuellen (Stufe 0) bis zum fahrerlosen Fahren (Stufe 5).

Im manuellen Fahren (Driver only, Stufe 0) ist der Fahrer vollständig für die Fahrzeugführung verantwortlich und führt Quer- und Längsführung selbständig aus. Der Fahrer wird nicht durch aktiv eingreifende FAS unterstützt. In Stufe 1, dem assistierten Fahren, führt der Fahrer dauerhaft entweder die Quer- oder die Längsführung aus. Die andere Fahraufgabe wird in Grenzen durch das FAS ausgeführt. Im teilautomatisierten Fahren (Stufe 2) übernimmt das System Quer- und Längsführung. Die Fahrzeugführung wird aus technischer Sicht vollständig durch das System übernommen [63, S. 19]. Der Fahrer hat die Aufgabe das System permanent zu überwachen.

Innerhalb der ersten drei Stufen des Automationsspektrums muss der Fahrer permanent „in the loop“ sein und die Automation überwachen. Bis Stufe 2 ist die Ausführung von fahrfremden Tätigkeiten (FFT) nicht erlaubt.

Ab Stufe 3, der hochautomatisierten Fahrt, verändert sich die Interaktion zwischen Fahrer und Automation deutlich. Das System übernimmt die Quer- und Längsführung. Der Fahrer muss die Fahraufgabe nicht mehr überwachen, da Systemgrenzen selbständig erkannt werden und der Fahrer mit ausreichender Zeitreserve zur Übernahme aufgefordert wird. Es entsteht ein Tausch von ehemaliger Haupt- und Nebenaufgabe, der es dem Fahrer erlaubt FFT nachzugehen. Welche Aufgaben sinnvoll sind und innerhalb kurzer Zeit, zur Übernahme der Fahraufgabe, unterbrochen werden können, ist Gegenstand aktueller Forschung [16, 67–70].

In der Definition wird nicht genauer spezifiziert, wie viele Sekunden dem Fahrer zur Übernahme der Fahrzeugführung zur Verfügung stehen. Nach aktuellen Studienerkenntnissen [63, S. 19] sollte die Zeitreserve bis zu zehn Sekunden betragen [71, 72]. Es muss beachtet werden, dass die Erkenntnisse auf Basis von Studien im Pkw basieren. Eine Übertragung auf den Bereich Lkw ist nur bedingt möglich.

Ab Stufe 4 (vollautomatisierte Fahrt) sind nach VDA alle fahrfremden Tätigkeiten (inkl. Schlafen) erlaubt, da der Fahrer nicht mehr als Rückfallebene dient. Übernahmezeiten bewegen sich im Rahmen von Minuten. Weiterhin ist die Automation bei dem Erreichen von Systemgrenzen in der Lage, einen risikominimalen Zustand herzustellen.

Die Stufen 0 bis 4 zeichnen sich dadurch aus, dass die Automation nur in spezifischen Anwendungsfällen möglich ist. Erst ab Stufe 5, dem autonomen/fahrerlosen Fahren, kann die Automation in jeder auftretenden Fahrsituation eingesetzt werden. Der Fahrer ist bei dieser Form der Automation nicht mehr im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis eingebunden.

2.2.3 Automationseffekte

Der Grundgedanke einer Automatisierung von Systemen liegt in der Steigerung der Leistungsfähigkeit des gesamten Mensch-Maschine-Systems [73, S. 17]. Weiterhin sollen die Arbeitsbedingungen für den Menschen durch eine Entlastung von schweren, gefährlichen aber auch langweiligen Tätigkeiten, verbessert und der Fahrkomfort für den Fahrer gesteigert werden [74, S. 659].

WICKENS ET AL. [43, S. 491] nennen vier Gründe, die für eine Automatisierung von Systemen sprechen:

- Die Ausführung einer Aufgabe durch den Operator ist gefährlich oder gar nicht möglich.
- Die Ausführung einer Aufgabe ist für den Operator schwierig oder unangenehm.

- Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems wird durch die Automation verbessert.
- Die Automatisierung einer Aufgabe ist technisch möglich und kosteneffizient anwendbar.

Die Automatisierung verschiedener Komponenten der Fahrzeugführung, verändert die Fahraufgabe des Menschen [37, S. 71]. Aufgaben, die ursprünglich selbständig ausgeführt werden müssen, werden auf die Maschine verlagert. Ehemals aktive Aufgaben wandeln sich mit steigendem Automatisierungsgrad zu monitiven Aufgaben [62, S. 231].

GASSER ET AL. [75, S. 52] betonen daher die Bedeutsamkeit der Gestaltung einer geeigneten MMS für das automatisierte Fahren.

Fahrerzustand und Übernahmeproblematik

Die neue Rolle des Menschen wird durch SHERIDAN [76, S. 1025] als *supervisory control* bezeichnet und besteht darin „[...] zu planen, was die Automation machen soll, dies der Automation mitzuteilen, anschließend die Ausführung zu überwachen und immer dann einzugreifen, wenn die Automation die vorgegebenen Direktiven nicht erwartungsgemäß umsetzt“ [14, S. 311]. Die Interaktionsfrequenz zwischen Mensch und System sinkt und resultiert in einer verringerten Leistungsfähigkeit sowie Aktivierung des Menschen [23, S. 48].

Der Zusammenhang zwischen Aufgabenschwierigkeit, mentaler Beanspruchung und Performanz ist in Abbildung 2.10. dargestellt. Dieser verläuft nicht proportional, sondern stellt einen umgekehrten U-Zusammenhang dar. Eine optimale Fahrleistung ergibt sich auf einem mittleren Automatisierungsniveau [77, S. 23]. Sowohl Unter- als auch Überforderung wirken sich negativ auf die Fahrleistung des Fahrers aus.

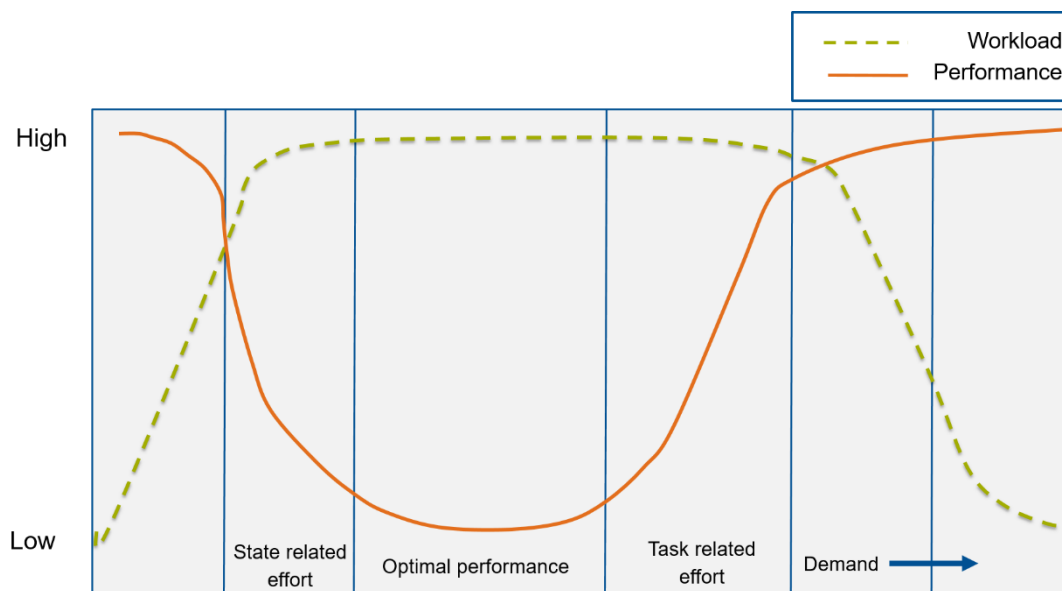


Abbildung 2.10: Zusammenhang zwischen Aufgabenschwierigkeit, Workload und Performanz [77, S. 24]

Übertragen auf den Kontext der Fahrzeugführung könnte der Einsatz eines hochautomatisierten Systems für eine niedrige Aufgabenschwierigkeit stehen. Das manuelle Fahren könnte eine hohe Aufgabenschwierigkeit darstellen. Während aktivierter hochautomatisierter Fahrt liegt folglich eine geringe Aufgabenschwierigkeit vor. Es kommt zu einer Unterforderung und zu einer

Deaktivierung des Menschen. Ein Ausfall der Automation führt zu einer Erhöhung der Aufgabenschwierigkeit und erneut zu einer geringen Performanz. Der Fahrer benötigt Zeit, um sich für die Übernahme der Fahraufgabe zu aktivieren.

Zudem sind Menschen schlecht für überwachende Tätigkeiten geeignet [65, S. 463, 78] besonders, wenn längerfristig kaum Arbeitsbelastung auftritt, dann aber schlagartig alle Ressourcen mobilisiert werden müssen [28, S. 16]. Diese Widersprüchlichkeiten werden auch als Ironies of Automation [78, S. 775] bezeichnet. Das automatisierte System soll den fehlerhaften Menschen unterstützen, entlasten oder ersetzen. Der Mensch wiederum wird benötigt, um im Fehlerfall, meist komplexen und schwierigen Situationen, die Kontrolle zu übernehmen [37, S. 80, 78, S. 775].

Durch die Abkopplung des Fahrers aus dem Regelkreis entstehen weitere Probleme, die unter dem Begriff Out-of-the-Loop-Unfamiliarity (OOTLUF) zusammengefasst werden [66]. Hierzu zählen:

- ein verringertes bzw. fehlendes Situationsverständnis
- der Verlust von Fertigkeiten
- ein unangepasstes Vertrauen des Fahrzeugführers in die Automation

Dieses Phänomen ist u.a. dafür verantwortlich, dass die Fähigkeit des Fahrers, Systemfehler zu entdecken und darauf zu reagieren, mit steigendem Automatisierungsgrad abnimmt.

Situations- und Systemverständnis

Analog zu dem in Kapitel 2.1.5 vorgestellten Modell des Situationsbewusstseins, können steigende Automatisierungsgrade dazu führen, dass sich der Operator kein aktuelles Bild des Systemzustandes formen kann [79, S. 381-382]. Der Fahrer kann nicht mehr einschätzen, wann ein Eingriff erforderlich wird [79, S. 382]. Es gibt eine Reihe von Gründen, die zu einem Verlust des Situationsbewusstseins führen können. MANZEY [14, S. 316] führt diese auf drei grundlegende Problemfelder zurück:

- Mangelnde Überwachung, ausgelöst durch Vigilanzprobleme
- Schlecht gestaltete Systemrückmeldungen
- Ein falsches MM

Neben einem verringerten Situationsbewusstsein kann auch ein falsches Systemverständnis (eng. Mode Awareness) zu einer schlechten Fahrleistung führen. Eine fehlerhafte Mode Awareness oder Mode Errors liegen vor, wenn eine Automatisierungsstufe angenommen wird, die nicht vorliegt [37, S. 81]. Dieser Effekt tritt ein, wenn die Automation in verschiedenen Stufen ausgelegt ist und folglich mehrere Rückfallebenen zur Verfügung stehen [37, S. 81]. Verstärkt wird dieser Effekt, wenn der Fahrer zusätzlich ein unvollständiges bzw. fehlerhaftes MM über die Funktionsweise der Automation besitzt.

Fertigkeitsverlust

Ein Verlust von Fertigkeiten tritt auf, wenn ursprünglich manuell durchgeführte Tätigkeiten so lange durch die Automation übernommen werden, dass der Mensch grundlegende Handlungsmuster und Strategien verlernt [37, 78, S. 775, 79, S. 381]. Kommt es zu einer Übernahme, ist der Mensch nur eingeschränkt in der Lage, auf vorhandene Fertigkeiten zurückzugreifen und eine angemessene Handlung durchzuführen [28, S. 17, 78].

Vertrauen in Automation

“Automation is often problematic because people fail to rely upon it appropriately” [80, S. 50]. Die Nutzung eines automatisierten Systems hängt mit dem Vertrauen zusammen, das der Mensch der Automation entgegenbringt [14, S. 312, 80, 81]. Das Vertrauen bestimmt weiterhin, ob die Automation korrekt genutzt wird [14, S. 313].

Probleme ergeben sich, wenn der Automation zu viel (übersteigertes Vertrauen) oder zu wenig (Misstrauen) vertraut wird. Misstrauen resultiert in einer mangelnden Nutzung der Automation, obwohl diese grundsätzlich zuverlässig funktioniert [62, S. 238]. Positive Automationseffekte können somit nicht eintreten [14, S. 314, 81]. Übersteigertes Vertrauen führt zu einem unzureichenden Überwachungs- und Kontrollverhalten, was sich negativ auf das Situationsbewusstsein auswirkt. Weiterhin können potentielle Automationsfehler übersehen werden [14, S. 314].

Idealerweise besitzt der Fahrer ein angemessenes Vertrauen in die Automation, bei dem das Vertrauen mit den tatsächlichen Systemeigenschaften und -grenzen übereinstimmt. Die Bildung des angemessenen Vertrauens verläuft in einem mehrstufigen Prozess, bestehend aus einer initialen Auseinandersetzung mit der Automation, einer Adaptationsphase und einer Handlungsbestätigungsphase [82, S. 40]. Die Zusammenhänge von übersteigertem Vertrauen, Misstrauen und angemessenem Vertrauen sind in Abbildung 2.11 dargestellt [80, S. 55].

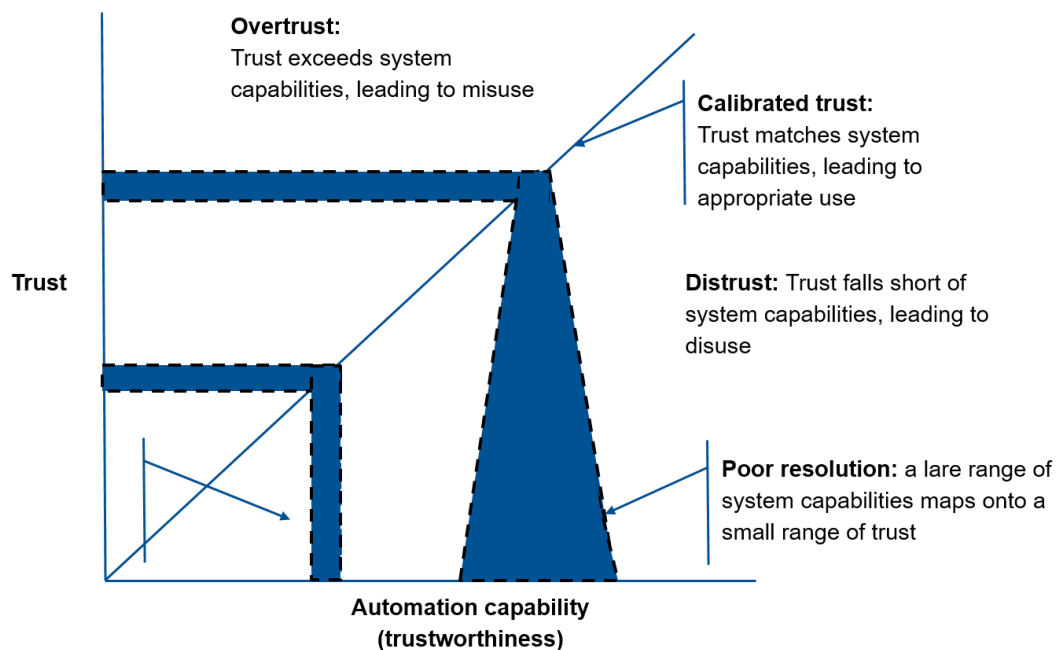


Abbildung 2.11: Darstellung des Zusammenhangs von Misstrauen, übersteigertem Vertrauen und angemessenem Vertrauen (eigene Darstellung in Anlehnung an [80, S. 55])

Um ein korrektes Bild der Systemeigenschaften und -grenzen zu erhalten und ein angemessenes Vertrauen in die Automation bilden zu können, muss der Fahrer Erfahrungen im Umgang mit dem System sammeln [39, 83]. Studien zeigen, dass unvorhersehbare Automationsfehler zu einer Verringerung des Vertrauens führen [80]. Hierbei zeigt sich, dass nicht die Situationschwere, sondern die Vorhersagbarkeit der Handlungen des automatisierten Systems eine relevante Einflussgröße auf das Systemvertrauen darstellt [84, S. 129].

Ein weiterer Faktor, der das Systemvertrauen beeinflusst, stellt die Erwartung des Nutzers und das tatsächliche Systemverhalten dar. So sinkt das Vertrauen, wenn sich das System entgegen den Erwartungen des Nutzers verhält, selbst wenn das System an sich korrekt funktioniert [80]. Grundsätzlich sind Nutzer bereit, nicht vollkommen perfekt arbeitenden Systemen zu vertrauen und diese zu akzeptieren, so lange der Nutzer über möglich auftretende Probleme informiert ist und somit die Erwartungen mit den Systemeigenschaften übereinstimmen [84, S. 130]. BEGGIATO & KREMS [84, S. 130] schlussfolgern, dass Vorinformationen bezüglich des Verhaltens des hochautomatisierten Systems für einen sicheren Umgang mit dem System, die realistische Einschätzung potentiell gefährlicher Situationen und die Entwicklung des Vertrauens, wichtig sind.

2.3 Modelle zur Vertrauensentwicklung

Die Vorhersagbarkeit des Automationsverhaltens sowie die Übereinstimmung zwischen Erwartungen und den tatsächlichen Systemfähigkeiten stellen zwei Einflussfaktoren auf die Bildung eines angemessenen Vertrauens dar. Das dynamische Vertrauensmodell nach LEE & SEE [80] und das dreistufige Vertrauensmodell nach HOFF & BASHIR [85] beschreiben die Bildung des Vertrauens in automatisierte Systeme und stellen weitere relevante Einflussfaktoren dar.

2.3.1 Das dynamisches Vertrauensmodell nach Lee und See

Das Modell nach LEE & SEE [80, S. 67-68] (Abbildung 2.12) beschreibt die Vertrauensbildung in automatisierte Systeme als geschlossenen, dynamischen Prozess, der durch vier Elemente charakterisiert werden kann: Die MMS, der Operator mit seinen individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten, das automatisierte System sowie der zugrundeliegende Kontext. Das Vertrauen generiert eine Intention, sich auf ein automatisiertes System zu verlassen. Ob sich aus der Intention eine tatsächliche Nutzung formt, hängt von weiteren Faktoren ab, u.a. von individuellen und kulturellen Einflüssen.

LEE & SEE [80, S. 67] kommen zu zwei wesentlichen Schlussfolgerungen:

- Das Automationsvertrauen beeinflusst die Nutzung automatisierter Systeme, während die Interaktion mit einem automatisierten System erneut das Automationsvertrauen beeinflusst (Zirkelschluss)
- Die Bildung des Vertrauens in ein automatisiertes System entwickelt sich in Abhängigkeit von der MMS und den dargestellten Informationen. Die MMS beeinflusst die Bildung und Kalibrierung des Vertrauens in automatisierte Systeme

LEE & SEE [80, S. 74] kommen auch zu dem Schluss, dass das Vertrauens eines Nutzers in ein automatisiertes System maßgeblich von der Vermittlung der Fähigkeiten und Limitationen der Automation abhängen. Folglich sollten dem Fahrer jederzeit die Fähigkeit und Limitationen des Systems kommuniziert werden.

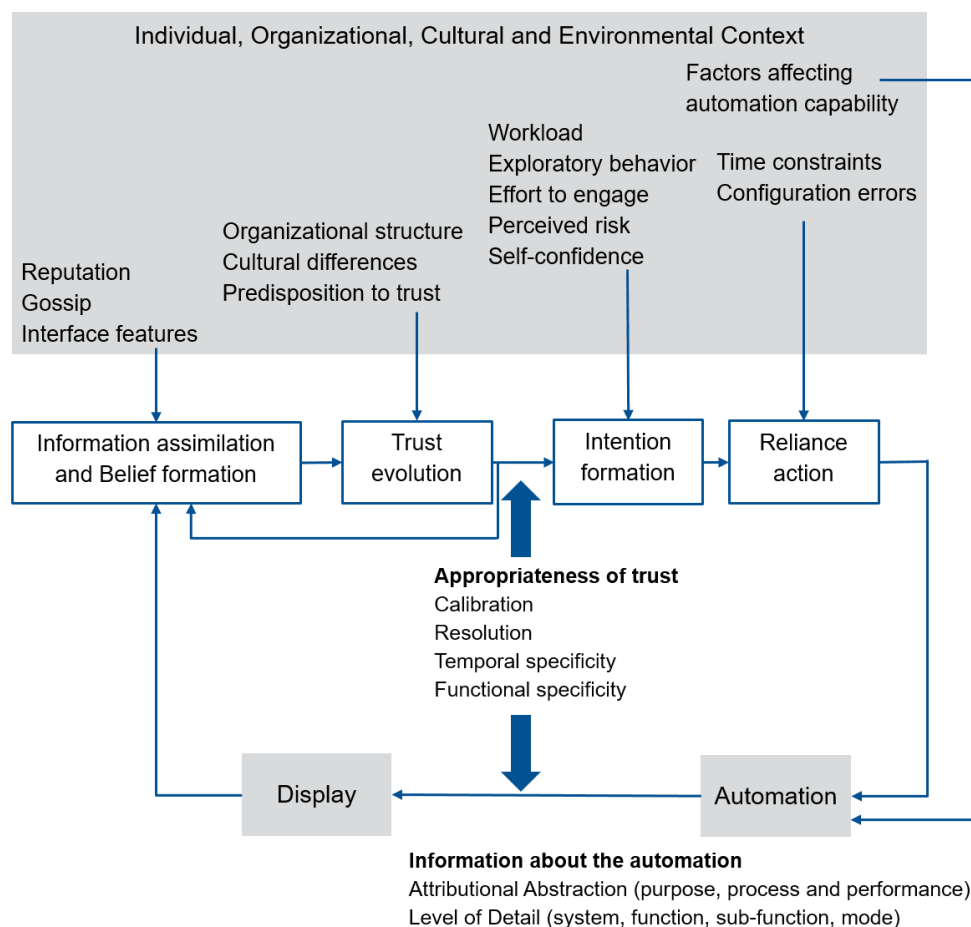


Abbildung 2.12: Das dynamische Vertrauensmodell nach LEE & SEE [70, S.55]

2.3.2 Das dreistufige Automations- Vertrauensmodell nach Hoff & Bashir

Aufbauend auf den Annahmen des Vertrauensmodells nach LEE & SEE [80] postulieren auch HOFF & BASHIR [85] ein dreistufiges, dynamisches Modell (Abbildung 2.13). Das Modell unterteilt Vertrauen in vier Teilgebiete und unterscheidet zwischen veranlagtem (dispositional trust), situationsbedingtem (situational trust) und gelerntem Vertrauen (initial und dynamic learned trust).

Das veranlagte Vertrauen stellt die generelle Tendenz dar, zu vertrauen, wird als relativ stabiles Persönlichkeitsmerkmal beschrieben und durch den kulturellen Hintergrund, Alter, Geschlecht sowie weiteren Persönlichkeitsmerkmale geprägt [85, S. 413]. Es wird die Annahme getroffen, dass Individuen mit einem hohen Level an veranlagtem Vertrauen dazu neigen, sich eher auf automatisierte Systeme zu verlassen. Diese Personengruppe neigt ebenfalls dazu, auf Systemfehler mit einem höheren Vertrauensverlust zu reagieren [85, S. 414].

Situationsbedingtes Vertrauen stellt eine kontextabhängige Komponente dar, die zur Vertrauensbildung beiträgt. Im Fall automatisierter Systeme, beeinflusst die vorherrschenden Verkehrssituationen das Vertrauen [85, S. 415].

Gelerntes Vertrauen entsteht durch vergangene Interaktionen mit dem automatisierten System und wird durch das bereits vorhandene Wissen, die gesammelten Erfahrungen des Nutzers und

durch die Leistung des Systems beeinflusst [85, S. 420]. HOFF & BASHIR [85] unterscheiden zwischen initial und dynamisch gelerntem Vertrauen. Das initiale Vertrauen beschreibt das Vertrauenslevel eines Nutzers, das bereits vor der ersten Interaktion mit dem System besteht. Im Gegensatz dazu stehen dynamisch gelernte Inhalte, die durch die stetige Interaktion mit dem System und durch die Leistungsfähigkeit des Systems entstehen. Das dynamisch gelernte Vertrauen ist nicht gefestigt, sondern aktualisiert sich mit steigender Erfahrung [85, S. 422].

Beide Vertrauensmodelle zeigen, dass die Vertrauensbildung einen komplexen Vorgang darstellt und durch eine Reihe von interpersonellen und externen Faktoren beeinflusst wird. So resultieren aus stetiger Interaktion des Nutzers mit dem automatisierten System und mit neuen Erfahrungen unterschiedliche Vertrauensniveaus.

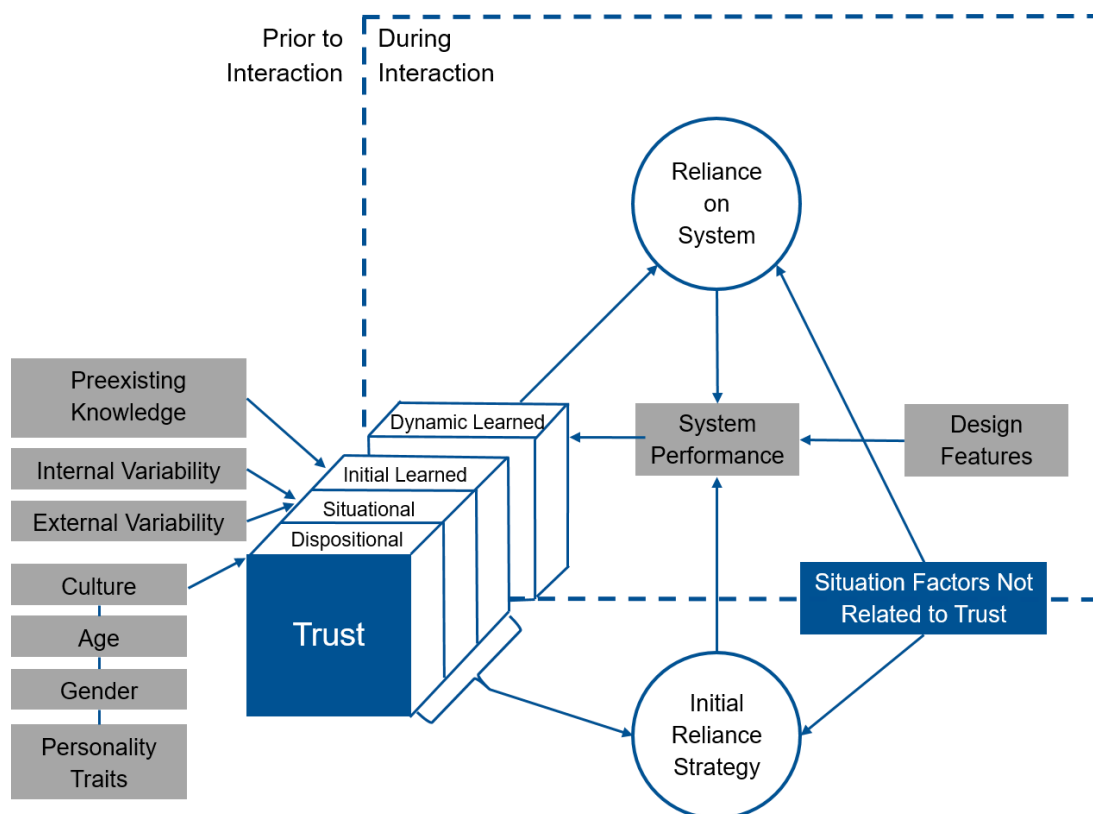


Abbildung 2.13: Dreistufiges Vertrauensmodell (eigene Darstellung in Anlehnung an HOFF & BASHIR 2015, S.427)

2.4 Automations-Akzeptanz-Modell

„Automation will not achieve its potential if not properly used“ [82, S. 40]. Eine wichtige Komponente, welche die Qualität des Zusammenwirkens zwischen Mensch und Maschine sowie die schlussendliche Systemnutzung bestimmt, ist die der Akzeptanz [86, S. 624].

Es existiert eine Reihe von Modellen, welche die Einflussfaktoren auf die Nutzung von Systemen abbilden. Auf Basis des Technologieakzeptanzmodells (TAM) entwickeln GHAZADEH ET AL. [82] das Automations-Akzeptanzmodell, das sich speziell auf die Akzeptanz im Umgang mit automatisierten Systemen bezieht (Abbildung 2.14).

Kernelemente des TAM stellen die empfundene Nützlichkeit (perceived usefulness) und die Benutzerfreundlichkeit (perceived ease of use) dar. Beide Faktoren beeinflussen die Einstellung zur Nutzung (attitude towards using) und die Nutzungsintention (behavioral intention to use), die über eine tatsächliche Systemnutzung (actual system use) entscheidet.

Um die Akzeptanz im Umgang mit automatisierten Systemen abzubilden, erweitern GHAZIZADEH ET AL. [82] das Modell um die Faktoren des Vertrauens und der Kompatibilität. Beide Faktoren wirken sich auf die subjektiv empfundene Nützlichkeit und Benutzerfreundlichkeit des Systems aus. Analog zu den Vertrauensmodellen (Kapitel 2.3) werden auch im Automations-Akzeptanzmodell Vertrauen und Kompatibilität durch externe Faktoren (bspw. vorherige Systemerfahrung) beeinflusst. Sowohl Vertrauen als auch Kompatibilität, Benutzungsfreundlichkeit, die Einstellung zur Nutzung und die Nutzungsintention werden durch Erfahrung und wiederholte Systemnutzung fortwährend beeinflusst und aktualisiert [82, S. 40-41]. Das Automations-Akzeptanzmodell stellt folglich ein dynamisches Modell zur Erklärung der Adaptation von automatisierten Systemen dar. Das Modell bildet sowohl die Kurz- als auch Langzeitnutzung ab.

Eine hohe Systemakzeptanz kann die Systemnutzung positiv beeinflussen [82]. In Bezug auf die Gestaltung einer angemessenen MMS für das HAF gilt es, Vertrauen und Kompatibilität als entscheidende Akzeptanzdeterminanten bei der Gestaltung zu berücksichtigen, um die positiven Effekte einer Fahrzeugautomatisierung hervorzurufen. Es existiert eine Reihe weiterer Einflussfaktoren, die sich auf diesen Adaptationsprozess auswirken und im Folgenden erläutert werden.

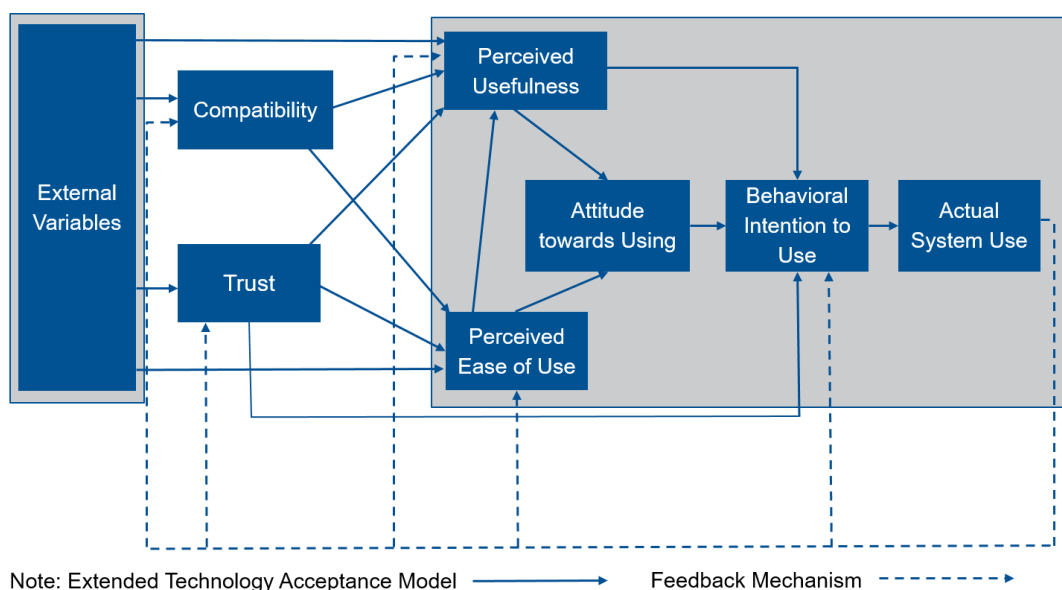


Abbildung 2.14: Automations-Akzeptanzmodell nach GHAZIZADEH [82], welches das Technologie-Akzeptanz-Modell nach DAVIS [87] (grau hinterlegt) erweitert

2.5 Einflussfaktoren auf den Lernprozess im Kontext des hochautomatisierten Fahrens

Eine Reihe von Faktoren beeinflusst den Lern- und Adaptationsprozess, der zu einer sicheren Nutzung und Bedienung hochautomatisierter Systeme führt. Insgesamt können drei interagierende Bereiche identifiziert werden: Der Fahrer, das System und die Umwelt (Abbildung 2.15).

Der Fahrer als Lernsubjekt mit seinen individuellen Fähigkeiten und Fertigkeiten spielt eine entscheidende Rolle beim Erlernen des hochautomatisierten Systems. Neben dem Alter, dem Geschlecht und bereits bestehender Fahrerfahrung spielt auch die Persönlichkeit eine entscheidende Rolle. So führt bspw. eine höhere Ausprägung der Risikoneigung zum Ausreizen bestehender Systemgrenzen, was zu einem schnelleren Erlernen der Systemlimitationen führt [88, S. 105]. Auch das Technologievertrauen beeinflusst den Lernprozess maßgeblich und stellt eine Voraussetzung für die Nutzung des hochautomatisierten Systems dar [82].

Die konkreten Erfahrungen des Fahrers (Erfahrungslernen) in der Umwelt lenken sowohl die Lern- und Adaptionsphase als auch die Integrationsphase des Lernprozesses [89, S. 180] und aktualisieren das MM des Fahrers fortwährend [36, S. 61]. Übertragen auf den Kontext des HAF beeinflussen folglich die erlebten Verkehrsszenarien den Lernprozess. Durch das Erleben verschiedener Verkehrsszenarien erkennt der Fahrer Zusammenhänge zwischen Verkehrssituationen sowie Systemreaktionen (induktives Schließen) und ist in der Lage, das Verhalten des hochautomatisierten Fahrzeugs für zukünftige Situationen vorherzusagen.

HEIT [90] nennt die Ähnlichkeit, Repräsentativität und Homogenität einer Situation als Faktoren, welche die Transferwahrscheinlichkeit von Einzelbeobachtungen erhöhen. Die Häufigkeit, Diversität und Salienz der Szenarien stellen weitere Einflussfaktoren dar [90, S. 570]. Die Auftretenshäufigkeit, der zeitliche Umfang und die zeitlichen Abstände (*spacing*) zwischen Verkehrssituationen beeinflussen den Lernprozess weiterhin [91, S. 370]. Eine Übersicht zu Übungsverteilungseffekten in der Lernforschung geben CARPENTER ET AL. [91] und DONOVAN & RADOSEVICH [92].

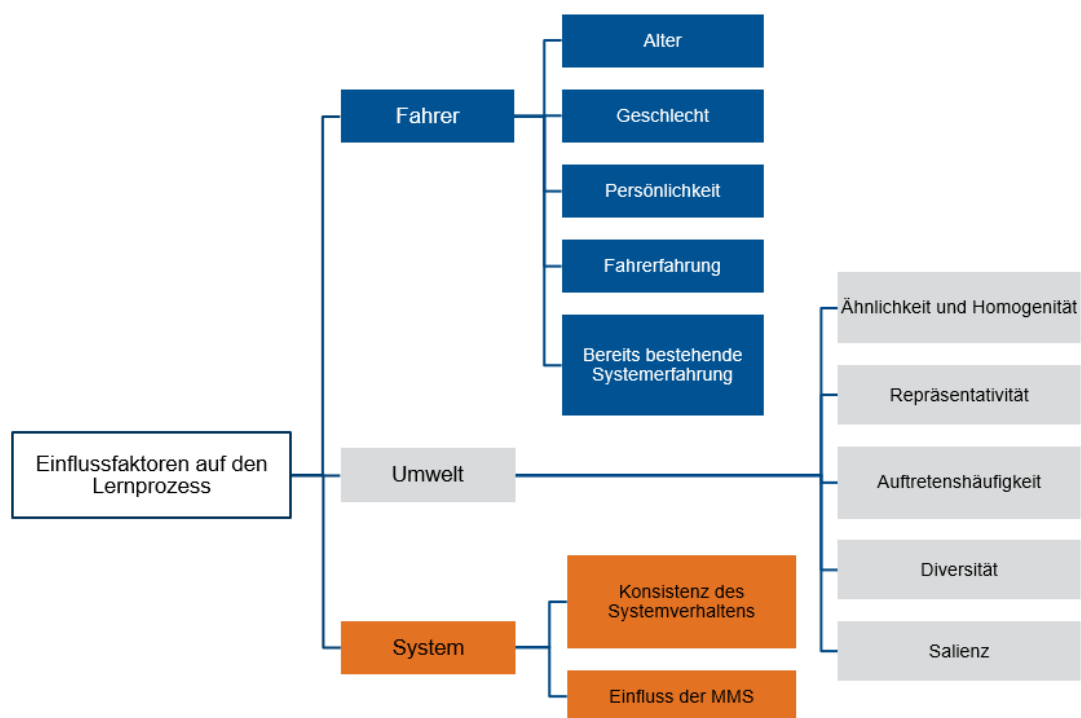


Abbildung 2.15: Darstellung möglicher Einflussfaktoren auf den Lernprozess im hochautomatisierten Fahren (eigene Darstellung)

Die Erkenntnisse der Lernforschung sind nur bedingt auf den Kontext des hochautomatisierten Fahrens übertragbar, weil die Auftretenshäufigkeit der Verkehrssituationen nicht vorhergesagt werden kann. Aus den obigen Erläuterungen kann aber geschlossen werden, dass Situationen,

die kurz und selten auftreten sowie eine geringe Saliienz besitzen, nur langsam in das MM des Fahrers aufgenommen werden.

Der Fahrer interagiert in einer bestimmten Umgebung mit einem System. Die Konsistenz des Systemverhaltens stellt hierbei einen weiteren Einflussfaktor auf den Lernprozess dar. Inkonsistenzen reduzieren die empfundene Zuverlässigkeit des Fahrers in das System und wirken sich nachteilig auf die Nutzungsintention aus. Die MMS kann zur Aufklärung wahrgenommener Inkonsistenzen des Systemverhaltens beitragen und den Lernprozess positiv beeinflussen. Die MMS sollte transparent, vorhersagbar und verständlich gestaltet sein, um den Aufbau korrekter MM zu fördern.

2.6 Langzeitstudien

Eine Reihe experimenteller Studien hat sich mit der Erfassung von Langzeiteffekten meist im Kontext einer Level 2 Automatisierung mit Adaptive Cruise Control (ACC) beschäftigt. Der Aufbau und die Ergebnisse der Studien werden im Folgenden skizziert. Anschließend folgt die Ableitung relevanter Merkmale von Langzeituntersuchungen, eine kritische Analyse und die Ableitung von Implikationen für die Erfassung von Langzeiteffekten im HAF.

2.6.1 Relevante Studien zur Untersuchung von Langzeiteffekten

WEINBERGER [93] untersucht im Rahmen eines 4-wöchigen Feldversuchs den Einfluss von ACC auf das Fahrerverhalten und die Entwicklung des subjektiv empfundenen Lernfortschritts bezüglich Übernahmesituationen und der Bedienung eines ACC Systems. Die Versuchsteilnehmer (N = 15, keine ACC-Erfahrung) legen in vier aufeinanderfolgenden Wochen jeweils durchschnittlich 1300 km zurück und nutzen das ACC bei Verfügbarkeit. Die Regelleistung sowie die Reaktion in Übernahmesituationen werden kontinuierlich aufgezeichnet. Ein Fragebogen erhebt den subjektiven Lernfortschritt jeweils im Anschluss einer Messfahrt (180 km, 2-3 h). Am Ende der Untersuchung wird ein qualitatives Interview durchgeführt. Die Probanden schätzen ein, wie lange es dauert, bis die Notwendigkeit einer Übernahme korrekt eingeschätzt wird. Die Ergebnisse zeigen, dass die Probanden nach zwei Wochen (2600 km Fahrleistung) mit der Bedienung und der ACC-Anzeige vertraut sind. Für die korrekte Einschätzung von Übernahmesituationen wird ebenfalls ein Zeitraum von zwei Wochen benötigt. WEINBERGER [93] zieht den Schluss, dass ca. zwei Wochen notwendig sind, um die Beurteilung von Übernahmesituationen mit einem ACC-System zu erlernen.

Kritisch anzumerken ist, dass die tatsächliche ACC-Nutzungsrate der Probanden nicht kontrolliert wird. So legen die Probanden pro Woche 1300 km zurück von denen lediglich 180 km auf die beobachtete Messfahrt fallen. Auch kann auf Basis der Ergebnisse nicht darauf geschlossen werden, dass eine zweiwöchige Lernphase, in der weniger km zurückgelegt werden, ausreichend ist, um denselben Lerneffekt zu erzielen. Auch eine ACC-Erfahrung von 2600 km, die in längerer Zeit (>2 Wochen) absolviert wird, kann den vorliegenden Effekt nicht unbedingt reproduzieren. Folglich kann keine Aussage getroffen werden, ob die Dauer oder die Häufigkeit der Interaktion den Lernprozess beeinflussen.

Auch SIMON [88] untersucht in einer Feldstudie Lernprozesse bei ACC-Nutzung. Insgesamt nehmen fünf Probanden ohne ACC-Erfahrung an der Feldstudie teil. Die Probanden fahren hierbei mit einem Testfahrzeug durchschnittlich 16 Tage (2800 km, davon 62 % ACC-Nutzung im Mittel).

Der Lernprozess wird objektiv über unnötige Eingriffe der Probanden ermittelt und kontinuierlich aufgezeichnet. Die subjektive Erfassung des Lernprozesses erfolgt retrospektiv anhand von Fragebögen. Die Probanden geben an, sich nach zwei Tagen mit der grundlegenden Systemfunktionalität und der Bedienung des ACC-Systems vertraut zu fühlen. Eine korrekte ACC-Nutzung wird subjektiv nach sechs bis sieben Tagen berichtet. Kritisch zu betrachten ist die geringe Anzahl an Probanden und die fehlende Standardisierung innerhalb der fünf Probanden, die sich in einer unterschiedlichen Anzahl an Fahrten und Fahrtenlängen äußern. Ein weiterer Kritikpunkt liegt in der retrospektiven Bewertung, die zu Erinnerungsverzerrung [94] und folglich zu inkorrekten Beurteilungen führen kann.

OJEDA & NATHAN [95] untersuchen im Rahmen einer Feldstudie die Auswirkungen längerfristiger ACC-Nutzung auf das MM, das Systemvertrauen, die Verhaltensadaptation und das Komfortempfinden. Die Probanden (N = 8, keine ACC-Erfahrung) absolvieren sechs Messfahrten auf einer vordefinierten Route innerhalb eines Zeitraums von vier Wochen [95, S. 48]. Fahrt 1 hat einen Umfang von 150 km, die folgenden Fahrten sind jeweils 70 km lang [95, S. 51]. Nach den Fahrten 1, 2, 4 und 5 wird das Systemverständnis in Form eines Fragebogens abgefragt [95, S. 51]. Die Sitzungen drei und sechs enthalten eine der Messfahrt nachgelagerte Lehrphase, in welcher der Proband einer dritten Person die Funktionsweise des ACC-Systems erklärt. Der Lernprozess soll somit qualitativ erfasst werden [95, S. 51-52]. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Probanden nach 360 km (4 Fahrten) sicher bezüglich der Funktionsweise des ACC sind, verstehen, wie das System zu nutzen ist und Systemreaktionen antizipieren können [95, S. 52, 95, S. 71]. Bezüglich des Systemvertrauens werden nach 360 km Fahrt zwei unterschiedliche Einstellungen unter den Probanden beobachtet. So vertraut die Hälfte des Kollektivs dem System, während die andere Hälfte misstrauisch bleibt. Der generelle Trend deutet jedoch auf ein wachsendes Systemvertrauen mit steigender Systemerfahrung hin [95, S. 54]. Das Komfortempfinden und die Bewertung der Bedienbarkeit stabilisieren sich nach 430 km (fünf Fahrten) [95, S. 57]. OJEDA & NATHAN kommen zu dem Schluss, dass der Großteil der Probanden nach 4 Wochen Systemnutzung (500 km, sechs Fahrten) in der Lage ist, das ACC hinsichtlich Funktionsweise und Systemgrenzen korrekt zu bewerten und dementsprechend korrekte Entscheidungen bezüglich der Interaktion zu treffen. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass nicht alle Probanden in der Lage sind, innerhalb von sechs Fahrten ein korrektes Systemverständnis zu erlangen [95, S. 71-73].

Die Erfassung des MM ausschließlich über subjektive Einschätzungen, ist nach DOYLE ET AL. [37, S. 5-9] kritisch zu bewerten (Kapitel 2.4.2). Auch die nachgelagerte Lehrphase ist kritisch zu betrachten, weil der Proband durch den Perspektivwechsel zur Reflexion angeregt wird. Der natürliche Lernprozess wird beeinflusst [37, S. 6]. BEGGIATO [39, S. 33] kritisiert weiterhin die geringe Stichprobenanzahl und die geringe Anzahl absolvierter Fahrten.

BEGGIATO [39] wendet zur Erfassung der Änderungen des MM für ACC einen zweistufigen Prozess, bestehend aus einer Fahrsimulator- und einer Feldstudie, an.

Fokus der Fahrsimulatorstudie liegt auf der Erfassung des MM eines ACC-Systems unter Beeinflussung des initialen MM. Insgesamt nehmen 51 Probanden (keine ACC Erfahrung) an der Simulatorstudie teil. Die Probanden werden in drei Gruppen aufgeteilt, die vor der ersten Interaktion mit dem ACC unterschiedliche initiale Systembeschreibungen erhalten [39, S. 46-47]. Die Gruppen weisen folglich unterschiedliche initiale MM des ACC-Systems auf. Die Systembeschreibungen unterschieden sich hinsichtlich Korrektheit und Vollständigkeit bezüglich der Funktionsweise und Limitationen des ACC.

Während die erste Gruppe (korrekt) eine korrekte und vollständige Beschreibung bezüglich der Funktionsweise und Limitationen des ACC liest, erhält die zweite Gruppe (unvollständig) eine Beschreibung mit korrekten und vollständigen Angaben zu Systemfunktionen und unvollständige Angaben bezüglich der Systemlimitationen. Gruppe drei (inkorrekt) erhält eine korrekte und vollständige Beschreibung der Limitationen bei gleichzeitiger inkorrekt Beschreibung der Systemfunktionen.

Die Versuchsteilnehmer absolvieren drei Fahrten mit einer Länge von 56 km (ca. 36 min) innerhalb eines sechs-wöchigen Untersuchungszeitraums [39, S. 44]. Die einzelnen Fahrten basieren auf identischen Strecken und beinhalten kritische Szenarien, in denen das ACC-System ohne Vorwarnung ausfällt. Das MM wird jeweils vor und nach der Messfahrt über einen Strukturwissensfragebogen erhoben. Dieser enthält Items bezüglich der Funktionen und Limitationen des ACC [39, S. 48].

Die Ergebnisse zeigen eine Annäherung der zweiten und dritten Gruppe an das korrekte und vollständige MM mit steigender Systemerfahrung. Hierbei zeigt sich, dass kritische und saliente Szenarien zu einer schnelleren Anpassung des MM führen. Weniger saliente Systemausfälle bewirken eine deutlich langsamere Annäherung an das korrekte MM. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass der Lernprozess zur Bildung eines korrekten MM innerhalb der drei Messfahrten nicht abgeschlossen werden kann. Methodische Limitationen liegen in den schwankenden Mess- und Interaktionsabständen. Durch den identischen Aufbau der Simulatorstrecken ohne Szenariovariabilität, kann kein natürlicher Lernprozess abgebildet werden.

In einem zweiten Schritt untersucht BEGGIATO [39] die Entwicklung des MM des ACC-Systems und die Veränderung des Lernprozesses in einem Feldversuch. 15 Probanden (keine ACC-Erfahrung) absolvieren innerhalb eines Zeitraumes von zwei Monaten, zehn Fahrten mit einer Länge von 37 km (Dauer MW: 39 Minuten). Fahrt 1 dient als Eingewöhnungsfahrt. Die Probanden erhalten vor Fahrt 2 eine Bedienungsanleitung des ACC-Systems, füllen den Fragebogen zur Erfassung des MM und zur Einschätzung des individuellen Lernfortschrittes (bspw. „Ich weiß, wie ich das ACC bedienen muss“) aus. Die Fragebögen werden auch nach Fahrt 2, 3, 5 und 10 abgefragt. Die Ergebnisse zeigen einen Anstieg des empfundenen Lernfortschrittes in den ersten beiden Fahrten. Nach vier Fahrten mit dem ACC-System (148 km) wird ein stabiles Niveau erreicht. Die Auswertung des MM zeigt eine Stabilisierung nach 4 Fahrten. Methodische Limitationen der Feldstudie liegen erneut in den unregelmäßigen Interaktionsabständen der Probanden. Die Erfassung von subjektiven Einschätzungen zur Quantifizierung von Lerneffekten ist erneut kritisch zu bewerten.

FORSTER ET AL. [96] untersuchen erstmals die Unterscheidbarkeit eines Level 2 (ACC) und Level 3 Systems (HAF) in einer Fahrsimulatorstudie. Die Probanden durchfahren fünf experimentelle Versuchsblöcke (Versuchsdauer insgesamt: 60 Minuten). Nach jedem Block folgt die Abfrage des MM und einer weiteren Selbsteinschätzung des Lernprozesses. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Großteil der Probanden in der Lage ist, die Unterschiede zwischen einem Level 2 und Level 3 System zu benennen. Die Korrektheit des MM steigt mit zunehmender Erfahrung. Die Daten zeigen weiterhin, dass nicht alle Probanden über ein vollständig korrektes MM verfügen, nach fünf Versuchsblöcken.

Tabelle 2.1: Langzeituntersuchungen zum Erlernen von ACC-Systemen

	WEINBERGER [93]	BEGGIATO [97]	BEGGIATO [97]	OJEDA & NATHAN [95]
Experiment	Feld	Simulation	Feld	Feld

AV	TTC, subj. Lernfortschritt	MM	MM, subj. Lernfortschritt	subj. Lernfortschritt
UV (Stufen)	Zeit (5)	Zeit (3) initiales MM (3)	Zeit (10) ²	Zeit (6)
Operationalisierung	Fragebogen, Interview	Fragebogen	Fragebogen	Fragebogen, Interview
Fahrten (ACC aktiv)	5 ¹	3	9	6
Strecke	180 km	56 km	37 km	(1) 150 km, (2-6) 70 km
Dauer pro Fahrt	2-3 h	36 min	39 min	keine Angaben
Messabstände	ca. 7 Tage	ca. 13 Tage	-	ca. 4 Tage
Stabilisierung des Lernprozesses	nach 2 Fahrten 2 Wochen 2500 km	-	nach 4 Fahrten 3-4 Wochen 148 km	nach 4 Fahrten 3 Wochen 370 km

¹ zwischen den Messfahrten interagieren die Versuchsteilnehmer ebenfalls mit dem ACC

² vor Fahrt 1 (1), nach Fahrt 1-9 (2-10)

Die Erkenntnisse aus der Literatur bzgl. des Erlernens von automatisierten Systemen beschränken sich auf das Erlernen von ACC (Tabelle 2.1). Die Erhebungszeiträume liegen dabei zwischen zwei und vier Wochen bzw. decken eine gefahrene Strecke zwischen 148 km und 2500 km ab. Eine Stabilisierung des MM tritt meist zwischen der vierten und fünften Fahrt ein.

2.6.2 Kritik und Implikationen

Aktuelle Langzeitstudien untersuchen Lern- und Adaptationsprozesse für die ACC-Nutzung im Pkw. Es existieren keine Studien, die Lern- und Gewöhnungsprozesse für hochautomatisierte Systeme im Lkw untersuchen. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse (ACC) auf das HAF ist beschränkt.

Aus der Klassifizierung der Automationsstufen (Kapitel 2.2.2) geht hervor, dass der Fahrer bei der Nutzung assistierender Systeme (Stufe 1, ACC) vollständig im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis bleibt. Ab Stufe 3 (hochautomatisiert) wird der Fahrer zeitweise vollständig aus dem Regelkreis ausgeschlossen. Zusätzlich dazu verfügt ein hochautomatisiertes System über ein größeres Funktionalitätsspektrum, was sich in einer erhöhten Systemkomplexität äußert. Der Fahrer muss einen höheren Lernaufwand betreiben, um das HAF System mit seinen Fähigkeiten und Grenzen zu erlernen. Auch die Art des Lernens verschiebt sich. Durch die permanente Einbindung und Überwachung des Fahrers in Stufe 1 bilden sich explizite Lerninhalte. Durch die Ausgrenzung des Fahrers im HAF verschiebt sich die Art des Lernens. Die Bildung eines korrekten MM über die zugrundeliegende Funktionsweise des Systems wird erschwert.

Die vorliegenden Studien weisen methodische Limitationen auf. Aus den Ergebnissen geht nicht hervor, ob die Interaktionshäufigkeit oder die Interaktionsdauer mit dem System für einen Lernprozess und eine hohe Trainingseffizienz verantwortlich sind. Weiterhin geben aktuelle Studien keinen Aufschluss darüber, wie viel Zeit nötig ist, um Langzeiteffekte erfassen zu können [20, S. 57]. Aufgrund unterschiedlicher Versuchsdesigns, ist ein Vergleich der gefundenen Effekte kaum möglich.

BEGGIATO [39, S. 17] nach [98] hält fest, dass es noch keine Evidenz bezüglich der Beziehung zwischen MM, Systemvertrauen, Anzeigekonzepten und Lernprozessen über einen längeren Zeitraum gibt. Nach OJEDA & NATHAN [95] beeinflusst die MMS den Lernprozess maßgeblich [95, S. 44] und kann diesen beschleunigen, aber auch hemmen. Folglich sollten die Auswirkungen einer MMS im HAF auf den Lernprozess untersucht werden.

2.7 Konzeptstudien für das hochautomatisierte Fahren

Eine Reihe erster Konzeptstudien und experimenteller Untersuchungen für Pkw und Lkw haben Ansätze für die Gestaltung geeigneter MMS für das HAF entwickelt. Diese werden im Folgenden skizziert, um Implikationen für die Gestaltung einer geeigneten MMS für das HAF im Lkw abzu-leiten.

2.7.1 HAVEit (2011)

Innerhalb des Projektes HAVEit (Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport) werden MMS Konzepte für das HAF im Pkw und Lkw erarbeitet [99, 100]. Alle Anzeigekonzepte umfassen drei Hauptinformationskomponenten (Abbildung 2.16):

- Automation Scale: Statusindikator
- Automation Monitor: Umgebungs-Manöveranzeige
- Message Field: Anzeige von textbasierten Systemnachrichten

Die MMS umfasst optische, akustische und haptische Komponenten. Die Darbietung optischer Elemente erfolgt über das Kombi- und ein zusätzliches Sekundärdisplay. Übernahmeaufforderungen erfolgen visuell und akustisch. Die Farbe Blau repräsentiert den aktivierten, hochautomatisierten Modus. Die haptische Rückmeldung erfolgt über das Gaspedal.

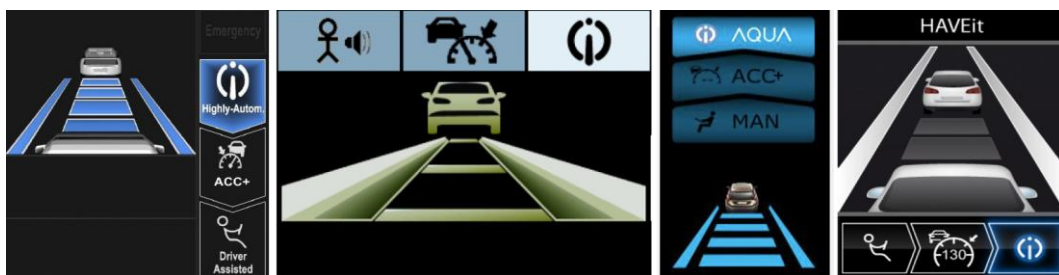


Abbildung 2.16: Entwickeltes HMI Konzept des Projektes HAVEit bestehend aus den drei Elementen Automation Scale, Automation Monitor und Message Field [100, S. 149]

2.7.2 Volvo Intellisafe (2015)

Volvo [101] greift in seinem Konzept auf das Kombidisplay (Abbildung 2.17) und ein Infotainmentdisplay in der Mittelkonsole als Anzeigemedium zurück. Im manuellen Modus sind die Rundinstrumente dargeboten. In der Mitte des Kombidisplays befindet sich eine Navigationskarte, welche die hochautomatisiert befahrbaren Streckenabschnitte hervorhebt (türkis). Nach Aktivierung des hochautomatisierten Systems über zwei Wippschalter am Lenkrad, verkleinern

sich die Rundinstrumente und zeigen neben der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit die verbleibende Zeit für das HAF. Die aktuellen Systemzustände werden visuell durch ein Icon dargestellt. Die Navigationskarte wird zum zentralen Element. Der Fahrer hat die Möglichkeit zwischen der Navigationskarte und einer Umgebungsansicht zu wählen. Hier wird die aktuelle Position des Ego-Fahrzeuges und durch die Automation geplante Manöver angezeigt. Die verbleibende Zeit, die hochautomatisiert gefahren werden kann, wird in Form eines Timers (zeitbasiert) dargestellt. Eine bevorstehende Übernahme wird 60 Sekunden vor dem Ende der HAF-Verfügbarkeit visuell dargestellt. Die Übernahmeaufforderung wird zusätzlich textbasiert im Kombidisplay angezeigt.

Volvo gibt keine Auskunft, inwieweit weitere Sinneskanäle (Akustik/Haptik) in das Anzeigekonzept eingebunden sind. Ist der Fahrer visuell durch eine Nebenaufgabe abgelenkt, kann es zu Problemen bei einer Übernahme kommen. Regelmäßige Kontrollblicke auf das Kombidisplay sind nötig, was zu einer Unterbrechung der Nebenaufgabenbearbeitung führt.



Abbildung 2.17: Volvo Intellisafe Anzeigekonzept [101]

2.7.3 Bosch Automated Driving (2015)

Auch Bosch [102, 103] verwendet als Anzeigemedien das Kombidisplay und ein zusätzliches Infotainmentdisplay, das in der Mittelkonsole verortet ist (Abbildung 2.18). Das Anzeigekonzept wird um einen LED-Streifen erweitert, der auf dem Lenkradkranz angebracht ist. Das Anzeigekonzept wird durch akustische Signaltöne und Sounds ergänzt. Das Kombidisplay zeigt eine Navigationskarte, die Streckenabschnitte mit HAF-Verfügbarkeit grün hervorhebt. Auf dem Infotainmentdisplay wird dem Fahrer eine Umgebungsansicht angezeigt. Die Anzeige des aktuellen Automationsmodus ist in das Kombidisplay und in das Infotainmentdisplay integriert. Die verbleibende verfügbare Zeit, die hochautomatisiert gefahren werden kann, wird auch in diesem Konzept mithilfe eines Timers visualisiert. Ist das hochautomatisierte System aktiviert (Doppelstastendruck am Lenkrad), wird die Bearbeitung von Nebenaufgaben freigeschaltet. Drei Minuten vor Ende der verfügbaren HAF, wechselt die Farbe des Statusindikators von Grün über Orange zu Rot.



Abbildung 2.18: Anzeigekonzept Bosch Automated Driving [102, 104, S. 25]

2.7.4 Audi Jack (2015)

Audi stellt mit der Konzeptstudie Jack ein ganzheitliches MMS-Konzept für das HAF vor [105]. Das Konzept (Abbildung 2.19) beinhaltet das Kombidisplay, eine LED-Leiste in der Scheibenwurzel und ein Zusatzdisplay in der Mittelkonsole (Central Status Indicator) für die Anzeige relevanter Informationen. Die Aktivierung des Systems erfolgt über zwei beleuchtete Tasten am Lenkrad.

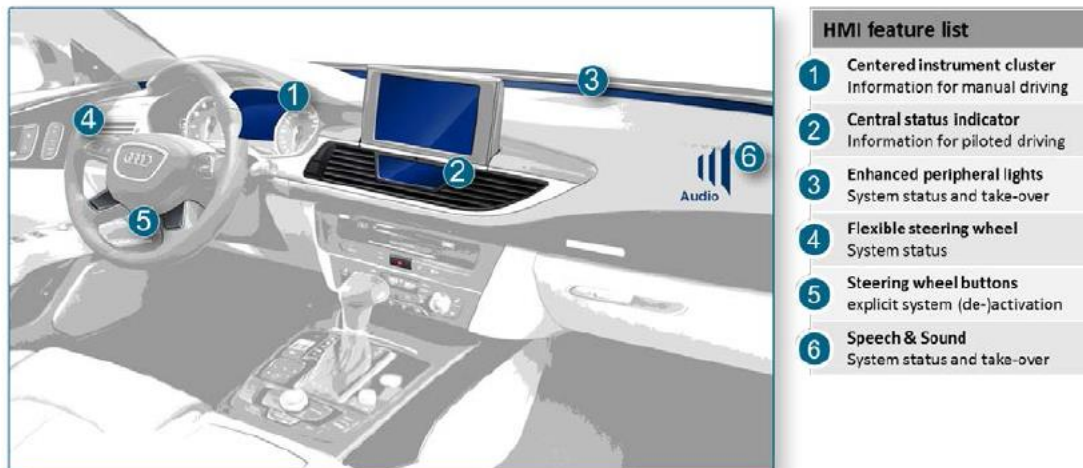


Abbildung 2.19: Anzeigekonzept Jack [105, S. 459]

Das Central Information Display (2) ist nur während HAF verfügbar und zeigt neben dem Systemstatus, die verbleibende Zeit bis zu einer Übernahme und Fahrmanöver an. Die LED-Leiste vermittelt den aktuellen Automationsstatus und eine Verfügbarkeit des hochautomatisierten Systems. Für das HAF wird die Farbe Türkis gewählt. Die visuellen Komponenten werden durch Sprachansagen und Sounds erweitert.

2.7.5 BMW iVision (2016)

BMW [106, 107] nutzt in der Konzeptstudie iVision (Abbildung 2.20) das Kombidisplay, ein Infotainmentdisplay, ein HUD und eine in das Lenkrad integrierte LED-Beleuchtung. Die Aktivierung des hochautomatisierten Systems erfolgt über einen Schieberegler am Lenkrad, das zusätzlich nach hinten verfährt. Eine bevorstehende Übernahme wird durch einen Farbwechsel der LED-Beleuchtung angezeigt. Das Lenkrad fährt im Übernahmefall in seine ursprüngliche Position zurück. Das Kombi- und Infotainmentdisplay zeigen weitere Übernahmeaufforderungen an.

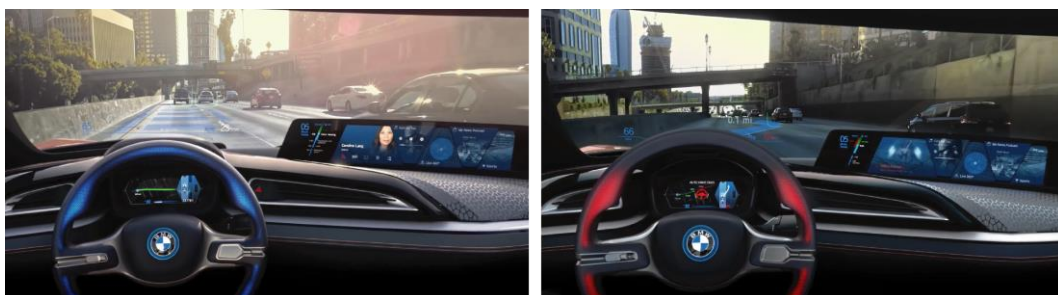


Abbildung 2.20: Konzeptstudie BMW iVision [104, S. 26, 106]

2.7.6 Mercedes Benz Future Truck 2025 (2014)

Daimler stellt mit dem Mercedes-Benz Future Truck 2025 [108] ein Konzept für eine MMS für das HAF im Lkw vor (Abbildung 2.21). Als visuelle Anzeigeelemente kommen das Kombiinstrument und ein Infotainmentdisplay in Form eines Tablets zum Einsatz. Wird das HAF durch eine Taste am Lenkrad aktiviert, leuchtet eine blaue Lichtleiste über dem Armaturenräger. Während aktivierter HAF kann der Fahrer mit dem Tablet interagieren. Mithilfe von Push-Nachrichten informiert das Tablet den Fahrer über geplante Fahrmanöver, aufkommende Gefahren und Übernahmeaufforderungen. Dem Fahrzeugführer wird hierfür ein Timer eingeblendet, der die Zeit bis zur Übernahme herunterzählt (20 Sekunden).



Abbildung 2.21: Konzeptstudie Mercedes Benz Future Truck 2025 [104, S. 27, 108]

2.7.7 Scania – Active Frame (2014)

Die zentralen Elemente des Active Frame Konzepts (Abbildung 2.22) bilden das Kombidisplay und ein mobiles Endgerät [109]. Das Kombidisplay besteht während aktivierter HAF aus einer Statusanzeige, einer Umfeldanzeige und einer Prozessanzeige. Der Active Frame stellt eine mobile Applikation dar und präsentiert Fahrinformationen wie Geschwindigkeit, Abstand zum Vorderfahrzeug, Systemhandlungen und Umgebungsverkehr.



Abbildung 2.22: Anzeigekonzept Scania - Active Frame. Darstellung Kombidisplay (links) und Tablet (rechts) [104, S. 26, 109]

2.8 Konzeptorientierte Literaturanalyse

Eine Reihe experimenteller Studien hat sich mit der idealen Darstellungsart und Verortung von Informationseinheiten für das HAF im Pkw beschäftigt. Durch den Ausschluss des Fahrers aus

dem Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis während hochautomatisierter Fahrphasen, muss der Fahrer:“ [...] umfassend und peripher gut wahrnehmbar über Zustandswechsel informiert [...] werden“ [110, S. 666].

PETERMANN- STOCK ET AL. [111, S. 347] definieren die Transparenz des Rückholkonzeptes als wesentlichen Faktor und empfehlen die Einbindung neuer Modalitäten, die über den zentralen Fahreraufmerksamkeitsbereich hinaus gut wahrnehmbar sind, um den Fahrer zu einer sicheren und effizienten Übernahme zu befähigen [110, S. 666]. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Studien skizziert. Für detaillierte Informationen zur Methodik wird auf die jeweiligen Quellen verwiesen.

2.8.1 Haptisches Feedback

Der Fahrer soll bei einer bevorstehenden Übernahme in der Lage sein, die Fahrzeugführung sicher und effizient übernehmen zu können. MAIER ET AL. [112, S. 11] identifizieren haptisches Feedback grundsätzlich als wirksame Modalität. Haptische und kinästhetische Reize eignen sich besonders, um die Aufmerksamkeit des Fahrers zu erregen und zu lenken [111, S. 365, 113, S. 51]. PETERMEIJER ET AL. [114, S. 904] bestätigen diese Erkenntnisse und zeigen, dass haptische Reize im Vergleich zu reinem visuellen Feedback zu einer schnelleren Erstreaktion führen. Die Bearbeitung von Nebenaufgaben beeinflusst die Reaktion auf eine haptische Rückmeldung nicht [115, S. 1509]. Haptisches Feedback eignet sich daher für die Gestaltung einer geeigneten Übernahmestrategie für das HAF.

2.8.2 Akustische Reize

Aufgrund der hohen Salienz eignen sich akustische Reize für die Erregung der Aufmerksamkeit des Fahrers und wirken sich positiv auf die Reaktionszeit des Fahrers aus [110, S. 674-675, 111, 113, S. 53, 115]. Akustische Reize sind folglich für den Kontext des HAF und der Ankündigung von Übernahmesituationen geeignet. Akustische Signale können für die Vermittlung von Systemverfügbarkeiten, Warnungen oder Statusänderungen genutzt werden.

2.8.3 Head-Up- Display und kontaktanaloges Head-Up-Display

Durch die Verwendung einer kontaktanalogen Informationsdarstellung ist der Fahrer in der Lage, wichtige dargebotene Informationen ohne weitere Kopfbewegungen oder Blickabwendungen sofort wahrnehmen zu können [116, S. 39]. Die Nähe der Information zum Verkehrsgeschehen sorgt für eine geringere Ablenkung [117, S. 113]. MILICIC [117] bestätigt die Erkenntnisse mithilfe einer Probandenstudie. Die Probanden geben an, durch den Einsatz des HUD weniger belastet und abgelenkt zu sein [117, S. 139]. Nachteile eines HUD liegen in der Überlagerung des Verkehrsgeschehens [117, S. 45]. Weiterhin kann es zu einer unbewussten Aufmerksamkeitsverschiebung auf die Inhalte des HUD (Cognitive Capture) kommen.

Eine kontaktanaloge Informationsdarstellung ist umweltfest und ergänzt die Realität virtuell [118, S. 34]. Schlecht sichtbare Informationen können so verdeutlicht werden. Ein Reihe von Studien [117, 119–123] bestätigen die Vorteile einer kontaktanalogen Informationsrepräsentation. Die Probanden bewerten die Anzeige weniger ablenkend und störend [120, S. 81]. Die Überlagerung der Information mit der Realität verringert den Transferaufwand und ermöglicht freigewordene Ressourcen anderweitig zu nutzen [119, S. 41]. Die Vorteile des kontaktanalogen

HUD treffen jedoch nicht für alle Informationsinhalte zu. So gibt es Informationen, die bevorzugt fahrzeugfest dargeboten werden sollen, während andere durch die Darstellung im kontaktanalogen HUD profitieren [119, S. 39]. LORENZ ET AL. [123, S. 1685] empfehlen die Nutzung kontaktanaloger Anzeigen in Übernahmesituationen, um die Übernahmereaktion zu verbessern.

2.8.4 Periphere Lichtreize

Studien bestätigen den Vorteil einer LED-Leiste für die Darstellung von Information während automatisierter Fahrt [63, 110, 124–129]. Bei peripheren Lichtreizen handelt es sich um eine diffuse Modalität, die keine direkte Handlungsempfehlung gibt, aber die Aufmerksamkeit steuert [110, S. 668].

Warnungen und Informationen, die durch Licht in Form von LED-Leisten vermittelt werden, können peripher wahrgenommen werden [126, S. 65]. LED-Leisten eignen sich somit für die Darstellung von Übernahmewarnungen während des HAF, um schnelle Orientierungsreaktionen auszulösen [111, S. 365]. LED-Leisten eignen sich weiterhin, um den aktuellen Systemstatus zu vermitteln [110, S. 674]. Der Einsatz peripherer Lichtreize soll Mode Confusion verhindern [110, S. 674]. Für die Darstellung einer Verfügbarkeit der Automation hat sich der Farbcode Türkis als hilfreich erwiesen, durch eine hohe Farbsättigung, eine ausreichende Helligkeit und einen hohen Kontrast zur Peripherie [110, S. 667].

2.8.5 Abgestuftes Rückholkonzept

BLANCO ET AL. [127] empfehlen die Übermittlung einer Übernahmeaufforderung in Form eines abgestuften Rückholkonzeptes. Es kann somit eine situationsspezifische Anpassung der Dringlichkeit der Übernahme vorgenommen werden. Auch LERMER [113] empfiehlt eine Abstufung der Warnstrategie nach Dringlichkeit und Schadensausmaß und weisen in ihrer Klassifikation verschiedenen Zeitbudgets unterschiedliche Warnmodalitäten zu.

PETERMANN-STOCK ET AL. [111, S. 347] empfehlen ein zweistufiges Rückholkonzept und merken an, dass die Rückholstrategie von der Eingebundenheit des Fahrers, der Komplexität der Fahrsituation und der Qualität der Rückmeldung abhängt. In einem ersten Schritt wird durch haptische und akustische Reize die Aufmerksamkeit des Fahrers erweckt. In einem zweiten Schritt erfolgt die Darstellung optischer Reize, um konkrete Informationen und Handlungsanweisungen zu vermitteln. FORSTER ET AL. [130, S. 255] entwickeln ein dreistufiges Rückholkonzept (1: Announcement, 2: Takeover request cautionary, 3: Takeover request imminent). Der Fahrer erhält in den verschiedenen Übernahmestufen Informationen zu der bevorstehenden Systemgrenze und wird somit auf die Übernahme vorbereitet. HESSE ET AL. [131, S. 287] postulieren eine vierstufige Übernahmestrategie, um den Fahrer auf eine Übernahme vorzubereiten. Diese besteht aus einer Vorbereitungsphase, einer unmittelbaren Warnphase, einer Interventionsphase und einer nachfolgenden Erklärungsphase.

2.8.6 Verbale Instruktionen zur Handlungsanweisung

Haptische und akustische Reize eignen sich für die Erregung der Aufmerksamkeit bzw. der Auslösung einer Orientierungsreaktion des Fahrers [113, S. 51]. Für die Vermittlung konkreter Handlungsanweisungen eignet sich die verbale Darstellung in Form von verbalen Instruktionen

oder textuellen Meldungen [113, S. 47]. Diese befähigen den Fahrer in einer Übernahmesituation korrekt zu reagieren.

2.8.7 Multimodale Warnungen

Die Vermittlung von Informationen durch unterschiedliche Modalitäten (optisch, akustisch, haptisch) führt zu einer besseren Performanz des Fahrers, im Vergleich zu unimodalen Warnungen [105, S. 458, 110, S. 674, 111, S. 365, 112, S. 11, 113, S. 51, 114, 132, S. 2104, 133, S. 1113]. Insbesondere bei der Gestaltung einer Warnstrategie für Übernahmesituationen sollte eine multimodale Strategie eingesetzt werden [68, S. 256, 132, 134, 135]. Eine unimodale, rein optische Informationsdarstellung ist aufgrund der Gefahr des Übersehens ungeeignet [113, S. 47, 114, S. 904, 136].

NAUJOKS ET AL. [68, S. 256, 137] und WICKENS ET AL. [138] empfehlen für das HAF eine Aufteilung der Warnstrategie nach Dringlichkeit. Weniger dringliche, unkritische Statusinformationen sollten unimodal dargestellt werden. Bei dringlichen Informationen, die eine schnelle Handlung erfordern, sollte eine multimodale Warnstrategie eingesetzt werden.

Gefahren einer multimodalen Warnstrategie liegen in einer Verärgerung des Fahrers aufgrund übermäßiger Informationsrepräsentation [114, 127, S. 11]. Der Fahrer könnte überfordert werden oder sich belästigt fühlen. VAN DEN BEUKEL & VAN DEN VOORT [124] und PETERMEIJER ET AL. [114, S. 907] bestätigen diesen Effekt besonders für haptische Warnungen. Höhere akustische Frequenzen und höhere Wellenlängen bei optischen Reizen erhöhen zwar die Empfundene Dringlichkeit der Warnung, resultieren jedoch in Verärgerung seitens des Fahrers [114, S. 904]. Beim Einsatz einer multimodalen Warnstrategie sollte darauf geachtet werden, die Einzelreize und Reizkombinationen an die Dringlichkeit der Situation anzupassen, um Verärgerung seitens des Fahrers zu vermeiden.

2.8.8 Darstellung von Informationen auf einem zusätzlichen Display

Es ist davon auszugehen, dass sich Fahrer während Phasen des HAF anderweitigen FFT widmen. Da der Fahrer durch die Nutzung von zusätzlichen Endgeräten abgelenkt sein könnte, sollten relevante Informationen auch auf dem Endgerät präsentiert werden. Diese Darstellung stellt eine Möglichkeit dar, dem Fahrer das Abrufen von Informationen während dem HAF zu erleichtern [68, S. 257, 139]. KLEEN ET AL. [109, S. 14], POLITIS ET AL. [125, S. 13] und MELCHER ET AL. [140, S. 2873] bestätigen die Erkenntnisse und empfehlen die Darstellung von Übernahmewarnungen auf einem zusätzlichen Endgerät.

2.8.9 Darstellung kontinuierlicher Systeminformationen

Neben der Entwicklung und Evaluation geeigneter Warnstrategien und Rückholkonzepte für unmittelbar bevorstehende Übernahmen, untersuchen aktuelle Studien die Wirkung einer kontinuierlichen Darstellung von Informationen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion während automatisierter Fahrt [109, 141–145].

Das Ziel der kontinuierlichen Vermittlung von Informationen liegt in der Förderung des Situationsbewusstseins, einer Steigerung der Systemakzeptanz und des -vertrauens. Unnötige Systemeingriffe, Übersteuern und Misstrauen gegenüber dem hochautomatisierten System sollen verhindert werden [62, 130, 146]. Besonders in unkritisch Verkehrssituationen, die durch das

hochautomatisierte System bewältigt werden können (bspw. Überholen), könnte sich eine kontinuierliche Rückmeldung der MMS bezüglich aktueller und geplanter Manöver positiv auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion (bzgl. Vertrauen [80] und Akzeptanz) auswirken.

KLEEN ET AL. [109, S. 14] bestätigen die positiven Effekte kontinuierlicher Status- und Umgebungsinformationen auf das Situationsbewusstsein. HELLDIN ET AL. [142] finden heraus, dass die Darstellung kontinuierlicher Informationen die Übernahmereaktionszeit verkürzt.

Auch KYRIAKIDIS ET AL. [147] kommen zu dem Schluss, dass der Fahrer während hochautomatisierter Fahrphasen permanent über den Status und die Systemfähigkeiten des automatisierten Systems informiert werden sollte, um eine positive Fahrer-Fahrzeug-Interaktion zu unterstützen.

3 Aufstellung der Forschungsfragen

Im Folgenden werden die Kernerkenntnisse aus dem Stand der Wissenschaft zusammengefasst und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt. Daraufhin erfolgen die Themeneingrenzung und die Ableitung der Fragestellungen.

3.1 Fazit zum Stand der Wissenschaft

Der Einsatz eines hochautomatisierten Systems im Lkw ist mit einer Reihe von Vorteilen verknüpft. So könnte die Sicherheit des Gesamtsystems gesteigert, die Belastungen des Fahrers reduziert und somit das Image des Berufsbildes positiv beeinflusst werden (Kapitel 1). Die Einführung eines hochautomatisierten Systems verändert die Rolle des Fahrers und geht auch mit einer Reihe negativer Automationseffekte einher, welche die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems Fahrer-Fahrzeug negativ beeinflussen (Kapitel 2.1). Der durch die Automation hervorgerufene Wechsel von aktiver zu passiver Informationsverarbeitung, fehlendes Feedback bezüglich des hochautomatisierten Systems oder die Annahme eines falschen Rollenverständnisses fördern ein fehlerhaftes Situationsbewusstsein [37, S. 74].

Um eine sichere und effiziente Interaktion zwischen Lkw-Fahrer und hochautomatisiertem System zu gewährleisten, besteht die Notwendigkeit einer geeigneten MMS. Das Ziel der MMS liegt in der eindeutigen Vermittlung der Verantwortungsverschiebung zwischen Fahrer und Automation im HAF. Dem Fahrer sollte das Systemverhalten durch bewusste Informationen erläutert werden. Die Inhalte sollten auf bereits bestehenden internen Gedächtnisinhalten aufbauen bzw. anknüpfen, um einem Nichtgebrauch oder Missbrauch des hochautomatisierten Systems entgegenzuwirken.

Die Analyse bestehende Konzeptstudien (Kapitel 2.7) geben einen ersten Einblick, wie die Gestaltung einer MMS für das HAF erfolgen kann (Tabelle 3.1). Kritisch anzumerken ist, dass es sich hierbei um konzeptuelle Entwürfe handelt. Es ist unklar, inwieweit die Entwicklung einem nutzerzentrierten, iterativen Entwicklungsprozess folgt. Auch geben die Konzepte keinerlei Auskunft darüber, wie die Verortung und Darstellungsform der Informationseinheiten erfolgt.

Die literaturbasierte Analyse experimenteller Untersuchungen (Kapitel 2.8) für das HAF schließt diese Lücke und zeigt die Vorteile einer multimodalen Warnstrategie auf. Die MMS Strategie sollte akustische und optische Elemente beinhalten. Diese können sowohl in Form von Sprachansagen als auch Warntönen erfolgen. Die Verwendung einer LED-Leiste für die Übermittlung von Informationen aber auch die Darstellung kontaktanaloger Elemente beeinflusst die Mensch-Maschine-Interaktion positiv. Auch die Kommunikation von Handlungsempfehlungen wirkt sich positiv auf die Mensch-Maschine-Interaktion aus. Die Verwendung einer haptischen Informationsrepräsentation muss für den zugrundeliegenden Kontext geprüft werden. Die Einbindung

3 Aufstellung der Forschungsfragen

weiterer Endgeräte in die MMS-Strategie hat sich als sinnvoll erwiesen. Ein abgestuftes Rückholkonzept, im Fall einer bevorstehenden Übernahme, kann die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion positiv beeinflussen. Eine Verärgerung des Fahrers, ausgelöst durch eine unangepasste MMS Warnstrategie, sollte vermieden werden.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus der Pkw Forschung auf den Lkw ist eingeschränkt [148, S. 9]. Dies kann unter anderem auf die unterschiedlich zugrundeliegende Nutzergruppe und Dimensionierung des Fahrzeugs zurückgeführt werden. Folglich gilt es, die gewonnenen Literaturkenntnisse iterativ zu evaluieren und für die Gestaltung einer geeigneten MMS für das HAF im Lkw zur prüfen.

Tabelle 3.1: Vergleichende Darstellung der Konzeptstudien (Kapitel 2.7), (✓ = im Konzept enthalten, - = nicht enthalten/ keine Auskunft)

Konzept	Have IT [100]	Volvo Intellisafe [101]	Bosch [103]	BMW i [106, 107]	Daimler Future Truck [108]	Scania Active Frame [109]	Entwickelte MMS
Komponenten							
HUD	-	-	-	✓	-	-	✓
LED	-	-	✓	✓	-	-	✓
Kombidisplay	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Infotainmentdisplay	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sound	✓	-	✓	-	✓	-	✓
Haptik	✓	-	-	✓	✓	-	-
Rückholkonzept							
Stufen	3	3	3	3	4	-	4
Farbschema	Blau, Orange, Türkis	Türkis, Orange, Weiß	Grün, Orange, Rot	Blau, Rot, Weiß	Blau, Orange, Rot, Weiß	-	Türkis, Orange, Rot
Informationseinheiten							
Umgebungsverkehr	✓	✓	✓	-	-	✓	✓
Manöveranzeige	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Navigationskarte	-	✓	✓	✓	✓	-	✓
Systemstatus	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Weitere Determinanten, welche die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion entscheidend beeinflussen, sind das MM (Kapitel 2.1.2) und das Vertrauen (Kapitel 2.2.3) des Fahrers in das hochautomatisierte System. MM helfen, das Systemverständnis des Nutzers zu beschreiben und zu analysieren [41, S. 54]. Studien zeigen, dass die Konstrukte des Situationsbewusstseins und des MM dynamisch sind und sich mit zunehmender Systemerfahrung an neue Gegebenheiten anpassen [36, 39, 84, 149]. Ein korrektes MM unterstützt die Bildung eines angemessenen Vertrauens. Fehler im MM können mithilfe einer geeigneten MMS korrigiert werden.

Auch die Akzeptanz, die der Fahrer dem hochautomatisierten System entgegenbringt, spielt eine entscheidende Rolle (Kapitel 2.4). Eine hohe Akzeptanz führt zur schlussendlichen Nutzung des

Systems. Nur durch die tatsächliche Nutzung des Systems, kann das Potenzial eines hochautomatisierten Systems ausgeschöpft werden.

Durch Lern- und Adaptationsvorgänge ist der Mensch in der Lage, den Umgang mit einem hochautomatisierten System zu erlernen und sein Nutzungsverhalten anzupassen (Kapitel 2.1.4). Auftretende Lern- und Gewöhnungseffekte mit zunehmender Systemerfahrung sind bisher nur wenig untersucht [17, 19, 82]. Längsschnittstudien erfordern einen hohen forschungsökonomischen und logistischen Aufwand [150, S. 214, 151]. Trotz des hohen Erkenntniswerts von Längsschnittstudien werden diese daher nur selten realisiert [150, S. 212].

Aktuell ist unklar, wie Lern- und Adaptationsprozesse in der Interaktion mit hochautomatisierten Systemen verlaufen. Auch gibt es keine Evidenz bezüglich der Beziehung zwischen Systemvertrauen, MM und Lernprozessen über einen längeren Zeitraum [20, S. 33]. Es gilt, diese Prozesse in einer Längsschnittstudie zu untersuchen.

3.2 Themeneingrenzung und Ableitung der Fragestellung

HOFAUER [144, S. 33] stellt ein Arbeitsmodell zur Fahrer-FAS-Fahrzeug-Interaktion auf, bestehend aus den vier Komponenten Fahrer, Fahrzeug, Umwelt und FAS. Letztere untergliedert sich in drei hierarchische Abstraktionsebenen: Die Datenebene, die Funktionsebene und die HMI-Ebene. Die Datenebene enthält alle essentiellen Informationen aus der Umwelt durch fahrzeuginterne und -externe Datenquellen. Der Fahrer interagiert über Bedienelemente und über das HMI mit dem FAS. Die Nutzereingaben werden an die darunterliegende Funktionsebene weitergeleitet. Die Berechnung einer optimalen Fahrstrategie, die Aktionsauswahl und -ausführung wird durch die Funktionsebene gesteuert, auf Basis der Informationen durch die Datenebene und der Fahrereingaben.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit liegt in der iterativen, nutzerzentrierten Entwicklung einer geeigneten MMS für das HAF im Lkw (HMI-Ebene). Für die Bearbeitung der Fragestellung und der Durchführung der nutzerzentrierten Evaluationen auf HMI-Ebene wird eine Implementierung der Funktions- und Datenebene benötigt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird diese lediglich prototypisch im Fahrsimulator umgesetzt. Die tatsächliche Implementierung der Funktions- und Datenebene ist nicht Teil der vorliegenden Arbeit.

Die entwickelte MMS soll die Bildung eines korrekten MM bezüglich der Systemfähigkeiten und -limitationen fördern, um den Fahrer zur Bildung eines angemessenen Vertrauens in das System zu befähigen. Es gilt weiterhin zu untersuchen, inwieweit sich ein angemessenes Vertrauen auf die Nutzung des hochautomatisierten Systems durch den Lkw-Fahrer auswirkt. Die in Kapitel 2.2.3 eingeführten psychologischen Erkenntnisse zur Fahrer-Fahrzeug-Interaktion werden explizit in die Entwicklung einbezogen.

Basierend auf dem Stand der Wissenschaft und der thematischen Eingrenzung werden folgende zu untersuchende Forschungsfragen aufgestellt:

- **F1: Gestaltung und Evaluation der MMS für das HAF im Lkw**
Wie könnte eine geeignete MMS für das HAF im Lkw gestaltet sein?

In einem zweiten Schritt werden Langzeiteffekte erfasst, die mit zunehmender Systemerfahrung entstehen. Der Fokus liegt hierbei auf der Erfassung der Entwicklung des MM, des Vertrauens, der Akzeptanz und der Nutzungsintention.

- **F2: Veränderung der Mensch-Maschine-Interaktion mit zunehmender Systemerfahrung**

Wie wirkt sich eine zunehmende Systemerfahrung auf die Mensch-Maschine-Interaktion bezüglich der Entwicklung des MM, des Vertrauens, der Akzeptanz und der Nutzungsintention aus?

Das folgende Kapitel zeigt das Vorgehen und die gewählte Methodik zur Beantwortung der aufgestellten Fragestellungen F1 und F2 auf.

4 Vorgehen

Die folgenden Kapitel stellen das gewählte Vorgehen und die Methodik vor, mit der die aufgestellten Forschungsfragen untersucht werden. Die Makromethodik strukturiert den iterativen, nutzerzentrierten Entwicklungsprozess. Die Mikromethodik erläutert die gewählten Methoden zur Bearbeitung der einzelnen Phasen der Makromethodik.

4.1 Methodik

„Durch die Anwendung geeigneter menschenzentrierter Verfahren kann das Risiko verringert werden, dass das Produkt die Anforderungen der Stakeholder nicht erfüllt oder von seinen Benutzern zurückgewiesen wird“ [152, S. 8]. Weiterhin erhöht die Anwendung „die Effektivität und Effizienz, die Zugänglichkeit und Nachhaltigkeit und verbessert [...] die Zufriedenheit der Benutzer [152, S. 4].

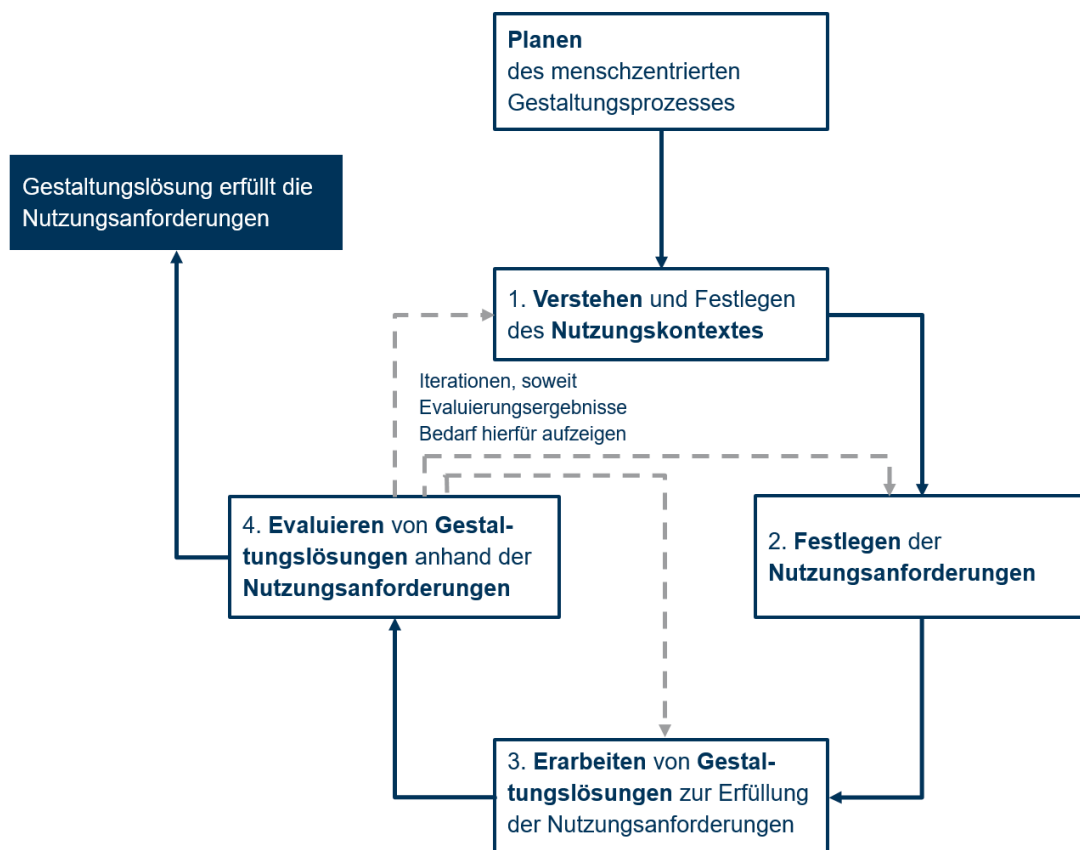


Abbildung 4.1: Menschzentrierter Gestaltungsprozess nach DIN EN ISO 9241-210 ([104] nach [152, S. 15])

Zur Bearbeitung der in Kapitel 3 aufgestellten Forschungsfragen orientiert sich die gewählte Makromethodik an den Phasen der DIN EN ISO 9241-210 [153], die den Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher, interaktiver Systeme beschreibt. Es handelt sich um einen iterativen Entwicklungsprozess, der sich aus vier Phasen zusammensetzt (Abbildung 4.1).

In einem ersten Schritt erfolgt die Analyse des Nutzungskontextes mit dem Ziel, den zugrundeliegenden Kontext zu verstehen und zu beschreiben. In einem zweiten Schritt gilt es, die Nutzungsanforderungen zu spezifizieren und darauf aufbauend erste geeignete Gestaltungslösungen zu entwerfen. Der dritte Schritt umfasst die Evaluation der Gestaltlösungen aus der Benutzerperspektive unter Einbezug der anfangs aufgestellten Anforderungen [152, S. 9]. Bei der DIN EN ISO 9241-210 handelt es sich um einen iterativen Prozess. Die vier Phasen werden so lange durchlaufen, bis die finale Gestaltungslösung den Nutzungsanforderungen entspricht. Die DIN EN ISO 9241-210 strukturiert den menschenzentrierten Gestaltungsprozess auf einer übergeordneten Ebene [152, S. 15]. Welche Mikromethoden für die Bearbeitung der einzelnen Phasen eingesetzt werden, ist in der DIN EN ISO 9241-210 nicht spezifiziert [152, S. 9].

Welche Methodik für die Phasen der Anforderungsdefinition (Kapitel 5), Konzeptentwicklung (Kapitel 6) und Evaluation (Kapitel 7) zum Einsatz kommen, wird in den jeweiligen Kapiteln erläutert.

4.2 Normen und Gestaltungsrichtlinien

Für die Entwicklung und Gestaltung von MMS existieren eine Reihe weiterer Normen sowie Gestaltungsrichtlinien und -empfehlungen, die bei der Entwicklung der MMS einbezogen werden.

Um das Konzept der Gebrauchstauglichkeit zu erfüllen, sollte die MMS effektiv, effizient und zufriedenstellend sein [152, 153]. Die Effektivität ist als die „Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“, definiert. Die Effizienz ist definiert als das „Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetztem Aufwand, mit dem Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“. Die Zufriedenheit der Nutzer beschreibt die positive Einstellung gegenüber der Nutzung. Die Beachtung der sieben Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110) unterstützt die Erreichung einer hohen Gebrauchstauglichkeit für interaktive Systeme weiterhin [153, S. 22].

NIELSEN [154, 155] stellt zehn weitere Usability-Heuristiken auf (Anhang A), die bei der Gestaltung von Nutzerschnittstellen beachtet werden sollen. Für den Anwendungsfall des automatisierten Fahrens nehmen die Forderungen nach der Sichtbarkeit des Systemstatus, der Übereinstimmung zwischen System und Umwelt, Einhaltung von Konsistenz und Standards sowie der Flexibilität und Effizienz eine besondere Rolle ein.

LERMER [113, S. 54] postuliert eine Systemklassifikation zur Gestaltung und Einteilung von Systemausgaben basieren auf den Prämissen des Schadensausmaßes und des vorhandenen Zeitbudgets. Die Matrix (Abbildung 4.2) gibt einen Überblick über die verfügbaren Anzeigemodalitäten. Bei hohem Zeitbudget und geringem Schadensausmaß bei Nichtreaktion empfiehlt LERMER [113, S. 54] die Nutzung permanenter Anzeigen oder Text als Informationsrepräsentation. Bei geringem Zeitbudget und hohem Schadensmaß sollte auf eine multimodale Warnstrategie zurückgegriffen werden bspw. durch haptische Warnungen in Kombination mit Warntönen und visuellen Elementen.

VAN DEN BEUKEL & VAN DEN VOORT [156] erarbeiten acht Gestaltungsmerkmale, die speziell für die Entwicklung von MMS für das hochautomatisierte Fahren gelten. So soll die MMS u.a. ein angemessenes Vertrauen erzeugen, sowie Mode Confusion und fehlerhafte Gegenreaktion des Fahrers (bspw. bei einer Übernahme) vermeiden (Anhang A). Die Beachtung der Kriterien soll möglichen negativen Automationseffekten (Kapitel 2.2.3) entgegenwirken.

NAUJOKS ET AL. [157] erweitern diese Erkenntnisse und entwickeln Gestaltungsrichtlinien für die Entwicklung von MMS speziell für das hochautomatisierte Fahren auf Basis einer Literaturrecherche und aktuell gültigen Standards. Das Ergebnis bildet ein Katalog mit 20 Richtlinien, der die Bereiche Bedienbarkeit, Informationsrepräsentation, Lesbarkeit, Verständlichkeit, Farbgebung sowie die Gestaltung von akustischen, haptischen und Warnsignalen abdeckt. (Anhang A).

Die vorgestellten Normen und Richtlinien werden im iterativen Entwicklungsprozess, speziell bei der Erarbeitung von Gestaltlösungen zur Erfüllung der Nutzungsanforderungen (dritte Phase des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses, Abbildung 4.1) einbezogen.

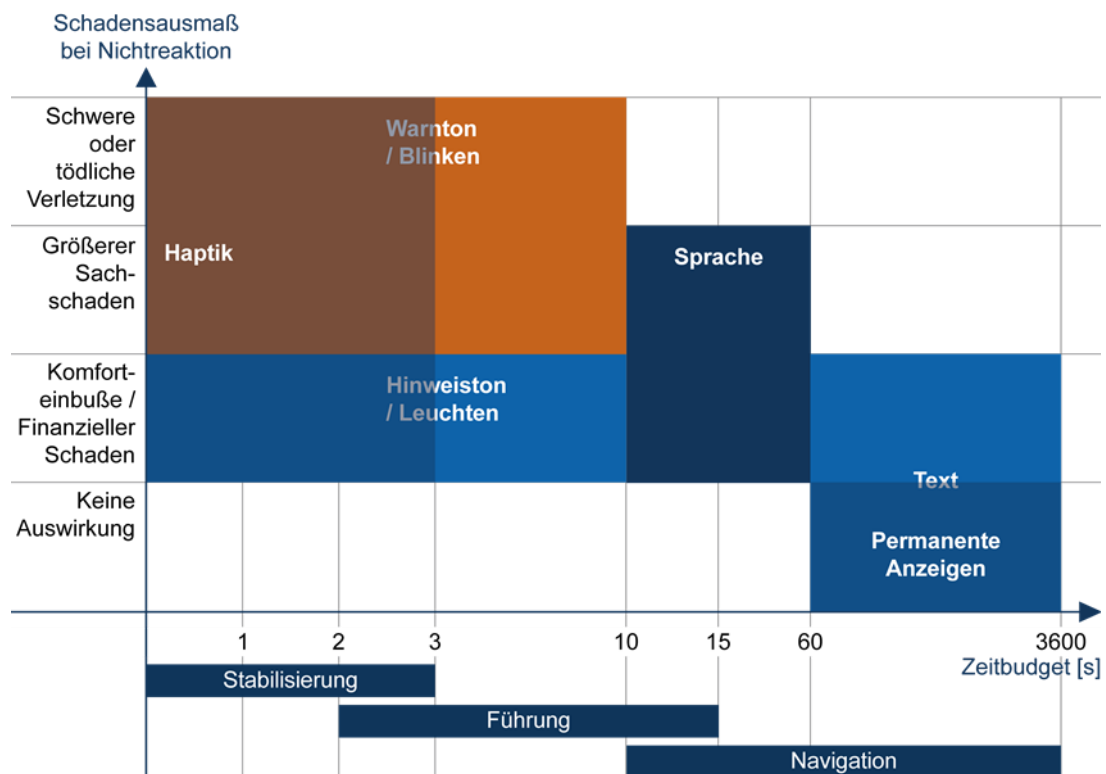


Abbildung 4.2: Systemklassifikation zur Gestaltung von Systemausgaben basierend auf den Prämissen des Schadensausmaßes und des vorhandenen Zeitbudgets [104, S. 14, 113, S. 54]

5 Explorative Anforderungsanalyse

Das Ziel der explorativen Anforderungsanalyse liegt in der Identifikation der Anforderungen zur Gestaltung einer geeigneten MMS für das HAF (Forschungsfrage F1, Kapitel 3.2). Für die Ableitung von Nutzungsanforderungen wird eine explorative Anforderungsanalyse durchgeführt. Die Anforderungsanalyse erweitert die Erkenntnisse des Nutzungskontextes und dient der Erfassung der Bedürfnisse der zugrundeliegenden Nutzergruppe [152, S. 18].

Zur nutzerzentrierten Anforderungserfassung wird in einem ersten Schritt eine qualitative Fokusgruppe eingesetzt. In einem zweiten Schritt erfolgt die Erweiterung der Erkenntnisse mithilfe einer qualitativ explorativen Fahrsimulatorstudie. Die Methoden bauen aufeinander auf. Der Detailgrad wird iterativ erhöht.

Fokusgruppen sind geeignet, um Einstellungen und Meinungen zukünftiger Nutzer für ein Produkt abzuleiten. Vorteile liegen in einem geringen Zeitbedarf pro Teilnehmer [41, S. 124]. Im Gegensatz zu Einzelbefragungen, gehen weniger Informationen verloren [41, S. 124]. Das Ziel einer Fokusgruppe ist es, ein umfassendes Verständnis einer situativen Gegebenheit zu erhalten. Nachteile der Methode Fokusgruppe liegen in einer möglichen Meinungsverzerrung durch Meinungsführer [41, S. 124, 158, S. 116]. Es entsteht ein Gruppenmeinungsbild. Die erhaltenen qualitativen Ergebnisse sind aufwendig in der Aufarbeitung sowie Interpretation und nicht verallgemeinerbar.

Mithilfe einer Fokusgruppe können neue Systeme und deren Funktionalität nur schwer bewertet werden, weil keine praktische Erfahrung mit dem System besteht. In einem zweiten Schritt zur explorativen Anforderungsanalyse wird daher ein qualitativ, explorativer Fahrsimulatorversuch durchgeführt, bei dem die Nutzer das System erleben können. WINTER ET AL. [159, S. 47-48] nennen vier Gründe, die für den Einsatz von Fahrsimulatoren im frühen Entwicklungsstadium sprechen:

- Kontrollierbarkeit, Reproduzierbarkeit und Standardisierung
- Konfrontation mit kritischen Verkehrssituationen
- Möglichkeit der Erfahrung gefährlicher Verkehrssituationen ohne physisches Risiko
- Einfachheit der Datensammlung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der qualitativen Fokusgruppe und qualitativen, nutzerbasierten Fahrsimulatorstudie skizziert. Weiterführende Erläuterungen zur Methodik und zu Ergebnissen sind in RICHARDSON ET AL. [160] beschrieben.

5.1 Fokusgruppe zur Erfassung des Informationsbedarfs

Um einen ersten Einblick in den Informationsbedarf von Lkw-Fahrern während HAF zu gewinnen, wird die qualitative Methode der Fokusgruppe gewählt.

5.1.1 Vorgehen

Insgesamt nehmen zwei Berufskraftfahrer (Fern- und Nahverkehr), ein Langstreckenpilot sowie ein Moderator und ein Protokollant an der Fokusgruppe teil (Alter MW: 40,3 Jahre, SD: 5,44). Der Pilot wird einbezogen, um Erkenntnisse, aus einer anderen Domäne abzuleiten, die seit langem mit automatisierten Systemen arbeitet.

In einem ersten Schritt bewerten die Teilnehmer einen vorab erstellten Katalog typischer Autobahnszenarien (Anhang B) hinsichtlich der manuellen Kritikalität und erstellen eine Rangreihenfolge. Die Kritikalitätsbewertung orientiert sich an den Empfehlungen von NEUKUM [161] zur Kritikalitätswahl von Prüfscenarien. In einem zweiten Schritt werden die Teilnehmer über die Definition des HAF aufgeklärt. Es erfolgt das Sammeln der von den Teilnehmern gewünschten Informationseinheiten anhand der neun erörterten Autobahnszenarien. Die Teilnehmer werden aufgefordert sich vorzustellen, das Szenario hochautomatisiert zu durchfahren. Daraufhin nennen die Teilnehmer ihren Bedarf an Informationen. Alle Szenarien werden nacheinander hinsichtlich des Informationsbedarfs diskutiert. Die Ergebnisse der Fokusgruppe dienen als erster Input zur Gestaltung des Fahrsimulatorversuchs zur Erfassung des Informationsbedarfs.

5.1.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Kritikalitätsbewertung der Szenarien zeigt, dass die Notbremsung das kritischste Szenario darstellt. Daraufhin folgen die Szenarien Stau, Überholvorgang, Geschwindigkeitsbegrenzung und die freie Fahrt. Bei der Kritikalitätsbewertung der Übernahmeszenarien stellt der Sensorausfall durch Witterungsbedingungen (Regen/Schnee/Nebel) das Szenario mit der höchsten Kritikalität dar. Baustelle, Autobahnabfahrt/Auffahrt sowie fehlende Fahrbahnmarkierungen werden als weniger kritisch eingestuft. Die Teilnehmer nennen das vorhandene Zeitbudget und die involvierten Verkehrsteilnehmer als relevante Einflüsse auf die Kritikalitätsbewertung der Szenarien.

Die Analyse und Kategorisierung der Informationsbedürfnisse erfolgt mithilfe der qualitativen Inhaltsanalyse nach CHARMAZ [162].

Die Teilnehmer stufen Informationen zum Systemstatus, zur Systemtransparenz und zu aktuell sowie zukünftig geplanten Manövern während des HAF als wichtig ein. Auch werden Informationen zu Topografie und Navigation genannt.

Die Analyse der Daten zeigt eine Verschiebung des Informationsbedürfnisses in Abhängigkeit des auftretenden Szenarios. So werden bei handhabbaren Szenarien Informationen zum System wichtiger bewertet. Bei Übernahmeszenarien rücken Informationen zur anstehenden Bewältigung der Fahraufgabe in den Vordergrund.

Eine Fokusgruppendifkussion eignet sich, um einen ersten qualitativen Einblick bezüglich des Informationsbedürfnisses während hochautomatisierter Fahrphasen zu erhalten. Kritisch zu betrachten ist die Tatsache, dass das hochautomatisierte System nicht explizit erlebt werden kann. Um weitere Erkenntnisse bezüglich der Gestaltung des HMI zu erhalten, wird eine qualitative Fahrsimulatorstudie mit Lkw-Fahrern durchgeführt.

5.2 Fahrsimulatorstudie zur Erfassung des Informationsbedarfs

Zur Validierung und explorativen Erweiterung der essentiell nötigen Informationseinheiten für das HAF wird eine Fahrsimulatorstudie durchgeführt, die den Lkw-Fahrern erlaubt, das hochautomatisierte System zu erleben. Im Folgenden werden die Methodik und die Ergebnisse skizziert. Für weiterführende Informationen wird auf RICHARDSON ET AL. [160] verwiesen.

5.2.1 Methode

Bei dem gewählten Studiendesign handelt es sich um ein Innersubjektdesign, bei dem alle Probanden alle Varianten fahren. Die unabhängige Variable (UV) stellen die in der Fokusgruppe diskutierten Autobahnscenarien dar (Kapitel 5.1, Anhang B). Die UV umfasst folglich sechs Stufen. Die abhängige Variable (AV) stellt der szenariospezifische Informationsbedarf dar.

Die Studie findet am statischen Lkw-Fahrsimulator der MAN Truck & Bus SE statt. Der Prüfstand verfügt über einen 180° Sichtbereich und wird mit der Simulationssoftware Silab 4 betrieben. Das hochautomatisierte System wird mithilfe der Wizard-of-Oz Methode realisiert. Hierbei nimmt der Proband an, mit einem voll funktionsfähigen System zu interagieren. In Realität wird die Systemfunktionalität durch den Versuchsleiter von außen simuliert.

Am Versuch nehmen insgesamt 22 Berufskraftfahrer teil. Das Durchschnittsalter liegt bei 48,77 Jahren (Min: 26 Jahre; Max: 72 Jahre; SD=12,28) mit einem durchschnittlichen Lkw Führerscheinbesitz (C, CE) von 26,18 Jahren (Min: 7 Jahre; Max: 53 Jahre; SD=12,30).

Die implementierte Strecke ist einer Autobahnstrecke nachempfunden und besteht aus zwei baulich getrennten Richtungsfahrbahnen mit jeweils zwei Fahrstreifen. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 80 km/h. Basierend auf den Ergebnissen der Expertenstudie und der Fokusgruppe werden sechs Autobahnscenarien durchfahren (Freie Fahrt, Geschwindigkeitsbegrenzung, Überholmanöver, Stau, Baustelle, Sensorausfall). Die Reihenfolge der Szenarien wird randomisiert, um auftretenden Reihenfolgeeffekten entgegen zu wirken.

Um den Informationsbedarf zu erfassen, werden die Probanden als Mitwisser in die Studie eingebunden und durch den Versuchsleiter auf Auftreten und Ende des jeweiligen Szenarios durch Ansagen aufmerksam gemacht. Nach dem Durchfahren des Szenarios fordert der Versuchsleiter den Probanden auf, seinen szenariospezifischen Informationsbedarf zu nennen. Im Anschluss an die Versuchsfahrt bewerten die Probanden die gesammelten Informationseinheiten aus der vorangegangenen Fokusgruppendifkussion bezüglich Notwendigkeit auf einer fünfstufigen Likertskala. Zusätzlich bewerten die Versuchsteilnehmer, in welchem Szenario (Mehrfachnennung) die Information besonders wichtig ist.

5.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der offenen Informationsabfrage nach Durchfahren der Szenarien werden mithilfe des qualitativen Card Sorting Verfahrens geclustert, um einen Überblick über die notwendigen Informationseinheiten zu erhalten. Das Clustering ergibt sechs Informationskategorien, die von den Lkw-Fahrern während hochautomatisierter Fahrphasen auf Autobahnen gewünscht sind.

Neben Informationen zum Systemstatus und zu aktuell und zukünftig geplanten Manövern der Automation, sollen Informationen zur Umwelt und Navigation dargeboten werden. Zwei weitere wichtige Kategorien stellen Informationen zu auftretenden Übernahmen und zur Erläuterung des Systemverhaltens dar. Die Ergebnisse der Fahrsimulatorstudie zeigen, analog zu den Ergebnissen der Fokusgruppendifkussion, ein szenariospezifisches Informationsbedürfnis. So soll der Systemstatus, die Darstellung der aktuellen Umwelt und Manöver sowie der Systemsicherheit durchgehend erfolgen.

Auch zeigt sich erneut die Verschiebung des Informationsbedürfnisses in Abhängigkeit der Szenariobeschaffenheit. Im Fall eines Übernahmeszenarios rücken Informationen zur Bewältigung der anstehenden Fahraufgabe (bspw. Umgebungsverkehr) in den Vordergrund während in handhabbaren Szenarien Informationen zum System (bspw. aktuelle und geplante Manöver) wichtiger sind. Für eine detaillierte Auswertung und Beschreibung der Notwendigkeitsbewertung wird auf RICHARDSON ET AL. [160] verwiesen.

5.3 Zusammenfassung der Anforderungen

Die Ergebnisse der Fokusgruppe (Kapitel 5.1.2) und des Fahrsimulatorversuchs (Kapitel 5.2.2) geben einen ersten Anhaltspunkt, welche Informationseinheiten während hochautomatisierter Fahrphasen auf Autobahnen dargestellt werden sollen (Tabelle 5.1). Die Informationskategorien Systemstatus, Anzeige aktueller und zukünftig geplanter Manöver der Automation, Umwelt, Navigation, Systemrückmeldung sowie Handlungsanweisung bei einer bevorstehenden Übernahme werden durch die Lkw-Fahrer als essentiell bewertet. Die Darstellung der ermittelten Informationen sollen das Situationsbewusstsein des Lkw-Fahrers und ein angemessenes Vertrauen in die Fähigkeiten und Grenzen des hochautomatisierten Systems fördern und den Fahrer zu einer sicheren und effizienten Nutzung der Automation befähigen. Die Verschiebung des Informationsbedürfnisses bei Übernahme- und systemseitig handhabbaren Szenarien wird bei der Gestaltung einer geeigneten MMS berücksichtigt.

Tabelle 5.1: Darstellung der ermittelten Informationseinheiten für das HAF im Lkw

Informationseinheit	Beschreibung
Systemstatus	Automation verfügbar / aktiviert/ deaktiviert
Manöverdarstellung	Aktuelle und geplanter Manöver
Umwelt	Umgebungsverkehr, aktuelle Verkehrsschilder
Navigation	Routen- und Navigationsinformation
Rückmeldung	Gründe zur Erläuterung der Aktionen des hochautomatisierten Systems
Handlungsanweisung	Konkrete Handlungsanweisung, was im Fall einer Übernahme zu tun ist

Das folgende Kapitel gibt einen detaillierten Einblick in die HMI-Konzeptentwicklung (Schritt 3 des nutzerzentrierten Entwicklungsprozesses), die auf Basis der identifizierten Nutzungsanforderungen erfolgt. Die Ergebnisse der literaturbasierten Anforderungsanalyse (Kapitel 2.8) werden bei der Gestaltung explizit berücksichtigt.

6 HMI Konzeptentwicklung und Evaluation

Dieses Kapitel gibt einen detaillierten Einblick in die HMI-Konzeptentwicklung und die eingesetzten Evaluationsmethoden. Die Schnittstellenentwicklung basiert auf den Erkenntnissen der Anforderungsanalyse (Kapitel 5) sowie auf den in Kapitel 4 vorgestellten Leitlinien und Normen zur Schnittstellengestaltung. Die Konzepterarbeitung und -evaluation erfolgt im iterativen Ansatz und dient der Bearbeitung von Forschungsfrage F1 (Kapitel 3.2).

Aus Effizienz- und Kostengründen sollten Anzeigeconzepte in der frühen Entwicklungsphase in Form von Prototypen implementiert und evaluiert werden. Diese bieten die Möglichkeit, schnell und kosteneffizient Anzeigevarianten zu erstellen [163, S. 93]. Ein weiterer Vorteil liegt darin, entwickelte Ideen für den Nutzer bereits in einem frühen Entwicklungsstadium sichtbar, begreifbar und nachvollziehbar darzustellen [164, S. 13]. Zusätzlich ermöglicht der Einsatz von Prototypen Nutzerfeedback in einem frühen Entwicklungsstadium zu erhalten [164, S. 13].

Es existiert eine Reihe von Prototypen, die je nach Entwicklungsstand und Anforderungen eingesetzt werden. Hierbei werden low-fidelity und high-fidelity Prototypen unterschieden. Low-fidelity Prototypen weisen einen skizzenhaften Charakter auf, sind noch weit vom finalen Endprodukt entfernt, aber einfach, schnell und kostengünstig herzustellen [164, S. 13]. NIELSEN [163, S. 94] unterscheidet zwischen horizontalen und vertikalen Prototypen (Abbildung 6.1). Vertikale Prototypen implementieren wenige Merkmale mit hoher Funktionalität. Horizontale Prototypen geben die ganze Breite an Merkmalen des späteren Systems wieder, verzichten jedoch auf eine detaillierte Funktionstiefe.

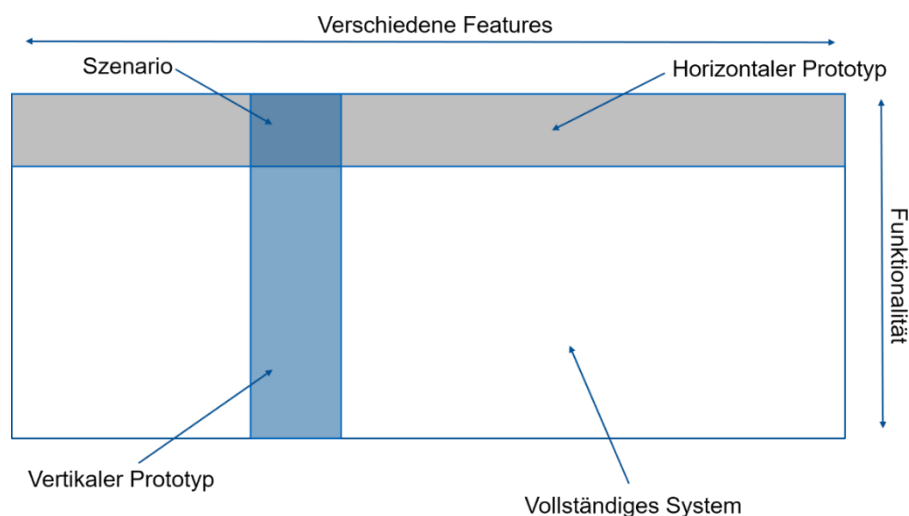


Abbildung 6.1: Darstellung der zwei Dimensionen des Prototyping: Vertikaler und horizontaler Prototyp [163, S. 94]

Da es um die Gestaltung eines ganzheitlichen HMI Strategie für das HAF im Lkw geht, wird im frühen Evaluationsstadium der Fokus auf die Entwicklung ganzheitlicher, horizontaler Prototypen gelegt. Der Detaillierungsgrad der erarbeiteten Prototypen steigt mit zunehmendem Iterationsgrad. Die erstellten Prototypen werden kontinuierlich evaluiert und iterativ optimiert.

In einem ersten Schritt werden, auf Basis der Anforderungen (Kapitel 5.3), erste Skizzen für mögliche MMS Konzepte mithilfe eines Expertenworkshops (Kapitel 6.1) erarbeitet. Skizzen stellen einfache grafische Darstellungen dar, die schnell und günstig erstellt werden. Der Fokus liegt hierbei auf der Darstellung der Funktion und nicht auf der visuellen Ästhetik. Nach BUTZ [41, S. 131] weisen Skizzen einen minimalen Detailgrad auf. Das Ziel von Skizzen liegt in der Untersuchung des Lösungsraumes von MMS Konzepten, nicht in der Festlegung.

In einem zweiten Schritt werden die Skizzen mit aktuellen Erkenntnissen aus der Literatur sowie Normen und Gestaltungsrichtlinien optimiert und erste Papierprototypen erarbeitet. Während Skizzen dazu dienen, erste Konzeptideen anzudeuten, legen Papierprototypen das MMS-Konzept bereits zu einem frühen Entwicklungsstadium fest und visualisieren erste Bedienabläufe [41, S. 132-134] Nach BUTZ & KRÜGER [41, S. 134] eignen sich Papierprototypen daher besonders für die Darstellung grafischer Benutzerschnittstellen.

Für die Evaluation der Papierprototypen wird eine heuristische Expertenstudie durchgeführt (Kapitel 6.2.1). Die gewonnenen Erkenntnisse werden in Videoprototypen eingearbeitet und in einer weiteren analytischen Expertenstudie evaluiert (Kapitel 6.2.2). Nach einer Optimierung der Konzepte erfolgt die Bewertung des Anzeigeconzepts mithilfe einer formativen Fahrsimulatorstudie durch Lkw-Fahrer (Kapitel 6.5).

6.1 Formativer Expertenworkshop

Um auf Basis der in Kapitel 5 beschriebenen Anforderungen einen ersten Lösungsraum an MMS Konzepten für das HAF im Lkw zu schaffen, wird ein Expertenworkshop in Form eines *World-Café* [165] durchgeführt. Die Methodik und Ergebnisse werden im Folgenden skizziert. Für detailliertere Informationen wird auf RICHARDSON ET AL. [166] verwiesen.

Insgesamt nehmen neun Experten (MMS- und Funktionsentwicklung) aus Industrie und Wissenschaft am Workshop teil. In einem ersten Schritt werden die Experten mit den erhobenen Anforderungen, möglichen Technologien, den Nebenaufgaben während HAF und dem Informationsbedarf für das HAF im Lkw vertraut gemacht. Die Experten erhalten die Anweisung, diese Informationen bei der Erarbeitung der MMS Konzepte zu berücksichtigen.

Ergebnis des Workshops ist eine erste Skizze (Abbildung 6.2), die eine mögliche MMS für das HAF darstellt. Die MMS greift auf fünf Technologien zurück: Das Kombidisplay, ein HUD, kontaktanaloge HUD Elemente, eine LED-Leiste in der Scheibenwurzel sowie ein weiteres Entertainmentdisplay, das in der Mittelkonsole verortet ist. Der Fahrer soll in Übernahme-situationen durch Sprachansagen und Warntöne unterstützt werden. Der Systemstatus wird kontinuierlich über die LED-Leiste kommuniziert. Das HUD enthält relevante Navigations- und fahrrelevante Informationen. Kontaktanaloge Elemente zeigen aktuelle und geplante Fahrmanöver an und heben Fahrzeuge hervor, die sich während einer Übernahme in direkter Umgebung des Ego-Fahrzeuges befinden. Eine Sitzvibration wird als finale Instanz bei einer Übernahmeaufforderung genutzt.

Die Skizze wird in einem nächsten Schritt mit den in Kapitel 4.2 beschriebenen Normen und Gestaltungsrichtlinien optimiert und mit aktuellen Erkenntnissen aus der Literatur ergänzt. Für die nächste iterative Evaluationsschleife in Form einer analytischen Expertenstudie werden aus den Skizzen Papierprototypen erarbeitet.

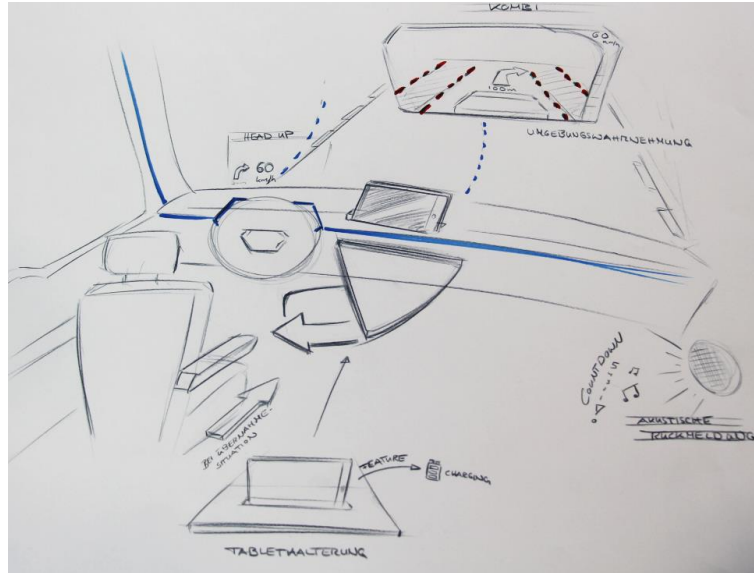


Abbildung 6.2: Ergebnis des *World-Café* Workshops: Skizze einer möglichen MMS für das HAF im Lkw

6.2 Methode der analytischen Expertenstudien

Zur Evaluation der ersten Gestalltlösungen wird auf eine heuristische Expertenevaluation zurückgegriffen. Durch den Einsatz analytischer Methoden ist eine schnelle, kostengünstige und systematische Evaluation von Konzeptentwürfen in einem frühen Entwicklungsstadium möglich [41, S. 142-143]. Der Lösungsraum an MMS Konzeptentwürfen wird eingeschränkt. In einer weiteren Iterationsschleife werden die optimierten Anzeigekonzepte in einer expertenbasierten Validierungsstudie mittels Videoprototyp evaluiert.

6.2.1 Methodik der heuristischen Expertenevaluation mittels Papierprototyp

Die heuristische Expertenevaluation stellt eine Kombination aus heuristischer Evaluation in Kombination mit einem kognitiven Walkthrough dar. Hierbei bewerten Experten die Gebrauchstauglichkeit und Anwendung der ersten Konzeptentwürfe auf Basis von Heuristiken [167, S. 152]. Mithilfe des kognitiven Walkthrough werden die später nötigen Anwendungsschritte des Nutzers analysiert und hinsichtlich Durchführbarkeit beurteilt [158, S. 133]. Mithilfe der heuristischen Expertenevaluation sollen drei unterschiedliche Anzeigekonzepte (Abbildung 6.3) auf mögliche Probleme bezüglich der Anordnung der Informationseinheiten untersucht werden. Weiterhin gilt es, verschiedene Darstellungsformen und die Gebrauchstauglichkeit zu bewerten.

Insgesamt fünf Evaluatoren (Alter MW: 32,00 Jahre, SD = 3,67) aus dem Bereich HMI- und Funktionsentwicklung werden aufgefordert, während des gesamten Evaluationsprozesses die

Methode des Thinking- Aloud anzuwenden und ihre Gedankengänge auszusprechen. In einem ersten Schritt explorieren die Experten die gestalteten Konzeptentwürfe. In einem zweiten Schritt bewerten die Experten die MMS Konzepte mithilfe der zehn Usability Heuristiken nach NIELSEN & MOLICH [155] (Kapitel 4.2).

Nach NIELSEN [168] und BUTZ & KRÜGER [41, S. 142] sind fünf Evaluatoren ausreichend, um einen Großteil der auftretenden Usability Probleme aufzudecken und genügend Erkenntnisse bezüglich der Verbesserung des Designs zu erhalten.

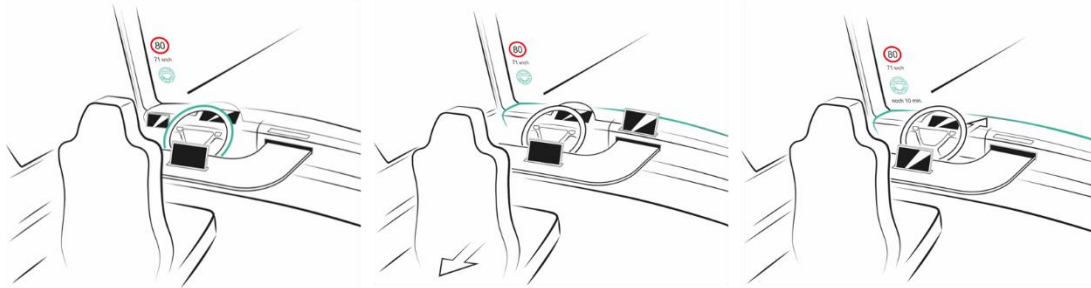


Abbildung 6.3: Entwickelter Papierprototyp (links: LED-Leiste am Lenkrad; Mitte: zusätzliches Display; Rechts: LED-Leiste in der Scheibenwurzel)

6.2.2 Methodik der Validierungsstudie mittels Videoprototyp

Die optimierten Papierprototypen werden in einem nächsten Iterationsschritt als Videoprototypen umgesetzt. Diese haben den Vorteil, dass sie die zeitliche Dimension einbeziehen und somit den Ablauf der MMS und die Bedienung im geplanten Kontext zeigen [41, S. 135-136].

Das Ziel des zweiten Evaluationsschrittes liegt in der Analyse der MMS Konzepte bezüglich der Gebrauchstauglichkeit (Kapitel 4.2), der Anforderungen an eine MMS für das HAF nach VAN DEN BEUKEL & VAN DEN VOORT [156] und der Beantwortung der offenen Fragen der heuristischen Expertenevaluation (Kapitel 6.3.1).

Die Validierung findet mit fünf Experten (Alter MW: 31,80 Jahre; SD=2,77 Jahre) aus den Bereichen Fahrzeugtechnik, Ergonomie, Psychologie und Industrial Design statt. In einem ersten Schritt explorieren die Experten die gestalteten Videoprototypen mithilfe der Thinking Aloud Methode. Im zweiten Schritt findet die Bewertung der MMS Konzeptentwürfe mithilfe standardisierter Fragebögen statt, bezüglich der Usability (System Usability Scale, [169]) und der Gebrauchstauglichkeit mithilfe des ISO-NORM 9241/110 Fragebogens [170].

6.3 Ergebnisse der analytischen Expertenstudien

Nachfolgend werden die Ergebnisse der heuristischen Expertenevaluation mittels Papierprototyp (Kapitel 6.2.1) und der Validierungsstudie mittels Videoprototyp (Kapitel 6.2.2) skizziert und diskutiert. Für weiterführende Informationen wird auf RICHARDSON ET AL. [166] verwiesen.

6.3.1 Heuristische Expertenevaluation mittels Papierprototyp

Die Ergebnisse des Thinking Aloud zeigen, dass die Experten die HMI Strategie bevorzugen, die sich aus den technischen Komponenten Kombidisplay, HUD, LED-Leiste (Scheibenwurzel)

und zusätzlichem Entertainmentdisplay zusammensetzt. Weiterhin befürworten die Experten die Umsetzung einer multimodalen MMS, die aus visuellen und akustischen Elementen (Sprachansagen, Sounds) besteht. Das dreistufige Farbkonzept der Warnkaskade (Türkis-Orange-Rot) bleibt erhalten.

Die Darstellung der HAF-Verfügbarkeit soll über die Lenkradtasten und zusätzlich im Kombidisplay erfolgen. Die Aktivierung des HAF-Systems über Doppeltastendruck der beiden Lenkradtasten wird von allen Experten positiv bewertet. Ist das HAF aktiviert, sollen der Umgebungsverkehr sowie relevante Navigationsinformationen im Kombidisplay erscheinen. Der aktuelle Systemstatus wird über die LED-Leiste in der Scheibenwurzel, das Kombidisplay und im Entertainmentdisplay kommuniziert. Die Informationsleiste des Entertainmentdisplays sowie die Möglichkeit, sich optional weiterführende Informationen zur Umgebung und zur Navigation anzeigen zu lassen, wird ebenfalls positiv bewertet.

Steht eine Übernahme bevor, soll dem Fahrer in der Vorbereitungsphase (Orange) der Grund für die anstehende Übernahme kommuniziert werden. Eine Sperrung des Entertainmentdisplays erfolgt vor der unmittelbaren Übernahme (Rot), um die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die bevorstehende Übernahme zu lenken. Die Übernahmereaktion des Fahrers wird durch eine Handlungsanweisung unterstützt, indem die Lenkradtasten farbig aufleuchten. Das manuelle Fahren als Rückfallebene wird von den Experten einheitlich befürwortet.

Die heuristische Evaluation anhand der zehn Usability Heuristiken nach NIELSEN & MOLICH [155] ergibt, dass alle Informationen redundant und im selben Darstellungsformat angezeigt werden sollten. Dies betrifft die Gestaltung des Statusindikators und des HUD.

Offene Punkte, die innerhalb der heuristischen Expertenevaluation nicht beantwortet werden, beziehen sich auf die Anzeige der verbleibenden Zeit bis zu einer bevorstehenden Übernahme. Auch die Frage, ob es in Abhängigkeit der vorliegenden Verkehrssituation eine zwei- oder dreistufige Warnkaskade geben soll, kann nicht beantwortet werden.

Die offenen Fragen werden in die nächste Iterationsschleife des Entwicklungsprozesses aufgenommen.

6.3.2 Validierungsstudie mittels Videoprototyp

Abbildung 6.4 zeigt das Ergebnis der Bewertung der MMS Konzeptentwürfe anhand des ISO-Norm 9241/110 Fragebogens (7-stufige Skala). Die MMS wird im Mittel über alle 7 Kriterien positiv bewertet. Aufgabenangemessenheit (MW = 4,80), Selbstbeschreibungsfähigkeit (MW = 4,83), Erwartungskonformität (MW = 5,15) und Lernförderlichkeit (MW = 4,65) der MMS werden am besten bewertet. Steuerbarkeit (MW = 4,13) und Fehlertoleranz (MW = 4,10) befinden sich im positiven Bereich. Die Experten bewerten die Individualisierbarkeit (MW = 3,17) der MMS Konzeptentwürfe neutral.

Die Bewertung des ISO-Norm 9241/110 bezüglich der Gebrauchstauglichkeit des Systems fällt positiv aus. Die Bewertung der Individualisierbarkeit wird neutral bewertet, ist im Kontext des hochautomatisierten Fahrens allerdings kritisch zu betrachten. Da es sich bei einer Übernahme-situation um eine sicherheitskritische Situation handelt, sollte keine individuelle Anpassung der Warnstrategie angeboten werden. Weiterhin sollten die Steuerbarkeit und die Fehlertoleranz der Konzeptentwürfe verbessert werden.

Die Auswertung der MMS Kriterien für das HAF nach VAN DEN BEUKEL & VAN DEN VOORT [156], S.7 (Abbildung 6.5) zeigt, dass die MMS Konzeptentwürfe in der Lage sind, sowohl Mode Confusion (MW: 5,6) als auch die mentale Beanspruchung (MW: 5,3) und die Aufgabenaufteilung zwischen Mensch und Maschine (MW: 5,00) positiv zu beeinflussen. Die Kriterien bezüglich der Schaffung eines angemessenen Vertrauens (MW: 4,4) zur Vermeidung fehlerhafter Gegenreaktionen seitens des Fahrers (MW: 4,2) und die Lenkung der Aufmerksamkeit auf relevante Informationen der MMS (MW: 4,6) befinden sich im akzeptablen Bereich.

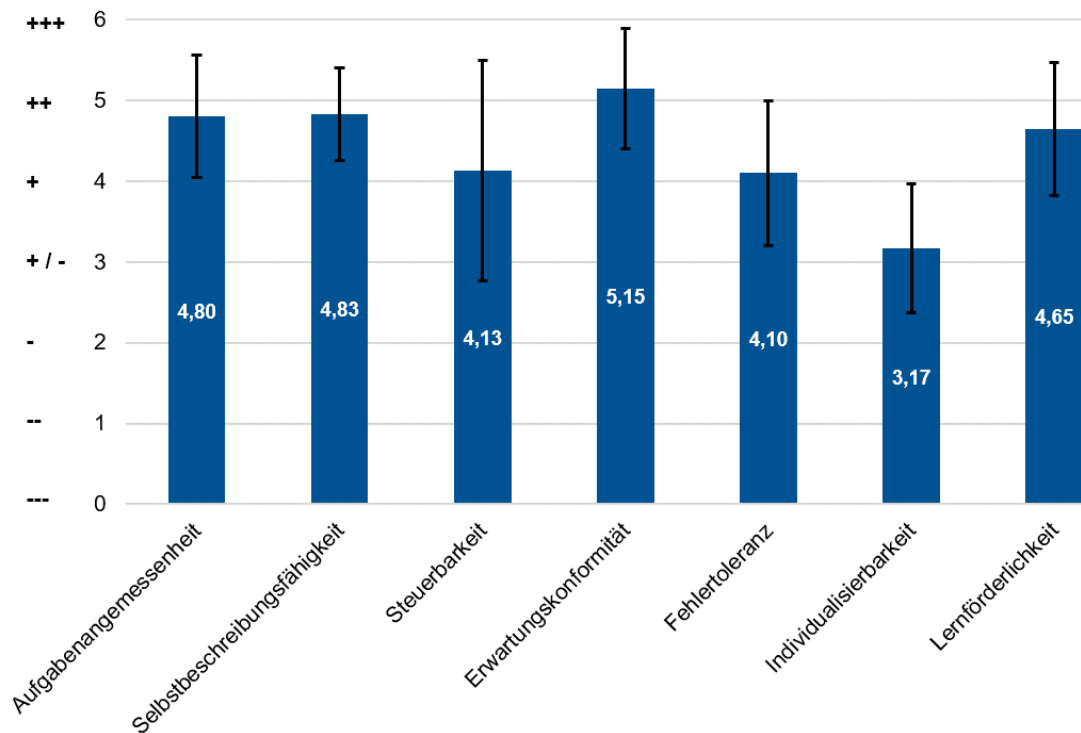


Abbildung 6.4: Darstellung der Bewertungen des Videoprototypen mithilfe der ISO-Norm 9241/110 Kriterien [170]

Die Frage, ob und wie (zeit- oder streckenbasiert) die voraussichtlich verbleibende Zeit bis zu einer bevorstehenden Übernahme angezeigt werden soll, kann auch in der zweiten Iterationschleife nicht eindeutig geklärt werden. Eine Vorbereitung der Übernahme in vorhersehbaren Übernahmesituationen, in Form einer orangenen Übernahmephase, wird durch die Experten als sinnvoll eingestuft.

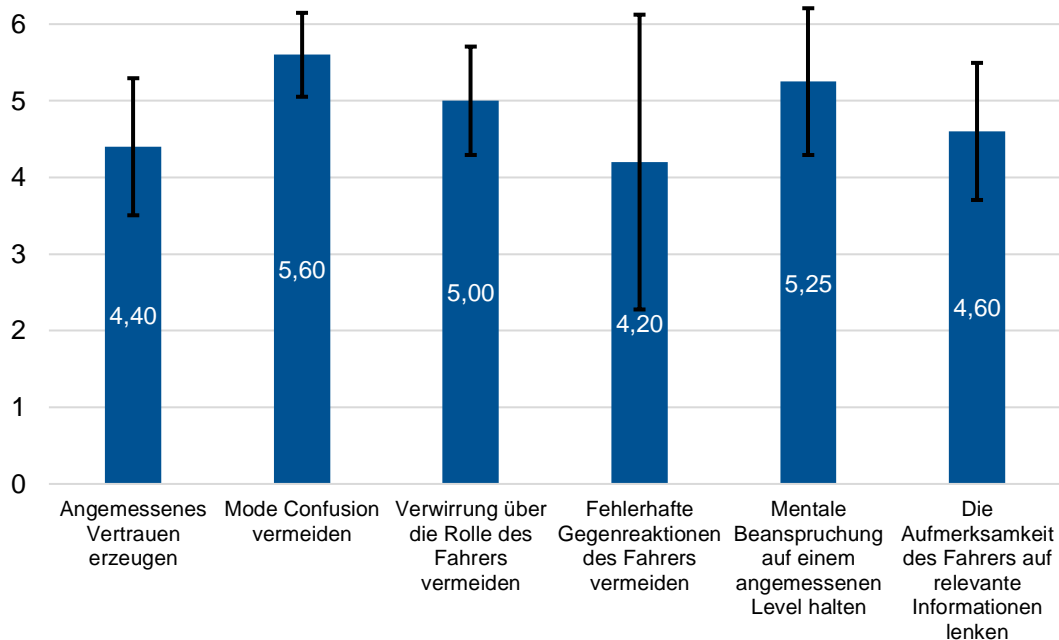


Abbildung 6.5: Deskriptive Darstellung der Bewertung des Videoprototypen mithilfe der HMI Kriterien nach [156]; (0 $\hat{=}$ „Trifft gar nicht zu“; 6 $\hat{=}$ „Trifft voll und ganz zu“)

6.4 Optimierung des Anzeigekonzepts

Die Erkenntnisse der heuristischen Expertenevaluation (Papierprototyp) und der Validierungsstudie mittels Videoprototyp werden in die MMS Konzepte eingearbeitet und im Fahrsimulator implementiert.

6.5 Formative Fahrsimulatorstudie

Um die evaluierten Konzeptentwürfe im realen Nutzungskontext innerhalb einer hochautomatisierten Fahrt zu überprüfen und eine erste Bewertung der zugrundeliegenden Nutzergruppe zu erhalten, wird eine formative Fahrsimulatorstudie mit Lkw-Fahrern durchgeführt. Aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit, der Variationsbreite von Fahrsituationen und der gefahrlosen Darstellung kritischer Fahrsituationen, eignet sich der Fahrsimulator besonders in frühen Entwicklungsphasen, um MMS Konzepte zu evaluieren [171, S. 188]. Die Methodik und Ergebnisse werden im Folgenden skizziert. Für weiterführende Informationen wird auf RICHARDSON ET AL. [172] verwiesen.

6.5.1 Fragestellung

Die Durchführung des formativen Fahrsimulatorversuchs dient der Beantwortung der in Kapitel 3.2 aufgestellten Forschungsfrage F1 („Wie könnte eine geeignete MMS für das HAF im Lkw gestaltet sein?“). Weiterhin werden die DIN EN ISO 9241-210 [153] Leitkriterien zur Erfüllung

der Gebrauchstauglichkeit (Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit) überprüft. Der Fahrversuch greift auch die offen gebliebenen Fragen der Expertenevaluationen (Kapitel 5.1.2) auf. Folgende Programmfragen werden geprüft:

P 1: Sollen kontinuierliche Informationen zu einer bevorstehenden Übernahme angezeigt werden?

P 2: In welcher Form (zeitbasiert vs. distanzbasiert) sollen die kontinuierlichen Informationen bis zu einer Übernahme dargestellt werden?

P 3: Soll bei vorhersehbaren Übernahmen eine Vorbereitungsphase angezeigt werden?

P 4: Wie bewerten die Nutzer die Gebrauchstauglichkeit des Gesamtkonzepts?

Für die Untersuchung der Fragestellung P1 und P2 werden drei unterschiedliche MMS Konzeptvarianten erstellt. Konzept A enthält keine weiteren Informationen bezüglich einer Übernahme. Konzept B stellt die verbleibende Zeit bis zu einer Übernahme zeitbasiert dar, während Konzept C die Informationen entfernungs-basiert anzeigt. Für detaillierte Informationen zur Gestaltung wird auf RICHARDSON ET AL. [172] verwiesen.

6.5.2 Methode und Stichprobe

Bei dem vorliegenden Versuchsdesign handelt es sich um ein experimentelles Design mit Messwiederholung (within-subjects design). Hierbei erfahren und bewerten alle Probanden jede Konzeptvariante. Die Auswahl der Messgrößen erfolgt anhand der Leitkriterien zur Erfüllung der Gebrauchstauglichkeit [153].

Die Effektivität wird als die „Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“ definiert. Die Operationalisierung der Effektivität erfolgt subjektiv anhand der Kontrollierbarkeitsbewertung nach NEUKUM & KRÜGER [173] bei auftretenden Übernahmesituationen.

Die Erfassung der Effizienz erfolgt über die Beanspruchungsmessung mithilfe des standardisierten Driver Activity Load Index (DALI) Fragebogens [174].

Die Zufriedenheit der Nutzer beschreibt die positive Einstellung gegenüber der Nutzung und wird mithilfe eines standardisierten Fragebogens zur Akzeptanzbewertung erfasst [175]. Zusätzlich erfolgt die Erfassung der User Experience (UX) über den standardisierten User Experience Questionnaire (UEQ) [176, 177].

Die Studie wird am dynamischen Lkw Fahrversuch des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der TU München durchgeführt (Abbildung 6.6). Der Fahrversuch verfügt über eine MAN TGS Serienkabine, einen Hexapod mit sechs Freiheitsgraden, ein horizontales Rundumsichtfeld von 210° und wird mit der Simulationssoftware Silab 5 betrieben. Der Einsatz eines dynamischen Fahrversuchs mit Rundumsicht reduziert Störeffekte durch begrenzte Bewegungs- und Sichtdarstellung. Weiterhin nehmen die Probanden eine haptische Rückmeldung zur Längs- und Querbeschleunigung wahr.



Abbildung 6.6: Dynamischer Fahrsimulator: Ansicht von innen (links), Fahrerkabine mit Bewegungssystem und 210° Sichtsystem (rechts)

Zur Darstellung des MMS-Konzeptes ist ein 1920x720 TFT Display verbaut. Die Fahrerkabine wird um das Anzeigemedium LED-Leiste ergänzt (Abbildung 6.6, links). Weiterhin ist eine Tablethalterung an der Instrumententafel (rechts vom Fahrer) angebracht, die zusammen mit dem Tablet-PC die Bearbeitung von Nebenaufgaben während der hochautomatisierten Fahrt ermöglicht (Abbildung 6.6).

Die hochautomatisierte Fahrfunktion ist prototypisch in C++ implementiert. Die Auslegung orientiert sich an der Definition nach GASSER [12]. So erkennt diese alle Systemgrenzen und fordert den Fahrer zur Übernahme auf. Die hochautomatisierte Fahrfunktion kann über einen Doppeltastendruck am Lenkrad aktiviert werden, sobald diese verfügbar ist.

Die Versuchsstrecken bestehen aus einer zweispurigen Autobahn. Innerhalb der Strecke werden sechs Prüfscenarien umgesetzt (Anhang B). Diese decken das vollständige Funktions- und Limitationsspektrum der hochautomatisierten Fahrfunktion ab. So gibt es Situationen, in denen das hochautomatisierte System fehlerfrei funktioniert, sowie Übernahmesituationen mit und ohne Vorbereitungszeit.

Die Stichprobe setzt sich aus 32 Berufskraftfahrern mit einem durchschnittlichen Alter von 47,8 Jahren (SD: 9,4) zusammen. 30 Datensätze gehen in die Auswertung (29 männlich, 1 weiblich) ein. Der durchschnittliche Führerscheinbesitz liegt bei 24,83 Jahren (SD: 8,76). Die Auswertung der Technikbereitschaft nach NEYER ET AL. [178] ergibt eine hohe durchschnittliche Technikbereitschaft von 4,5 (5-stufige Likert Skala).

6.5.3 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse des formativen Variantenversuchs dargestellt. Hierbei handelt es sich um die quantitativen Fragebögen und um den qualitativ, explorativen Teil. Für die inferenzstatistische Auswertung wird ein Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ festgelegt.

Kontrollierbarkeit

Die Bewertung der Kontrollierbarkeit nach NEUKUM & KRÜGER [173] der einzelnen Situationen erfolgt auf einer 10-stufigen Skala (1=„nichts bemerkt“; 10= „unkontrollierbar“). Ein sicheres, kontrollierbares System zeichnet sich durch Bewertungen <7 aus. Die deskriptive Auswertung zeigt geringe Kontrollierbarkeitsbewertungen für alle Konzepte. Konzept A (MW: 2,48; SD:1,44) weist

deskriptiv die höchsten Bewertungen auf im Vergleich zu Konzept B (MW: 2,02; SD:1,12) und Konzept C (MW: 1,96, SD:1,05).

Die inferenzstatistische Prüfung (Friedman-Test) zeigt einen signifikanten Effekt ($p=0,034$). Der paarweise Vergleich mittels Conover's Post hoc Test ergibt signifikante Unterschiede zwischen Konzept A und B ($p=0,022$) und Konzept A und C ($p=0,022$). Zwischen Konzept B und C ist kein signifikanter Unterschied ($p=1,00$). Die Berechnung von Spearmans r ergibt einen mittleren Effekt für den Vergleich von Konzept A und B ($r=0,496$), sowie große Effekte für die paarweisen Vergleiche von Konzept A und C ($r=0,715$) sowie Konzept B und C ($r=0,669$).

Die Ergebnisse der Kontrollierbarkeitsbewertung zeigen, dass die Darstellung zusätzlicher Informationen zu einer erhöhten Kontrollierbarkeit von Übernahme-situationen führt. Die Darstellungsform (zeit- oder distanzbasiert) ergibt keinen signifikanten Unterschied bezüglich der Kontrollierbarkeitsbewertung.

DALI

Die Erhebung der Beanspruchung erfolgt auf sieben Subskalen (Gesamte Aufmerksamkeit, Visuelle Beanspruchung, Auditive Beanspruchung, Taktile Beanspruchung, Stress, zeitliche Beanspruchung, Beeinträchtigung durch die Nebenaufgabe). Die deskriptive Auswertung (Abbildung 6.7) zeigt geringe Beanspruchungsbewertungen über alle MMS Konzepte und Subskalen.

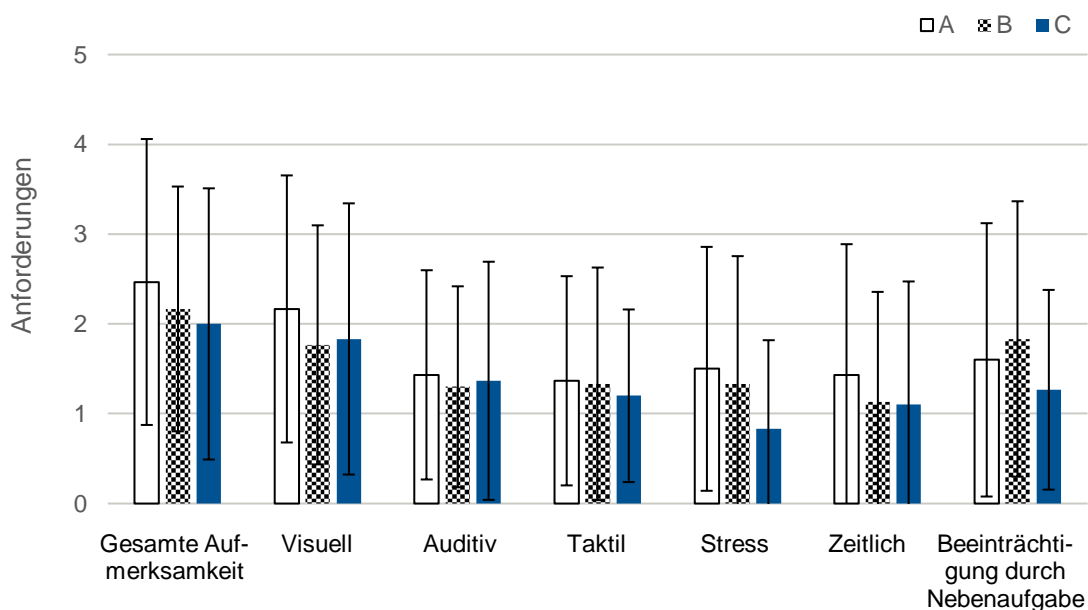


Abbildung 6.7: Deskriptive Darstellung der DALI Bewertungen (0 = „niedrig“, 5 = „hoch“; Konzept A: keine zusätzlichen Informationen; Konzept B: Information zeitbasiert; Konzept C: Information distanzbasiert)

Die inferenzstatistische Auswertung (Friedman-Test) ergibt signifikante Effekte für die Subskalen Stress ($p=0,025$) und Beeinträchtigung durch Bearbeitung einer Nebenaufgabe ($p=0,016$). Der paarweise Vergleich der Konzepte mittels Conover's Post hoc Test für die Subskala Stress ergibt signifikante Effekte zwischen Konzept A und C ($p=0,008$) sowie Konzept B

und C ($p=0,042$). Der paarweise Vergleich für die Subskala Beeinträchtigung durch Nebenaufgabe zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen Konzept A und B ($p=0,021$) sowie Konzept B und C ($p=0,006$).

Die Ergebnisse untermauern die gefundenen Ergebnisse und deuten darauf hin, dass die Darstellung zusätzlicher Informationen die Beanspruchung (Subskalen Stress und Beeinträchtigung durch Bearbeitung einer Nebenaufgabe) des Fahrers reduziert. Bezüglich der Darstellungsform sollte eine distanzbasierte Informationsanzeige gewählt werden.

Akzeptanz

VAN DER LAAN [175] unterteilt die Akzeptanz in die Subskalen Nützlichkeit und Zufriedenheit (5-stufige Likert Skala). Die Nützlichkeit beschreibt praktische Aspekte des Systems, während die Zufriedenheit die Annehmlichkeit der Nutzung des Systems erfasst. Die Akzeptanz wird durch neun Items erfasst. Diese bestehen aus gegensätzlichen Wortpaaren (semantisches Differential, bspw. nutzlos/nützlich), die sich auf einer fünfstufigen Likert-Skala (-2 bis +2) gegenüberstehen. Der Konzeptvergleich ergibt hohe Werte für die Zufriedenheit und Nützlichkeit aller Konzeptvarianten (Abbildung 6.8).

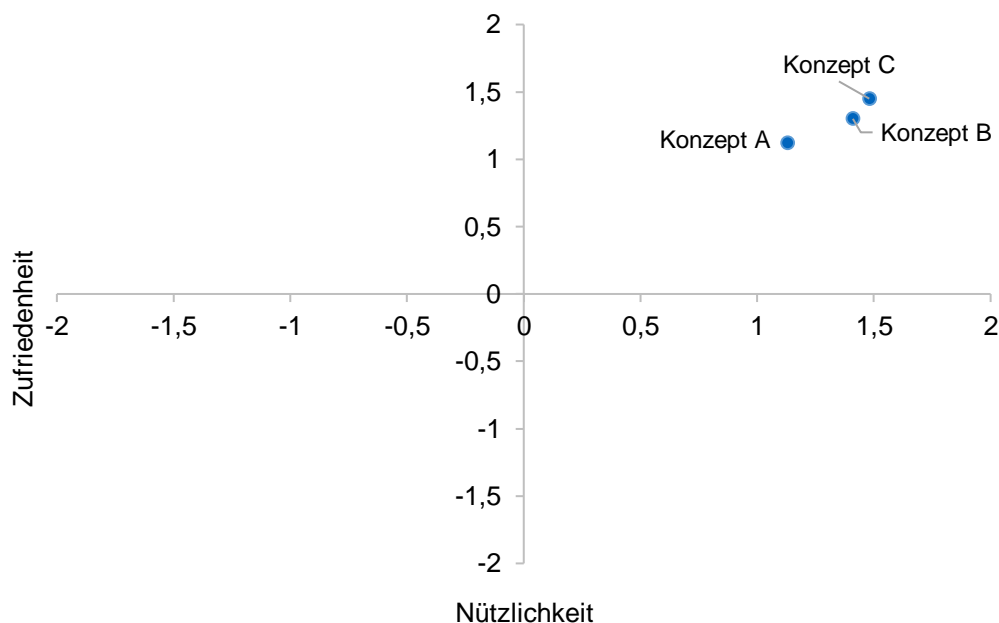


Abbildung 6.8: Deskriptive Darstellung der Akzeptanzbewertungen (Nützlichkeit/Zufriedenheit)

Die inferenzstatistische Auswertung (Friedman-Test) zeigt signifikante Effekte für die Subskalen Zufriedenheit ($p=0,018$) und Nützlichkeit ($p<0,001$) zwischen den drei Konzeptvarianten. Die Berechnung des Conover Post-hoc Tests (Tabelle 6.1) ergibt signifikante Unterschiede zwischen allen Konzeptvarianten für die Subskala Nützlichkeit und signifikante Unterschiede zwischen Konzept A und B sowie A und C für die Subskala Zufriedenheit. Der Vergleich ergibt, dass die Darstellung zusätzlicher Informationen die Akzeptanz positiv beeinflusst. Konzept C erreicht die höchsten Werte bezüglich der Nützlichkeitsbewertung.

Tabelle 6.1: Ergebnisse des Conover Post-hoc Tests des paarweisen Vergleichs der MMS Konzeptvarianten;

Subskala	Konzept	T-Stat	p	Spearman's r
Nützlichkeit	A B	4.968	<.001	0.742
	A C	2.227	0.030	0.769
	B C	2.741	0.008	0.868
Zufriedenheit	A B	2.809	0.007	0.579
	A C	2.298	0.025	0.800
	B C	0.511	0.611	0.776

User Experience Questionnaire

Die Bewertung der UX erfolgt auf 6 Subskalen mithilfe einer 7 stufigen Skala (-3 bis +3). Der UEQ erfasst hierbei sowohl die pragmatische (Effizienz, Durchschaubarkeit, Steuerbarkeit) als auch die hedonische Qualität (Attraktivität, Stimulation, Originalität) der MMS Konzepte. Die deskriptive Auswertung (Abbildung 6.9) zeigt hohe Bewertungen für alle Subskalen über alle MMS Konzepte hinweg.

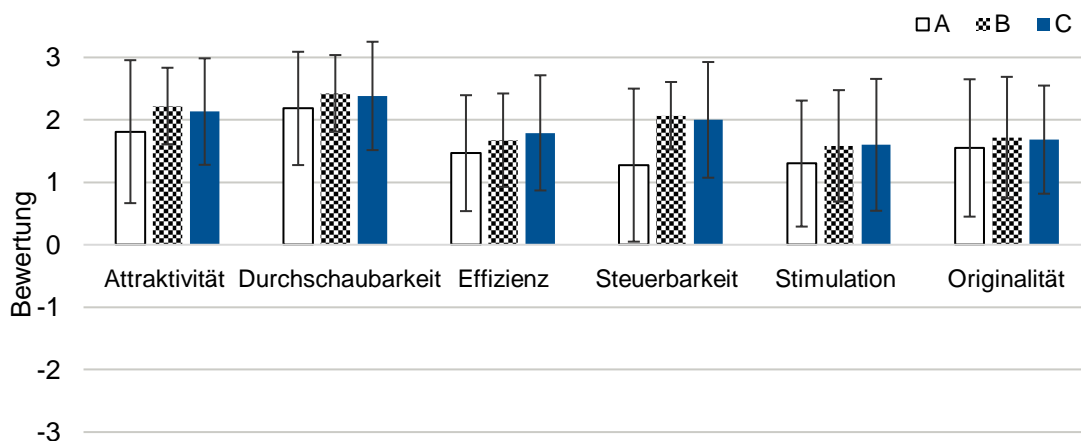


Abbildung 6.9: Deskriptive Darstellung der UEQ Bewertungen (Konzept A: keine zusätzlichen Informationen; Konzept B: Information zeitbasiert; Konzept C: Information distanzbasiert)

Die Skalen Effizienz und Stimulation werden über alle Skalen hinweg am niedrigsten bewertet. Die inferenzstatistische Auswertung (Friedman-Test) ergibt einen signifikanten Effekt für die Skalen Effizienz ($p=0,015$) und Steuerbarkeit ($p=0,001$). Der paarweise Vergleich (Conover's post hoc Test) der Konzepte für beide Skalen ergibt signifikante Unterschiede zwischen Konzept A und B ($p=0,003$) für die Subskala Effizienz. Weitere signifikante Unterschiede bestehen zwischen Konzept A und B ($p=0,001$) sowie Konzept A und C ($p=0,001$) bezüglich der Steuerbarkeit.

Die Ergebnisse des UEQ deuten auf eine gute pragmatische und hedonische Qualität aller MMS Konzepte hin. Die Darstellung zusätzlicher Informationen beeinflusst die Effizienz und Steuerbarkeit positiv. Die distanzbasierte Darstellungsform (C) erreicht bessere Bewertungen hinsichtlich der Steuerbarkeit der MMS und des hochautomatisierten Systems im Vergleich zur zeitbasierten Darstellungsform (B) und der Darstellung ohne zusätzliche Informationen (A).

Qualitativ, explorative Ergebnisse

Um Aussagen bezüglich der grundlegenden Gestaltung der MMS zu erhalten (Informationsgehalt, Verortung der Elemente, Systemverständnis), erfolgt nach der Versuchsfahrt eine qualitative, explorative Befragung der Probanden. Detaillierte Informationen zur Durchführung sind in RICHARDSON ET AL. [172] dargestellt. Folgende Erkenntnisse fließen in die nächste iterative Konzeptoptimierung ein:

- Konsistente Darstellung und Anordnung des Vokabulars und der Informationseinheiten von visuellen und akustischen Anzeigen
- Darstellung des Übernahmegrundes in allen Phasen und Situationen
- Distanzbasierte Darstellung der Dauer der HAF Verfügbarkeit
- Erhöhung des Detaillierungsgrades der Navigations-/Routenansicht
- Entfernung der kontaktanalogen Umrandung anderer Verkehrsteilnehmer in Übernahme-situationen
- Erweiterung des HUD um die Anzeige des Systemstatus und die verbleibende Zeit bis das HAF endet

Das Anzeigekonzept wird auf Basis der Ergebnisse optimiert. Für die Darstellung zusätzlicher kontinuierlicher Informationen wird auf die distanzbasierte Darstellungsform zurückgegriffen.

6.6 Finales Anzeigekonzept

Abbildung 6.10 zeigt die finale Optimierung des Anzeige- und Bedienkonzeptes für das HAF im Lkw. Die gemischte uni- und multimodale Anzeigestrategie besteht aus optischen und akustischen Elementen. Dringliche Warnungen werden multimodal dargestellt, während zeitunkritische, informierende Elemente unimodal rückgemeldet werden. Eine Verärgerung des Fahrers durch unnötig hoch skalierte Meldungen wird somit verhindert.

Die dargestellten Informationen und die Darstellungsart folgen den Erkenntnissen aus der literaturbasierten Anforderungsanalyse sowie der formativen Fokusgruppe (Kapitel 5.1) und des formativen Fahrsimulatorversuchs (Kapitel 5.2).

Das Kombiinstrument zeigt den Statusindikator, eine Manöverübersicht, sowie eine detaillierte Kartendarstellung. Der Grund für die Übernahme wird zentral im Kombidisplay angezeigt. Die Elemente dienen der Erhöhung des Modusbewusstseins des Fahrers.

Das HUD enthält neben Informationen zum aktuellen Systemstatus weiterhin Informationen bezüglich anstehender Manöver, der verbleibenden Zeit bis zu einer Übernahme und zu den aktuell geltenden Verkehrszeichen.

Die LED-Leiste wird genutzt, um den aktuellen Automationsstatus peripher an den Fahrer zurückzumelden. Die Aufmerksamkeit des Fahrers kann somit gezielt erregt und auf relevante Anzeigehalte gelenkt werden.

Das Tablet enthält eine Informationsleiste, die den aktuellen Systemstatus, die Dauer bis zu einer bevorstehenden Übernahme, die aktuell gefahrene Geschwindigkeit und eventuell anstehende Manöver anzeigt. Zur Erhöhung der Steuerbarkeit und Individualisierbarkeit können weitere Informationen über einen zusätzlichen Informationsbutton abgerufen werden. Dieser enthält Informationen zur Navigation und zum Umgebungsverkehr. Die Darstellung zusätzlicher Inhalte auf dem Tablet soll den Workload zum Abrufen zeitunkritischer Informationen reduzieren.

Zusätzlich wird der Aufwand zur Unterbrechung der Nebenaufgabe so gering wie möglich gehalten.

Neben den optischen Anzeigeelementen wird der Fahrer durch Sounds und Sprachansagen unterstützt. So wird der Fahrer über die Verfügbarkeit, Aktivierung und Deaktivierung des hochautomatisierten Systems mithilfe von Auditory Earcons und Sprachansagen informiert bzw. gewarnt.

Der Fahrer wird während der hochautomatisierten Fahrt und in Übernahmesituationen unterstützt. Die entwickelte Übernahmestrategie stellt ein abgestuftes Rückholkonzept dar. Das Anzeigekonzept unterscheidet zwischen langfristigen, vorhersehbaren Übernahmen und kurzfristigen, nicht vorhersehbaren Übernahmen. Entsprechend des zur Verfügung stehenden Zeitbudgets für eine Übernahmeaufforderung wird der Fahrer entweder 3-stufig (türkis-orange-rot) oder 2-stufig (türkis-rot) gewarnt.



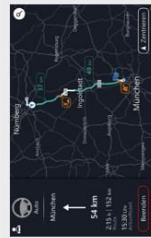




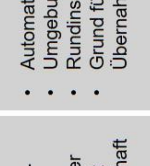
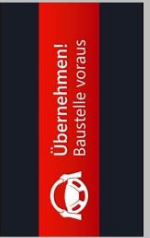
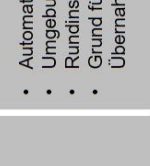
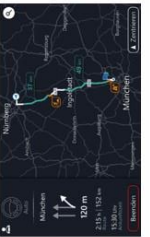

	Zustandsbeschreibung Aufgabenteilung HAF-System und Fahrer	Zustandsdarstellung (Kombiinstrument)	Zustandsdarstellung (Tablet)	Zustandsdarstellung (HUD)	Zustandsdarstellung (LED Leiste + Sound)
Manueller Modus	<ul style="list-style-type: none"> Das HAF-System ist deaktiviert Der Fahrer übernimmt die vollständige Fahraufgabe und ist für die Ausübung der Fahrzeugführung verantwortlich 	<ul style="list-style-type: none"> Automationsindikator Rundinstrumente Umgebungsansicht 			<ul style="list-style-type: none"> LED Leiste: Inaktiv Lenkrad Tasten: Weiß Sound: „Verfügbar“
HAF Aktivierung	<ul style="list-style-type: none"> Das HAF-System ist verfügbar Das HAF-System wird bewusst durch den Fahrer aktiviert 	<ul style="list-style-type: none"> Automationsindikator Rundinstrumente Umgebungsansicht 			<ul style="list-style-type: none"> LED Leiste: Inaktiv Lenkrad Tasten: Weiß Sound + Sprachansage: „Automation aktiviert“
HAF Modus	<ul style="list-style-type: none"> Das HAF-System ist aktiv und kann bestimmte Verkehrssituationen selbstständig lösen Der Fahrer kann sich der Bearbeitung fahrfremder Tätigkeiten widmen 	<ul style="list-style-type: none"> Automationsindikator Umgebungsansicht Navigationkarte 			<ul style="list-style-type: none"> LED Leiste: Türkis Lenkrad Tasten: Inaktiv Sound: -
HAF Übergang	<ul style="list-style-type: none"> Aufgrund einer Systemgrenze wird eine Übernahmeaufforderung durch das HAF-System über die MMS ausgegeben Der Fahrer bemerkt die Notwendigkeit der Unterbrechung der fahrfremden Tätigkeit Der Fahrer stellt die Übernahmebereitschaft her 	<ul style="list-style-type: none"> Automationsindikator Umgebungsansicht Rundinstrumente Grund für die bevorstehende Übernahme 			<ul style="list-style-type: none"> LED Leiste: Orange Lenkrad Tasten: Orange Sprachansage: „Bitte übernehmen Sie in 1300 Metern“
HAF Abschaltung	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer unterbricht die fahrfremde Tätigkeit Der Fahrer stellt den Kontakt mit den Stellteilen (Lenkrad, Pedalerie) her 	<ul style="list-style-type: none"> Automationsindikator Umgebungsansicht Rundinstrumente Grund für die bevorstehende Übernahme 			<ul style="list-style-type: none"> LED Leiste: Rot Lenkrad Tasten: Rot Sprachansage: „Bitte übernehmen Sie in 250 Metern“
Manueller Modus	<ul style="list-style-type: none"> Das HAF-System ist deaktiviert Der Fahrer übernimmt die vollständige Fahraufgabe und ist für die Ausübung der Fahrzeugführung verantwortlich 	<ul style="list-style-type: none"> Automationsindikator Rundinstrumente Umgebungsansicht Darstellung des Grundes der Übernahme 			<ul style="list-style-type: none"> LED Leiste: Inaktiv Lenkrad Tasten: Weiß Sound: „Verfügbar“

Abbildung 6.10: Phasendiagramm der System- und HMI-Zustände

7 Summative Fahrsimulatorstudie zur Erfassung von Langzeiteffekten

Ziel der summativen Fahrsimulatorstudie ist die abschließende Überprüfung des Erfüllungsgrades der entwickelten MMS [158, S. 131]. Die DIN EN ISO 9241-210 [152, S. 9] beschreibt die Erhebung von Daten aus der Langzeitnutzung als möglichen finalen Schritt zur Evaluation von entworfenen Gestaltungslösungen aus Benutzerperspektive.

Längsschnittstudien dienen der Untersuchung individueller Veränderungen über einen längeren Zeitraum hinweg [150, S. 210]. Hierbei wird: „Dieselbe Stichprobe mit zeitlichem Abstand zu mehreren Messzeitpunkten mit demselben Instrument untersucht“ [150, S. 211]. Längsschnittstudien besitzen eine höhere interne [150, S. 204] und externe Validität [150, S. 95]. Die Genauigkeit der Messwerte (Teststärke) wird erhöht, weil die Werte derselben Personen in die Berechnung einfließen [150, S. 208]. Im Vergleich zu Querschnittsstudien mit nur einem Messzeitpunkt, können die gewonnenen Ergebnisse besser auf die Population übertragen werden [150, S. 95]. Weiterhin wird die Interpretation kausaler Zusammenhänge von Gruppenunterschieden vereinfacht [150, S. 204]. Durch den Einsatz des Messwiederholungsdesigns können Versuchspersonen eingespart werden [150, S. 209]. Auftretende, personengebundene Störvariablen können besser kontrolliert bzw. ausgeschlossen werden [150, S. 209].

Nachteile von Längsschnittstudien liegen in einem hohen forschungsökonomischen und logistischen Aufwand [150, S. 214, 151]. Trotz des hohen Erkenntniswerts von Längsschnittstudien werden diese daher nur selten realisiert [150, S. 212]. Weitere Nachteile liegen in der Entstehung von Transfereffekten [150, S. 729], die sich in Ermüdung oder Motivationsverlust seitens der Probanden äußern können. Ein randomisierter Blockplan ist in der Lage, auftretende Transfer- und Sequenzeffekte [150, S. 731] zu kontrollieren.

7.1 Zielsetzung und Fragestellung

Die Intention zur Nutzung und die daraus resultierende tatsächliche Nutzung eines Systems werden durch das Vertrauen des Nutzers in eine Technologie beeinflusst [80, 82, S. 40] (Kapitel 2.4). Nach GHAZIZADEH ET AL. [82, S. 40] erfolgt die Bildung des Vertrauens in mehreren Stufen. Es gilt ein angemessenes Vertrauenslevel zu erreichen, um einen Missbrauch bzw. Nichtnutzung des Systems zu vermeiden [82, S. 40]. Im Rahmen der Arbeit wird die Definition des angemessenen Vertrauens um die Komponente des MM erweitert (Kapitel 2.1.2). So kann angemessenes Vertrauen nur entstehen, wenn der Fahrer ein korrektes MM bezüglich der Systemfähigkeiten und -limitationen besitzt.

Der Untersuchungsschwerpunkt der summativen Fahrsimulatorstudie liegt in der Erfassung auftretender Effekte, die mit zunehmender Systemerfahrung einhergehen und adressiert die

aufgestellte Forschungsfrage F2 (Kapitel 3). Hierbei werden insbesondere die Veränderungen des MM, des Vertrauens, der Akzeptanz und der Nutzungsintention betrachtet.

Auf Basis des aktuellen Standes der Wissenschaft (Kapitel 2.6.1) ergeben sich folgende Fragestellungen und Hypothesen für die Untersuchung des MM (Tabelle 7.1):

Tabelle 7.1: Fragestellungen und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung des mentalen Modells (MM) mit steigender Systemerfahrung

Kodierung	Fragestellung und abgeleitete Hypothesen bezüglich des MM
F2.MM	Wie entwickelt sich das MM mit zunehmender Systemerfahrung?
H1:	Mit zunehmender Systemerfahrung gleicht sich das MM dem tatsächlich implementierten MM an
H0:	Mit zunehmender Systemerfahrung gleicht sich das MM nicht dem tatsächlich implementierten MM an

Auf Basis erster Studienergebnisse von GOLD ET AL. [179] und HERGETH ET AL. [180] werden folgende Hypothesen zur Entwicklung des Vertrauens abgeleitet (Tabelle 7.2):

Tabelle 7.2: Fragestellung und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung des Vertrauens (VT) und Misstrauens (MT) mit steigender Systemerfahrung

Kodierung	Fragestellung und abgeleitete Hypothesen bezüglich des globalen VT/ MT
F2.VT	Wie entwickelt sich das Vertrauen mit zunehmender Systemerfahrung?
H1:	Mit zunehmender Systemerfahrung steigt das VT
H0:	Mit zunehmender Systemerfahrung sinkt bzw. bleibt das VT gleich
F2.MT	Wie entwickelt sich das Misstrauen mit zunehmender Systemerfahrung?
H1:	Mit zunehmender Systemerfahrung sinkt das MT
H0:	Mit zunehmender Systemerfahrung steigt bzw. bleibt das MT gleich

Um herauszufinden, wie sich die Nutzungsintention mit zunehmender Systemerfahrung entwickelt, wird folgende Fragestellung untersucht (Tabelle 7.3):

Tabelle 7.3: Fragestellung und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung der Nutzungsintention (NI) mit zunehmender Systemerfahrung

Kodierung	Fragestellung und abgeleitete Hypothesen bezüglich der Nutzungsintention (wahrgenommene Nützlichkeit (WN) / Nutzerfreundlichkeit (NF))
F2.NI	Wie entwickelt sich die Nutzungsintention mit zunehmender Systemerfahrung?
H1	Mit zunehmender Systemerfahrung steigt die WN
H0₁	Mit zunehmender Systemerfahrung sink bzw. bleibt die WN gleich
H2	Mit zunehmender Systemerfahrung steigt die NF
H0₂	Mit zunehmender Systemerfahrung sink bzw. bleibt die NF gleich

Die Nutzerakzeptanz bezüglich eines Systems kann sich mit zunehmender Systemerfahrung verändern. Um entstehende Entwicklungsprozesse zu untersuchen, werden folgende Fragestellung und Hypothesen aufgestellt (Tabelle 7.4):

Tabelle 7.4: Fragestellung und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung der Akzeptanz (A) mit steigender Systemerfahrung

Kodierung	Fragestellung und abgeleitete Hypothesen bezüglich der Akzeptanz
F2.A	Wie entwickelt sich die Akzeptanz (Nützlichkeit/ Zufriedenheit) mit zunehmender Systemerfahrung?
H1	Mit zunehmender Systemerfahrung steigt die Nützlichkeit
H0₁	Mit zunehmender Systemerfahrung sinkt bzw. bleibt die Nützlichkeit gleich
H2	Mit zunehmender Systemerfahrung sinkt die Zufriedenheit
H0₂	Mit zunehmender Systemerfahrung steigt bzw. bleibt die Zufriedenheit gleich

7.2 Experimentelles Design

Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht über den Versuchsaufbau, das gewählte Versuchsdesign, die Ableitung geeigneter Testsznarien und die im Versuch verwendeten Materialien. Abschließend folgt die Beschreibung der Stichprobe.

7.2.1 Versuchsaufbau

Die Studie wird am dynamischen Lkw-Fahrsimulator des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der TUM durchgeführt (Kapitel 6.5.2). Der Versuch wird ohne Bewegungssystem durchgeführt.

7.2.2 Versuchsdesign

Untersuchungsgegenstand des zugrundeliegenden Versuchs ist die Erfassung von Langzeiteffekten bezüglich der Entwicklung des MM und der Vertrauenskalibrierung in ein hochautomatisiertes System mit zunehmender Systemerfahrung.

Für die Erfassung von Lernerfolgen empfehlen DÖRING & BORTZ [150, S. 212] die Anwendung von Längsschnittstudien. Bei dem gewählten Versuchsdesign handelt es sich folglich um ein explorativ, explanativ, experimentelles Design mit Messwiederholung (within-subject design) in Form einer Längsschnittstudie [150, S. 183]. Die Anzahl der Versuchsfahrten stellt die unabhängige Variable (UV) dar. Die Erfassung des Vertrauens (global und situationsspezifisch), der Akzeptanz und des MM mit zunehmender Systemerfahrung bilden die abhängigen Variablen.

Es existieren keine Vorgaben bezüglich der Zeitspanne für Längsschnittstudien. Vielmehr hängt die Wahl der Zeitspanne von der zu untersuchenden Forschungsfrage ab [150, S. 212]. Um einen ersten Anhaltspunkt zur Entwicklung eines geeigneten Versuchsdesigns zu erhalten, werden die in Kapitel 2.6 vorgestellten Erkenntnisse aus der Literatur herangezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Probanden im Durchschnitt nach vier Fahrten in der Lage sind, die Systemfähigkeiten und -grenzen des ACC Systems korrekt einzuschätzen. Um eine vollständige Stabilisierung des MM erfassen zu können, werden für den zugrundeliegenden Versuch fünf Fahrten festgelegt. Die Dauer der Versuchsfahrten und Unterbrechungsabstände orientieren sich an den in der Literatur gefundenen Erkenntnissen. Es wird eine Fahrdauer von 45 Minuten und eine Interaktionspause von sieben Tagen angenommen. Mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 80 km/h für Lkw im Fernverkehr ergibt sich eine durchschnittliche Streckenlänge von 60 km pro Fahrt.

Das MM wird insgesamt sieben Mal erhoben (Abbildung 7.4). Die Abfrage des globalen Vertrauens erfolgt jeweils vor und nach den Fahrten. Die Erhebung des situationsspezifischen Vertrauens erfolgt innerhalb der simulierten Fahrt direkt nach jeder auftretenden Situation (Abbildung 7.4).

7.2.3 Testzenarien und Versuchsstrecken

KIENLE ET AL. [181, S. 185] unterscheiden in ihrer Ontologie für Test- und Prüfzenarien zwischen Szenarien und Situationen. Ein Szenario kann als Grundgerüst betrachtet werden (bspw. eine Kreuzung), das mehrere Situationen (bspw. links/rechts abbiegen) beinhaltet. Situationen stellen folglich eine Untermenge eines Szenarios dar [21, S. 185, 181, S. 186]. Die Auswahl geeigneter Testszenarien und -situationen für den zugrundeliegenden Versuch orientiert sich an den Empfehlungen des RESPONSE CODES OF PRACTICE [182], von BREUER [183], NAUJOKS ET AL. [184] und GOLD ET AL. [185].

NAUJOKS ET AL. [184, S. 5] empfehlen relevante Prüfzenarien aus den vorherrschenden Definitionen zum automatisierten Fahren (Kapitel 2.2.1) abzuleiten. Die Fähigkeiten und Limitationen des automatisierten Systems sollen explizit mit einbezogen werden. Für die Überprüfung eines

hochautomatisierten Systems (Level 3) sollten folgende Kategorien durch repräsentative Situationen abgedeckt sein:

- Fehlerfreies System: Das System ist aktiviert und funktioniert fehlerfrei
- System nicht verfügbar: Das System ist in einem spezifischen Anwendungsfall nicht verfügbar
- Systemausfall: Erreichen einer Systemgrenze
- Übergabe: Das System erreicht eine Systemgrenze und gibt die Fahrzeugführung an den Fahrer ab.

Der RESPONSE-COP [182] schlägt eine zusätzliche Einteilung relevanter Prüfscenarien anhand einer Wahrheitsmatrix vor, die den Fahrer, das Fahrzeug und die Umgebung einbezieht:

- Richtig positiv: Das System reagiert korrekt in einer Nutzungssituation
- Falsch positiv: Situationen, in denen das automatisierte System nicht reagieren soll, dies aber aufgrund sensorischer Einschränkungen tut
- Richtig negativ: Erreichen einer Systemgrenze
- Falsch negativ: Ausbleiben einer erwarteten Systemreaktion

BREUER et al. [171, S. 186] empfehlen für die Bewertung der MMS eine Ableitung der Situationen anhand der Auftretenswahrscheinlichkeit der Situation im realen Straßenverkehr. Eine Reduktion der Prüfscenarien kann über den „Worst-Case“- Ansatz erfolgen. Hierbei werden die kritischsten Situationen als Prüfsituationen herangezogen.

GOLD ET AL. [185, S. 554] erweitern die Erkenntnisse und postulieren eine Einteilung der Prüfscenarien anhand der Faktoren Dringlichkeit, Vorhersagbarkeit, Kritikalität und der Fahrerreaktion. Die Faktoren werden weiterhin in die Schwierigkeitslevel gering, mittel und hoch eingeteilt. GOLD ET AL. [185, S. 557] empfehlen für die Evaluation einer MMS für das HAF die Auswahl von Testszenarien aus allen Kategorien und Schwierigkeitsstufen.

Für den vorliegenden Versuch werden die Situationshäufigkeiten, -längen und -reihenfolge in einem mehrstufigen Prozess erstellt, um ein Abbild der Realität zu schaffen. Der detaillierte methodische Ablauf zur Erfassung und Randomisierung der Verkehrssituationen ist in (Anhang C) beschrieben.

Das Ergebnis des Erfassungs- und Randomisierungsprozesses bilden 12 Verkehrssituationen, die sich in sieben systemseitig handhabbare (SH) und fünf Übernahme-situationen aufteilen lassen. Die Übernahme-situationen lassen sich weiterhin in zwei langfristige, vorhersehbare (LÜ) und drei kurzfristige, unvorhersehbare Übernahmen (KÜ) kategorisieren.

Systemseitig handhabbare Verkehrssituationen

Unter SH werden Verkehrssituationen verstanden, die das hochautomatisierte System selbständig erkennt und löst (Abbildung 7.1). Ein Eingreifen des Fahrers bzw. eine Unterbrechung der FFT ist nicht nötig. Zu den systemseitig handhabbaren Situationen zählen die freie Fahrt, die Fahrgasse, Streckenabschnitte mit Geschwindigkeitsbegrenzung, aufkommender Stau, Durchführung einer Notbremsung, Durchführung eines Überholmanövers, Durchfahren einer Baustelle mit gelben Ersatzfahrstreifenmarkierungen.

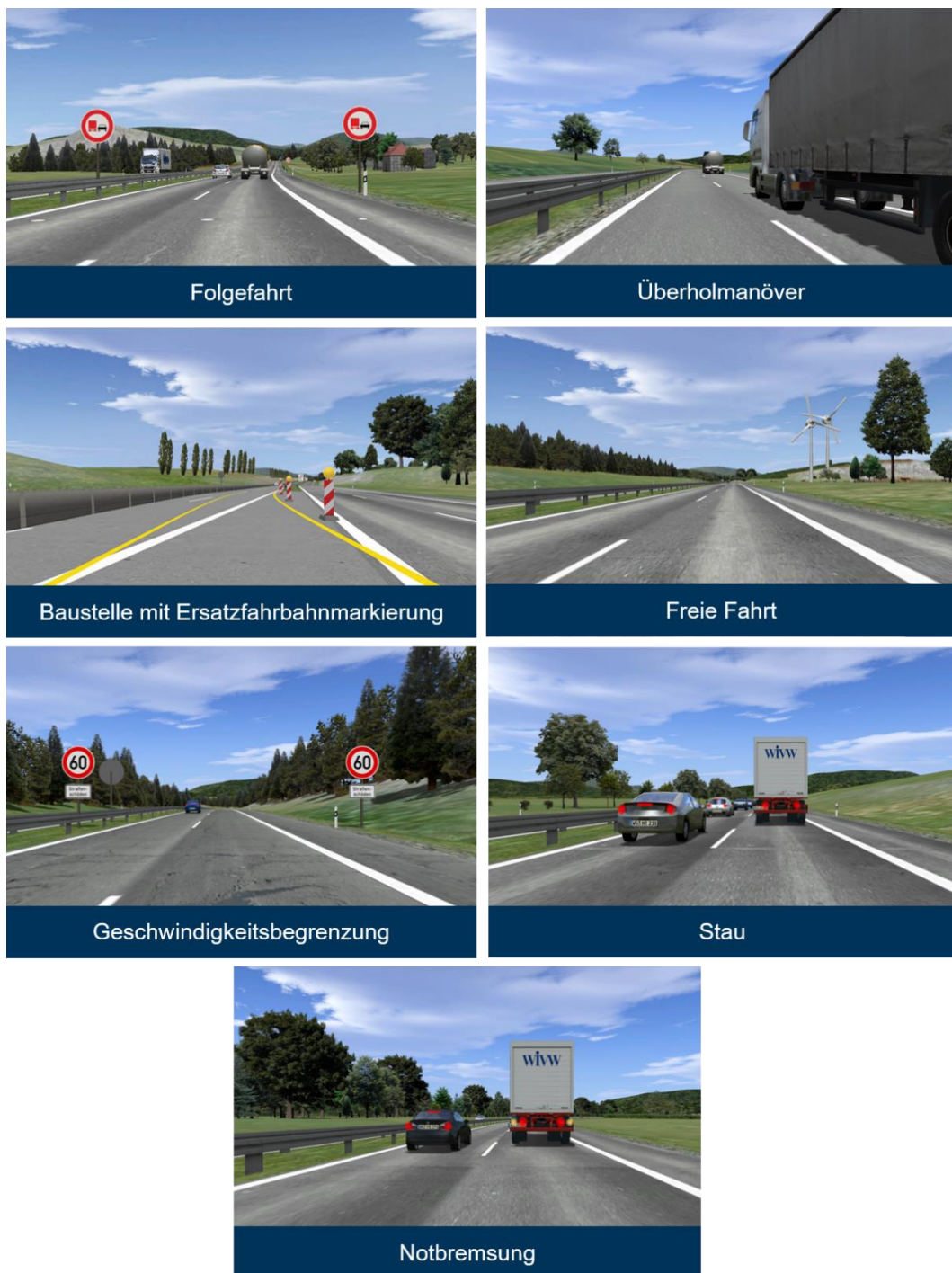


Abbildung 7.1: Darstellung der systemseitig handhabbaren (SH) Testsituationen

Kurzfristige, unvorhersehbare Übernahmesituationen

Zu den KÜ zählen Witterungsbedingungen (Regen), fehlende Fahrbahnmarkierungen oder ein Sensorausfall, bspw. durch Verschmutzung (Abbildung 7.2). Für eine KÜ stehen dem Fahrer 250 Meter (10 Sekunden) zur Verfügung. Die Warnung erfolgt mithilfe einer zweistufigen Warnkaskade (türkis-rot) (Abbildung 6.10).

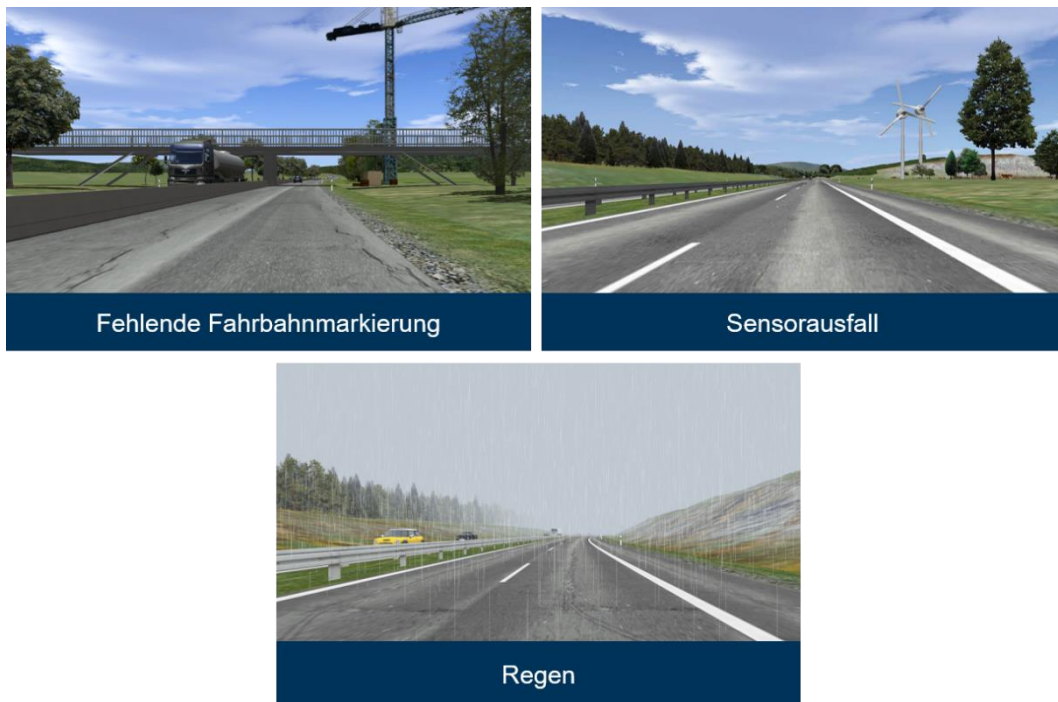


Abbildung 7.2: Darstellung der kurzfristigen, unvorhersehbaren Übernahmesituationen (KÜ)

Langfristige, vorhersehbare Übernahmesituationen

Unter LÜ werden Situationen zusammengefasst, die durch GPS und Kartendaten vorhergesagt werden können. Hierzu zählen Dauerbaustellen sowie Autobahnauf- und -abfahrten (Abbildung 7.3). Bei dem Auftreten einer LÜ warnt das System den Fahrer 1300 Meter (60 Sekunden) vor der anstehenden Übernahme mithilfe der dreistufigen Warnkaskade (türkis-orange-rot) (Abbildung 6.10).

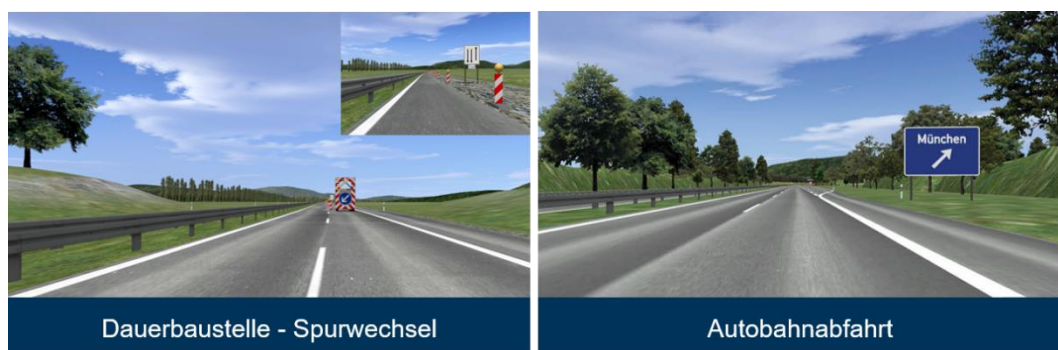


Abbildung 7.3: Darstellung der langfristigen, vorhersehbaren Übernahmesituationen (LÜ)

Versuchsstrecken und Randomisierung

Ergebnis des Randomisierungsprozesses bilden fünf unterschiedliche Versuchsstrecken (Strecke A-E), die jeweils 12 oder 13 Verkehrssituationen enthalten. Das Auftreten von handhabbaren Situationen sowie KÜ und LÜ ist über alle Versuchsstrecken randomisiert, um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden. Die Versuchsstrecken werden in fünf Randomisierungsgruppen aufgeteilt

(Tabelle 7.5). Reihenfolgeeffekte sollen vermieden werden. Die Strecken werden folglich so randomisiert, dass dieselben Streckensequenzen (bspw. Strecke A - Strecke B) so wenig wie möglich auftreten. Die Zuordnung der Probanden zu den Randomisierungsgruppen erfolgt nach dem Zufallsprinzip.

Tabelle 7.5: Permutationsplan der zu durchfahrenden Strecken A-E pro Randomisierungsgruppe (RG)

RG	Fahrt 1	Fahrt 2	Fahrt 3	Fahrt 4	Fahrt 5
1	Strecke A	Strecke B	Strecke D	Strecke C	Strecke E
2	Strecke B	Strecke C	Strecke A	Strecke E	Strecke D
3	Strecke C	Strecke D	Strecke B	Strecke E	Strecke A
4	Strecke D	Strecke E	Strecke B	Strecke A	Strecke C
5	Strecke E	Strecke A	Strecke D	Strecke C	Strecke B

7.2.4 Material

Nachfolgend werden alle für das Experiment verwendeten Materialien aufgelistet und beschrieben. Hierbei handelt es sich um die Fragebögen und die Instruktionen der Versuchsteilnehmer.

Demographischer Fragebogen

Der demographische Fragebogen erfasst Alter, Geschlecht, Dauer des Führerscheinbesitzes, Fahrleistung pro Woche, die vorrangige Erwerbstätigkeit (Nah-, Regional-, Fernverkehr) sowie die Erfahrung mit FAS und Simulatoren. Die Technikbereitschaft und Persönlichkeit der Stichprobe werden subjektiv mit Fragebögen erfasst.

Erfassung der Technikbereitschaft

Die Technikbereitschaft der Stichprobe wird mithilfe der Kurzsкала von NEYER ET AL. [178] auf einer 5 stufigen Likert Skala (1 = stimmt gar nicht; 5 = stimmt völlig) erfasst. Der Fragebogen besteht aus 12 Items, die den drei Subskalen Technikakzeptanz (4 Items), Technikkompetenzüberzeugung (4 Items) und Technikkontrollüberzeugung (4 Items) zugeordnet werden können. Die Technikbereitschaft ergibt sich aus dem Mittelwert der drei Subskalen.

Erfassung der Persönlichkeit

Zur Erfassung der Persönlichkeitsmerkmale der Probanden wird der standardisierte Big Five Inventory 10 (BFI-10) Fragebogen eingesetzt, der die fünf Hauptdimensionen der Persönlichkeit (Neurotizismus, Extraversion, Offenheit für Erfahrungen, Verträglichkeit, Gewissenhaftigkeit) mit insgesamt 10 Items erfasst [186]. Personen mit einer hohen Neurotizismusausprägung neigen zu Unsicherheit, reagieren nervös, ängstlich oder deprimiert. Extraversion beschreibt Merkmale wie Geselligkeit, Aktivität, Gesprächigkeit und Durchsetzungsfähigkeit. Offenheit für neue Erfahrungen beschreibt das Interesse an neuen Erfahrungen. Personen mit einer hohen Ausprägung sind wissbegierig, phantasievoll und intellektuell. Die Dimension Verträglichkeit bezieht sich auf

das interpersonelle Verhalten. Personen mit einer hohen Verträglichkeitsausprägung sind altruistisch, kooperativ und nachgiebig. Gewissenhafte Personen sind zielstrebig, ausdauernd, diszipliniert und zuverlässig [186, S. 234].

Die Probanden bewerten die 10 Aussagen auf einer fünfstufigen Likert-Skala („1= trifft überhaupt nicht zu“, „5= trifft voll und ganz zu“). Jede Hauptdimension der Persönlichkeit wird durch zwei Items repräsentiert. Durch die Erfassung der Persönlichkeit kann die Ebene des veranlagten Vertrauens des 3-Ebenen Modells nach HOFF & BASHIR [85] (Kapitel 2.3.2) bestimmt werden.

Erfassung des Vertrauens

Das Vertrauen der Probanden in das hochautomatisierte System und die MMS wird zweistufig erfasst.

Die globale Erhebung des Vertrauens nach jeder Versuchsfahrt erfolgt mithilfe des standardisierten multi-item Fragebogens von PÖHLER ET AL. [187], der speziell für die Erfassung des Vertrauens in automatisierte Systeme entwickelt ist. Die Probanden bewerten 11 Aussagen auf einer siebenstufigen Likert-Skala („1= trifft gar nicht zu“ bis „7= trifft völlig zu“), die sich auf die Funktionsweise des hochautomatisierten Systems beziehen. Der Fragebogen lädt auf den zwei Subskalen Vertrauen (6 Items) und Misstrauen (5 Items). PÖHLER ET AL. [187] sehen die Konstrukte Misstrauen und Vertrauen als separate Dimensionen, daher werden diese getrennt ausgewertet.

Um den Einfluss der jeweiligen Situation auf das Vertrauen kontinuierlich während der Durchführung zu erheben, wird das Vertrauen weiterhin mithilfe eines Single-Items erhoben [141]. Die Probanden bewerten während der Simulation nach dem Auftreten einer Situation ihr aktuelles Vertrauen. Sie beantworten hierfür auf einer 100-stufigen Ratingskala die Frage, in welchem Ausmaß sie der Automation in der gerade erlebten Situation vertrauen. BELLER ET AL. [141], BROWN & GALSTER [188] und HERGETH [189, 190] wenden Single-Item Verfahren an und kommen zu dem Schluss, dass das Verfahren eine valide Methode darstellt, um situationsbedingtes Vertrauen in automatisierte Systeme zu erfassen.

Erfassung des mentalen Modells

Die Erfassung des MM der Probanden erfolgt anhand eines neu entwickelten und validierten Fragebogens von RICHARDSON ET AL. [191]. Die Fragebogenentwicklung erfolgt in einem mehrstufigen Verfahren, bestehend aus Itemsammlung, Kategorisierung und Reduktion. Die Kategorisierung und Reduktion der Items findet im Rahmen eines Expertenworkshops (N= 3) statt. Die Validierung des Fragebogens erfolgt mit N= 89 Personen (Lkw-Berufsschüler) mithilfe eines A/B Tests.

Eine anschließende Optimierung führt zu einem Fragebogen, der das Wissen der Probanden bezüglich der Systemeigenschaften, -fähigkeiten und -limitationen des hochautomatisierten Systems mithilfe von 27 Items (19 Messitems, 8 Distraktoren) erfasst. Die Bewertung der Items erfolgt auf einer 6-stufigen Likert-Skala von (1) „trifft überhaupt nicht zu“, bis (6) „trifft voll und ganz zu“. Die gerade Anzahl an Stufen erzwingt die Rückmeldung einer Tendenz. Durch den mehrfachen Einsatz des Fragebogens geben die erhobenen Daten Auskunft über die Entwicklung des MM mit steigender Systemerfahrung.

Erfassung der Akzeptanz und Nutzungsintention

Zur Erfassung der Akzeptanz des Systems wird erneut der Fragebogen von VAN DER LAAN ET AL [175] verwendet (Kapitel 6.5.3). Um die Intention zur Nutzung zu bestimmen, wird die wahrgenommene Nützlichkeit und Nutzerfreundlichkeit erfasst. Nach DAVIS [87] und GHAZIZADEH ET AL. [82] besteht ein direkter Zusammenhang zwischen diesen beiden Konstrukten und der Intention zur Nutzung.

Die wahrgenommene Nützlichkeit erfasst den Einfluss des hochautomatisierten Systems auf die Verbesserung der Arbeitsleistung (z.B. „Die Nutzung hochautomatisierter Systeme verbessert meine Arbeitsleistung“). Die Nutzerfreundlichkeit beschreibt die Interaktion des Nutzers mit dem hochautomatisierten System (z.B. „Das hochautomatisierte System ist einfach zu bedienen“, „Meine Interaktion mit dem hochautomatisierten System ist klar und verständlich“). Eine detaillierte Auflistung aller Items kann in Anhang D eingesehen werden. Die wahrgenommene Nützlichkeit und Nutzerfreundlichkeit werden jeweils mit sechs Items auf einer fünfstufigen Likert-Skala (-2 „trifft gar nicht zu“ bis +2 „trifft voll zu“) erfasst.

Fahrfremde Tätigkeit

Um das Vertrauen der Probanden in das hochautomatisierte System objektiv zu erfassen, werden dem Probanden verschiedene Beschäftigungsmöglichkeiten auf dem Tablet dargeboten. HERGETH [190] stellt einen Zusammenhang zwischen der Beschäftigung mit einer Nebentätigkeit und dem Vertrauenslevel fest. Eine erhöhte Nebenaufgabenbearbeitung während automatisierter Fahrt geht mit erhöhten Vertrauenswerten einher. Eine geringe oder ausbleibende Bearbeitung von FFT deutet auf ein geringes Vertrauenslevel seitens des Probanden in das automatisierte System hin. Für die Erfassung der Zuwendung zur FFT werden die Blicke der Probanden mithilfe des Blickerfassungssystems SmartEye Pro 7.0 aufgezeichnet. Die Blickauswertung dient als objektives Vertrauensmaß.

Die Auswahl der Aufgaben orientiert sich an einem durch Experten entworfenen Aufgabenkatalog. Hierbei handelt es sich um berufs- (Routenplanung, E-Mails schreiben) und freizeitbezogene (Trucker-Quiz, Zeitungsartikel lesen, Videos schauen) Aufgaben. Die Aufgaben werden in Form von Apps auf dem Tablet dargeboten. Der Proband erhält den Hinweis, dass die Bearbeitung von Aufgaben während der Versuchsfahrt freiwillig ist.

7.2.5 Versuchsablauf

Der Versuchszeitraum erstreckt sich über eine Dauer von 6 Wochen (Abbildung 7.4). In Woche eins findet eine Einführung in den Simulator und eine Vorbefragung statt (demographische Daten, Technikbereitschaft, Persönlichkeit). Vor der ersten Fahrt wird zusätzlich das aktuell vorherrschende MM der Probanden bezüglich hochautomatisierter Systeme erfasst. Diese Daten bilden die Baseline bzw. das individuelle Ausgangsniveau des Lernprozesses. Nach der Erfassung des MM, werden die Probanden über die Fähigkeiten und Limitationen des hochautomatisierten Systems aufgeklärt. Die Aufklärung orientiert sich an den Richtlinien des VDA. Die Möglichkeit des Auftretens von Systemfehlern wird angesprochen. Die Probanden werden gebeten das hochautomatisierte System immer zu aktivieren, sobald es verfügbar ist. Während der folgenden Eingewöhnungsfahrt wird das Aktivieren und Deaktivieren der HAF-Funktion mithilfe der Lenkradtasten und die Single-Item Vertrauensabfrage („Auf einer Skala von 0-100: Wie sehr vertrauen Sie dem hochautomatisierten System insgesamt zum jetzigen Zeitpunkt?“) geübt.

Während der Versuchsfahrt wird das situationspezifische Vertrauen der Probanden kontinuierlich erfasst. Im Anschluss an die Versuchsfahrt wird das MM, das Vertrauen sowie die Akzeptanz und die Nutzungsintention abgefragt.

In Woche 2-5 erhalten die Probanden keine erneute Einweisung in das hochautomatisierte System. Weiterhin gibt es keine verpflichtende Eingewöhnungsfahrt. Das situationspezifische Vertrauen wird erneut während der Fahrt erfasst. Nach jeder Fahrt wird das Vertrauen, die Akzeptanz und die Nutzungsintention erhoben. Die Erfassung des MM erfolgt ebenfalls nach der Fahrt. Die Abfragezeitpunkte folgen jedoch einem randomisierter Blockplan (Kapitel 7). Dies bedeutet, dass nicht jeder Proband nach jeder Fahrt bezüglich seines MM befragt wird. Reflexionsprozesse können somit in der späteren Auswertung quantifizieren werden.

In Woche 6 findet eine online Nachbefragung statt, bei der die Probanden nochmals den Fragebogen zur Erfassung des MM für hochautomatisierte Systeme ausfüllen. Hierdurch sollen eventuell auftretende Vergessensprozesse erfasst werden.

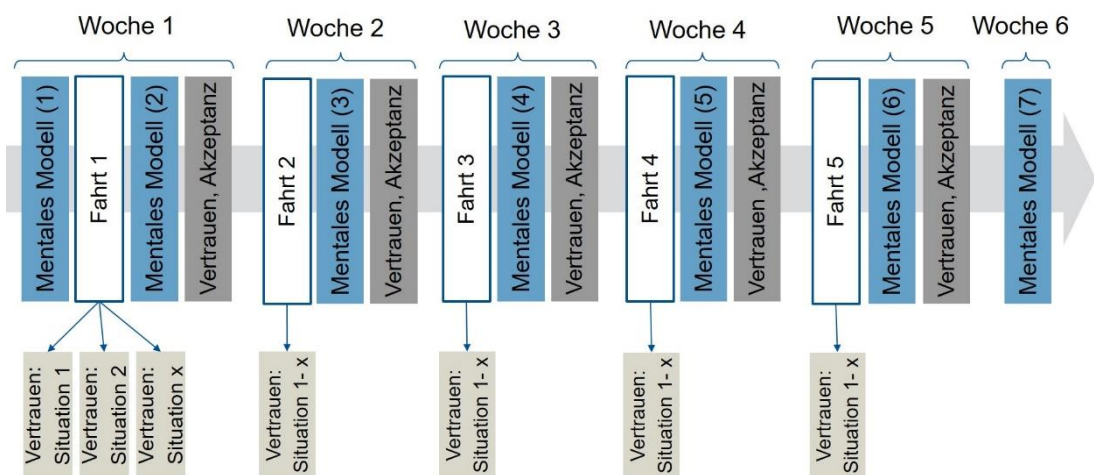


Abbildung 7.4: Versuchsablauf und Abfragezeitpunkte über einen Versuchszeitraum von 6 Wochen

7.2.6 Beschreibung des Probandenkollektivs

Für den Versuch werden ausschließlich Probanden mit einem gültigen Lkw Führerschein Klasse C/ CE eingeladen, um die Validität der Messwerte zu garantieren. Die Stichprobe besteht aus 21 Probanden (19 männlich, 2 weiblich) mit einem Alter von 26 -79 Jahren (MW=53,43 Jahre; SD=10,1). Neun Lkw-Fahrer geben an, hauptberuflich, sechs Fahrer früher hauptberuflich und sechs nebenberuflich mit dem Lkw unterwegs zu sein.

Nach NIELSEN [168] reichen 20 Probanden aus, um statistische Effekte bei Querschnittsuntersuchungen nachweisen zu können. Der RESPONSE COP [182, S. 15] nennt ebenfalls eine Mindestanzahl von 20 gültigen Datensätzen, um einen grundlegenden Hinweis für Validität zu liefern [171, S. 185]. Durch das gewählte Versuchsdesign mit Messwiederholung weisen die Daten einen höheren Informationsgehalt auf. Im Vergleich zu Querschnittsstudien können Probanden eingespart werden. Eine Anzahl von 21 Probanden wird folglich für die Durchführung der vorliegenden Fahrsimulatorstudie als ausreichend angesehen.

Das Durchschnittsalter der Berufskraftfahrerpopulation steigt in den letzten Jahren kontinuierlich. So setzt sich die Gruppe der über 50-jährigen im Jahr 1999 aus 23,9 % zusammen, 2005 aus

29,6 % [192, S. 6], 2012 aus 39,8 % [2, S. 21] und 2014 aus 45,1 % [2]. Das erhöhte Durchschnittsalter der vorliegenden Stichprobe repräsentiert den steigenden Trend [2, S. 21].

Die Erfassung der Vorerfahrung mit FAS ergibt, dass alle Fahrer einen Tempomaten kennen und diesen oft (31 %) oder immer (48 %) nutzen. 19 Fahrer geben an, das ACC zu kennen. Lediglich 24 % nutzen dieses immer, während 29 % nie das ACC nutzen. Der Spurverlassenswarner ist 16 Probanden bekannt. Sieben Lkw-Fahrer geben an, den Spurwechselassistent zu kennen. Die Erfassung der Fahrsimulatorerfahrung im Kontext automatisierter Systeme ergibt, dass 14 Lkw-Fahrer noch nie an einem Fahrsimulatorversuch zum automatisierten Fahren teilgenommen haben.

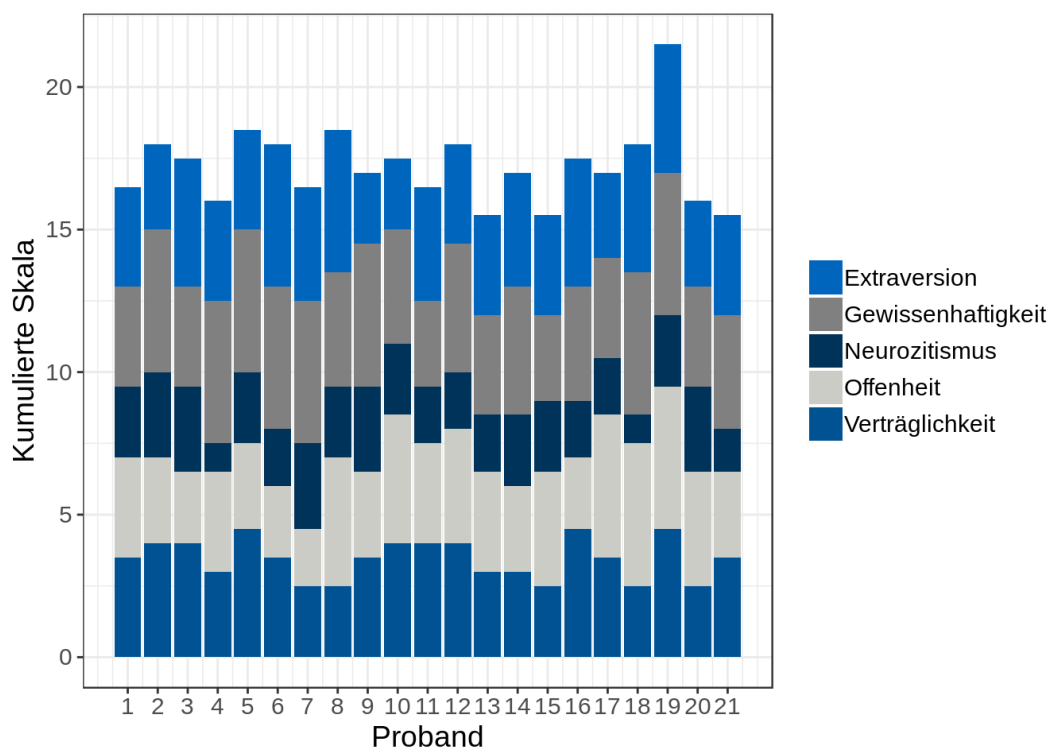


Abbildung 7.5: Ergebnisse des BFI-10 Persönlichkeitsfragebogens

Die Analyse ergibt eine hohe Technikbereitschaft der Stichprobe mit einem MW von 4,03 (M: Technikakzeptanz: 3,93; MW Technikkompetenz: 4,31; MW Technikkontrollüberzeugung 3,86). Die deskriptive Auswertung der Persönlichkeit der Stichprobe mithilfe des BFI-10 Fragebogens zeigt Abbildung 7.5. Die Auswertung zeigt über alle Probanden geringe Neurotizismusaussprägung (MW: 2,29) und hohe Werte der Dimensionen Offenheit für neue Erfahrungen (MW:3,55) und Gewissenhaftigkeit (MW:4,21). Ein Vergleich mit den Werten einer Referenzstichprobe nach RAMMSTEDT ET AL. [193, S. 27-29] weist keine Unterschiede auf (Anhang F).

7.3 Ergebnisse

Die Ergebnisdarstellung spiegelt die in Kapitel 7.1 eingeführten abhängigen Variablen der Untersuchungskategorien MM, Vertrauen während der Fahrt, Vertrauen vor und nach der Fahrt, Akzeptanz und Nutzungsintention wider. Durch Längsschnittstudien erhobene Daten ziehen den Einsatz spezieller statistischer Auswertungsverfahren nach sich [150, S. 212-213].

Neben einer deskriptiven Analyse der Daten erfolgt eine inferenzstatistische Auswertung mithilfe eines generalisierten additiven gemischten Modells (GAMM) [194]. Dieses eignet sich besonders für die Untersuchung korrelierter, longitudinaler Daten bzw. für Untersuchungen mit Messwiederholungen. Das Modell bezieht bei der Berechnung feste Populationseffekte und individuenspezifische zufällige Effekte mit ein. Feste Effekte stehen hierbei für Effekte der unabhängigen Variable, die über die gesamte Population als gleich angenommen werden können. Die zufälligen Effekte beschreiben den latenten Einfluss eines jeden Individuums auf die Werte der abhängigen Variablen. Da jedes Individuum über ein eigenes Ausgangsniveau beim Lernen verfügt, das über zufällige Effekte modelliert werden kann, wird ein GAMM geschätzt. Durch den Einsatz von Fragebögen können Priming Effekte entstehen. Priming beschreibt die Beeinflussung der Verarbeitung eines Reizes. Im vorliegenden Fall beeinflusst das Lesen des Fragebogens die Wahrnehmung des Probanden während der Simulation. Die entstehenden Priming Effekte, werden durch den randomisierten Blockplan erfasst, aus den Daten geschätzt und bei der GAMM Modellierung berücksichtigt.

Alle Ergebnisse zu den aufgestellten Hypothesen und Forschungsfragen werden auf eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$ festgelegt [150, S. 640]. Die Auswertung erfolgt in R (Version 3.4.3).

7.3.1 Entwicklung des mentalen Modells

Die Darstellung und inferenzstatistische Prüfung der Entwicklung des MM erfolgt zunächst global über das gesamte Probandenkollektiv. In einem zweiten Schritt erfolgt die MM Analyse auf Probandenebene.

Globale Entwicklung

Abbildung 7.6 zeigt die Verteilung der Korrektheit des MM im Probandenkollektiv über alle Befragungszeitpunkte (BZP, 0 \triangleq Baseline; 1-5 \triangleq Fahrt 1-5; 6 \triangleq Nachbefragung).

Zwischen den BZP 1-6 liegen jeweils sieben Tage. Die Korrektheit des MM wird auf einer 6-stufigen Skala erhoben. Werte von 1-3 kennzeichnen ein eher inkorrektes MM während der Wertebereich von 4-6 ein eher korrektes MM darstellt. Die deskriptive Auswertung (Abbildung 7.6) zeigt, dass die Gesamtheit der Probanden von Beginn an über ein eher korrektes MM verfügt (Tabelle 7.6).

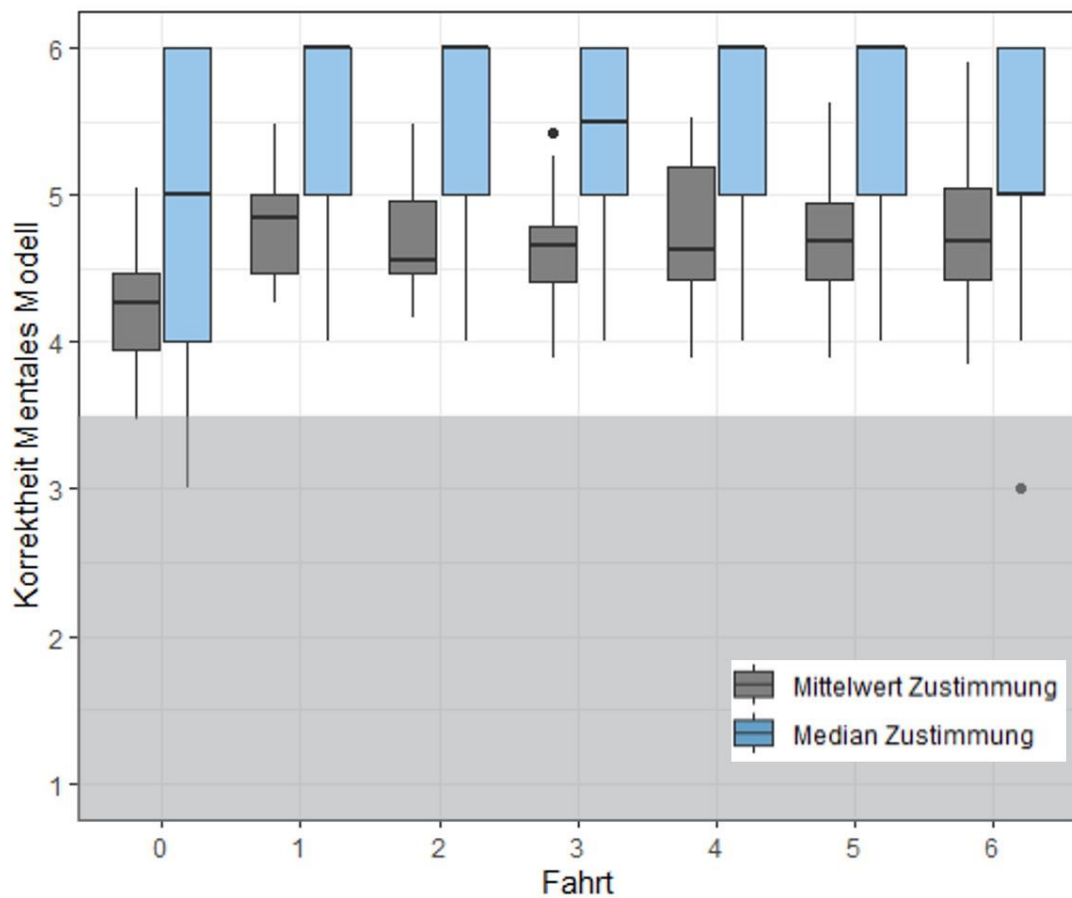


Abbildung 7.6: Darstellung der globalen Entwicklung des MM über alle 7 BZP (Wertebereich 1-3 $\hat{=}$ eher inkorrekt; Wertebereich 4-6 $\hat{=}$ eher korrekt)

Die Betrachtung der mittleren Zustimmung zeigt einen leicht steigenden Trend zwischen BZP 0 und BZP 1 bis 5. Die Nachbefragung (BZP 6) ergibt keinerlei Veränderungen zu BZP 5. Die Darstellung des MD der Zustimmung über die verschiedenen BZP zeigt eine höhere Varianz der Messwerte bei BZP 0 im Vergleich zu BZP 1-6.

Tabelle 7.6: Deskriptive Statistik (MW, MD und SD) des globalen MM über alle BZP und alle Probanden

BZP	Mittelwert (MW)	Median (MD)	Standardabweichung (SD)
0	4,22	5	1.78
1	4,79	6	1.64
2	4,71	5	1.58
3	4,62	5	1.63
4	4,74	6	1.71
5	4,68	6	1.75
6	4,73	5	1.63

Ein generalisiertes additives gemischtes Modell (GAMM) prüft die deskriptiven Unterschiede inferenzstatistisch [194]. Der MW der Zustimmung stellt die Zielgröße dar. Das GAMM (mgcv R-Paket) berücksichtigt bei der Modellierung zufällige und nichtlineare Effekte. Es wird davon ausgegangen, dass jeder Proband über ein individuelles Lerngrundniveau verfügt. Weiterhin wird ein probandenspezifischer Lernverlauf über die Fahrten und ein probandenspezifischer Priming-

Effekt angenommen. Das Modell nimmt bei der Schätzung zusätzlich einen nichtlinearen Effekt zwischen der Anzahl an Fahrten in Kombination mit der Anzahl der Primings an.

Das GAMM ergibt signifikante Effekte für die Kombination aus Priming und Anzahl der Fahrten ($F(5,7) = 5,55; p < 0,001$) sowie die Kombination aus probandenspezifischem Intercept (individuelles Ausgangsniveau) und Fahrtenanzahl ($F(20) = (38,86; p < 0,001)$). Es zeigt sich kein signifikanter probandenspezifischer Primingeffekt ($F(20) = 0,00; p = 0,45$). Es ist davon auszugehen, dass kein probandenspezifischer Primingeffekt besteht, sondern ein globaler Primingeffekt, der sich gleichermaßen auf alle Probanden auswirkt.

Der nichtlineare Effekt der Anzahl an Fahrten in Kombination mit der Anzahl der Primings ergibt eine signifikante Interaktion ($F(20) = 32,52; p < 0,001$). Die Korrektheit des MM steigt mit zunehmender Fahrtanzahl anfangs stark an, flacht jedoch ab. Auch der Primingeffekt steigt mit der Anzahl an Primings, flacht jedoch nach 6 BZP nicht ab. Die Interaktion macht sich dadurch bemerkbar, dass mit einer steigenden Anzahl an Fahrten ohne Priming die Korrektheit des MM stetig zunimmt. Bei mehr als einem Priming hat die Anzahl an Fahrten kaum noch einen Effekt.

Zur Analyse der Vergessensprozesse wird die Korrektheit des MM von BZP 5 (MW: 4,68; MD:6) mit der Korrektheit des MM zu BZP 6 (MW: 4,73; MD:5) verglichen. Ein Wilcoxon-Test ergibt keinen signifikanten Effekt ($V=50,0; p=0,23$). Die Korrektheit des MM ändert sich nach einer Woche ohne Systeminteraktion nicht signifikant.

Probanden- und itemspezifische Entwicklung des mentalen Modells

Abbildung 7.7 zeigt die probandenspezifische Entwicklung des MM über alle sieben BZP. Bezüglich des MM verfügen alle Probanden über ein eher korrektes MM (Wertebereich 4-6). Die Lernvorgänge weisen visuell keine logarithmischen Verläufe auf (vgl. Kapitel 2.1.3). Proband 9 verfügt bei BZP 6 über das korrekteste MM (MW: 5,89), während Proband 6 das unvollständigste MM aufweist (MW: 3,84).

Die Analyse des MM auf Itemebene ergibt, dass das Probandenkollektiv 16 von insgesamt 19 Items nach BZP 6 eher korrekt einstuft. Item 23 („Das hochautomatisierte System funktioniert in komplexen Baustellen“) schneidet mit einer mittleren Korrektheit von 2,71 am schlechtesten ab und befindet sich im Bewertungsbereich eher inkorrekt (1-3). Item 11 („Der Fahrer muss immer aufpassen, dass sich das System richtig verhält“) liegt mit einer mittleren Korrektheit von 3,41 im eher inkorrekten Bereich. Die korrekteste Einschätzung erhält Item 6 („Der Fahrer muss das hochautomatisierte Fahren bewusst aktivieren). Die Betrachtung des Medians zur Bestimmung der Korrektheit des MM zeigt, dass neun Probanden zu BZP 6 einen Median von 6 aufweisen.

Die Analyse der Verläufe der Itembewertungen über alle BZP (Anhang E) zeigt, dass Item 2 („Das hochautomatisierte System funktioniert bei Regen“), Item 11 („Der Fahrer muss immer aufpassen, dass sich das System richtig verhält“), Item 13 („Im Fall eines Fehlers kann das hochautomatisierte System an Straßenrand stehen bleiben“) und Item 23 („das hochautomatisierte System funktioniert in komplexen Baustellen“) über alle BZP von Beginn an nicht korrekt eingeschätzt werden.

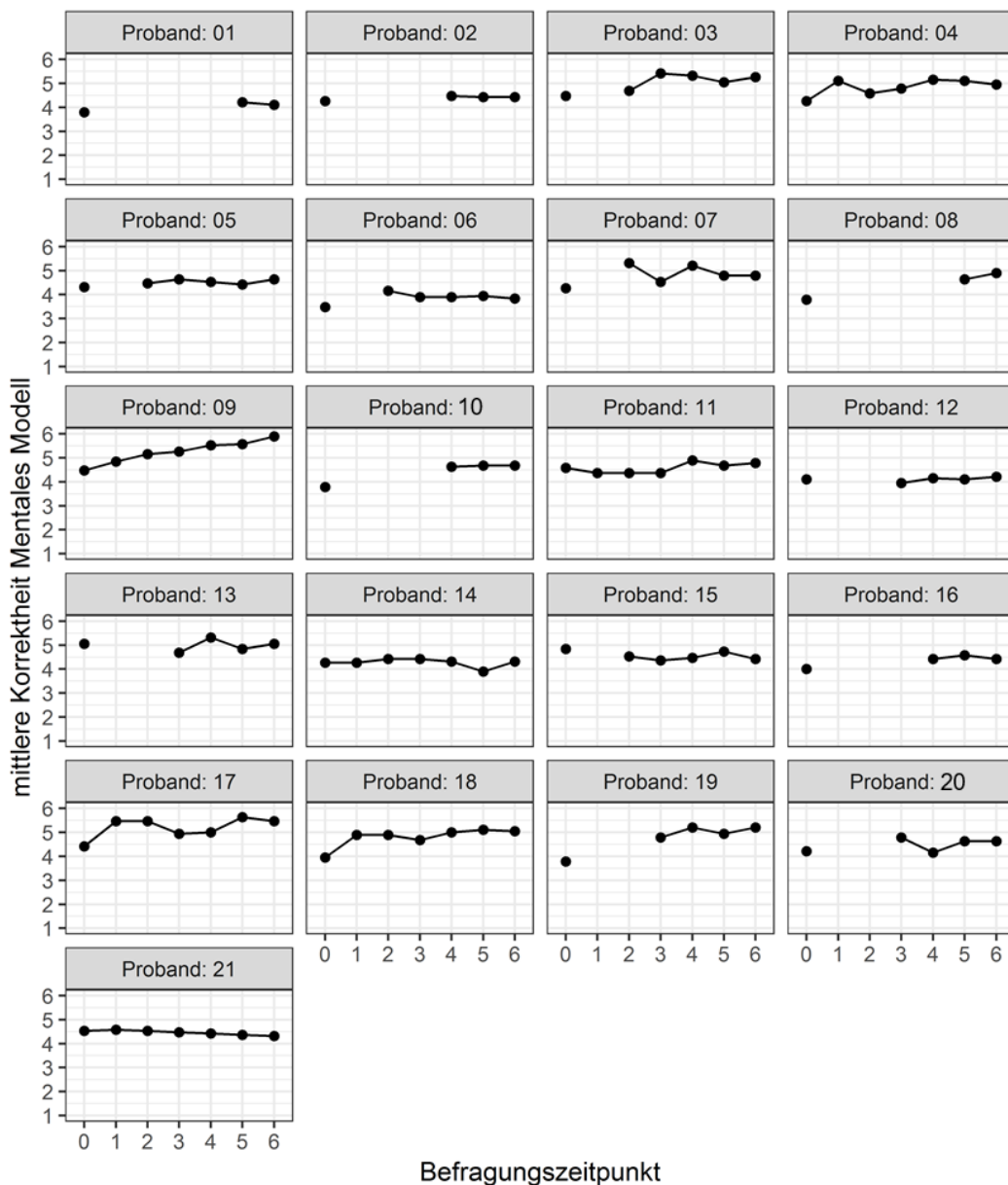


Abbildung 7.7: Probandenspezifische Entwicklungsverläufe des MM über alle Befragungszeitpunkte. Fehlende Werte ergeben sich durch die Blockrandomisierung zur Schätzung des Primingeffekts.

7.3.2 Globale Vertrauensentwicklung

Die Erfassung des Vertrauens erfolgt auf zwei Subskalen: Vertrauen und Misstrauen (7-stufige Skala). Der Verlauf beider wird getrennt betrachtet. Abbildung 7.8 stellt deskriptiv die Misstrauens- und Vertrauensbewertungen über die fünf Versuchsfahrten hinweg dar. In der Darstellung werden Probanden mit gleicher Randomisierungsgruppe zusammen dargeboten, weil diese direkt miteinander verglichen werden können.

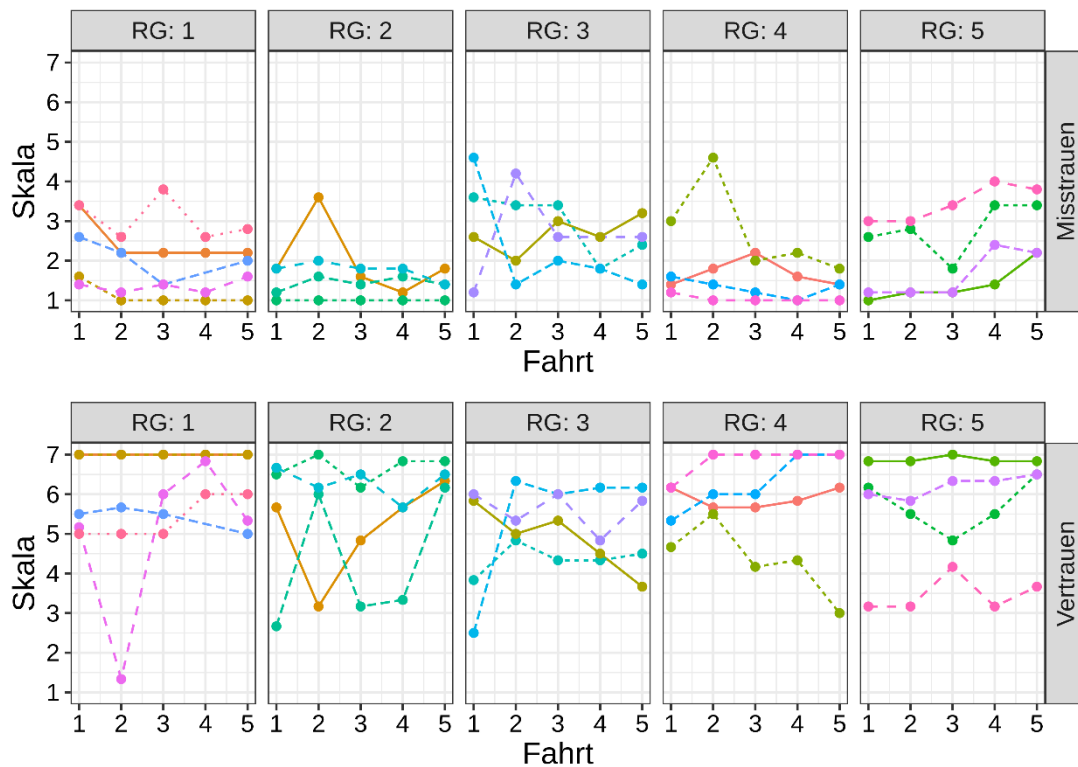


Abbildung 7.8: Deskriptive Darstellung der globalen Misstrauensentwicklung (oben) und Vertrauensentwicklung (unten) über alle Fahrten nach Randomisierungsgruppen (RG) (1 $\hat{=}$ Trifft gar nicht zu; 7 $\hat{=}$ Trifft völlig zu); Gleich kodierte Linien innerhalb der RG stellen die Vertrauens- und Misstrauensbewertung desselben Probanden dar

Die deskriptive Darstellung des Misstrauens zeigt niedrige Bewertungen, mit einem MW von 2,04 über alle Fahrten und RG hinweg (Min: 1,0; Max: 4,6; MD: 1,8; SD: 0,9). Die Betrachtung der Misstrauensbewertung pro Fahrt (Tabelle 7.7) zeigt ein geringes Misstrauen bereits ab Fahrt eins. Die SD deutet auf eine geringe Streuung der Bewertungen der Probanden hin.

Tabelle 7.7: Deskriptive Statistik (MW, MD und SD) der globalen Misstrauensentwicklung über alle Befragungszeitpunkte (BZP) und alle Probanden

BZP	Mittelwert (MW)	Median (MD)	Standardabweichung (SD)
1	2,15	1,80	1,04
2	2,16	2,00	1,08
3	1,93	1,80	0,86
4	1,92	1,80	0,84
5	2,00	1,80	0,81

Die deskriptive, aggregierte Darstellung der Misstrauenswerte über alle Fahrten (Abbildung 7.9) zeigt einen leicht sinkenden Trend der Misstrauensbewertung. Die Schätzung einer globalen Trendgerade über alle Fahrten mithilfe eines LM unterstützt den visuellen Trend. Die Untersuchung auf signifikante Unterschiede zwischen den Fahrten erfolgt mithilfe eines linearen gemischten Modells (LMM). Bei der Modellierung wird sowohl ein probandenspezifisches Ausgangsniveau als auch eine probandenspezifische Steigung der Bewertungen berücksichtigt. Das LMM zeigt, dass der deskriptive Trend der Misstrauensbewertungen über alle Probanden mit steigender Anzahl an Fahrten nicht signifikant ist (Fahrt 1/ Fahrt 2, $t(79) = 0,049$; $p = 0,96$;

Fahrt 1/ Fahrt 3; $t(79) = -1,12$; $p = 0,27$; Fahrt 1/ Fahrt 4, $t(79) = -1,17$; $p = 0,25$; Fahrt 1/ Fahrt 5, $t(79) = -0,78$; $p = 0,44$.

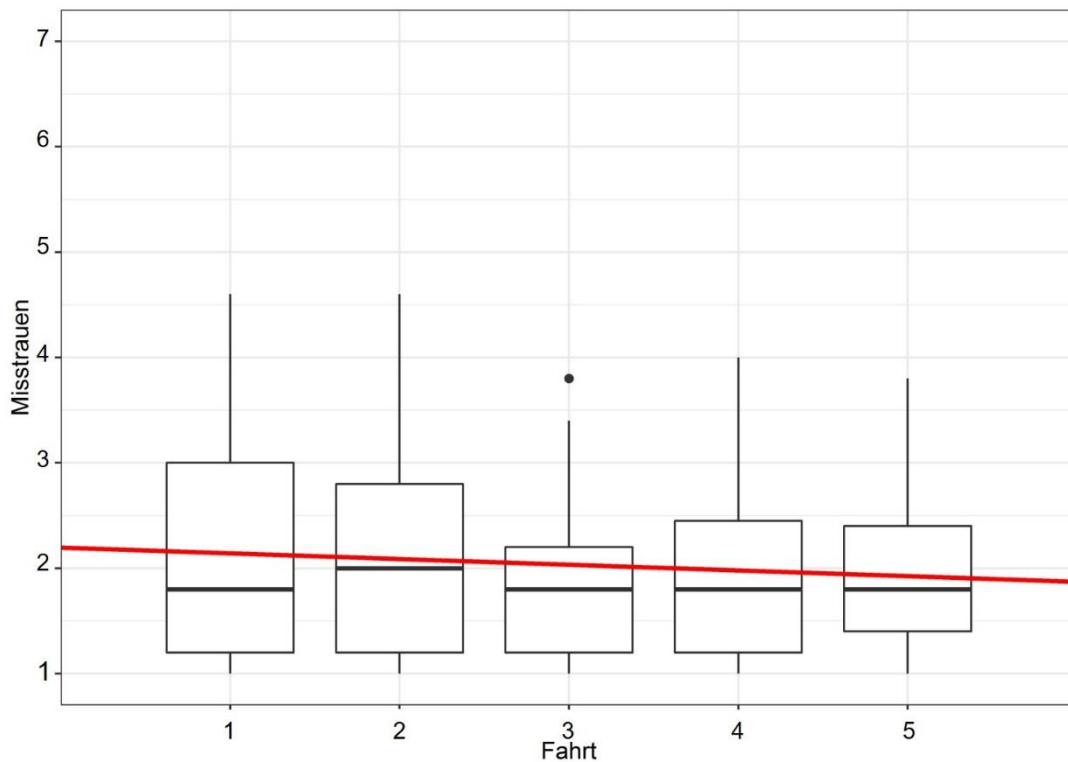


Abbildung 7.9: Deskriptive, aggregierte Darstellung der Misstrauensbewertungen über alle Fahrten mit geschätzter, linearer Trendgerade (1 $\hat{=}$ Trifft gar nicht zu; 7 $\hat{=}$ Trifft völlig zu)

Die deskriptive Darstellung des Vertrauens zeigt heterogene Bewertungen mit einem MW von 5,62 über alle Fahrten und Randomisierungsgruppen hinweg (Min: 1,3; Max: 7,0; MD: 6,0; SD: 1,26). Das Vertrauen der Probanden nach Fahrt 1 ist bereits hoch und steigt mit zunehmender Anzahl an Fahrten (Tabelle 7.8).

Tabelle 7.8: Deskriptive Statistik (MW, MD und SD) der globalen Vertrauensentwicklung über alle Befragungszeitpunkte (BZP)

BZP	Mittelwert (MW)	Median (MD)	Standardabweichung (SD)
1	5,42	5,83	1,36
2	5,49	5,67	1,45
3	5,62	6,00	1,08
4	5,71	5,92	1,24
5	5,86	6,17	1,21

Die deskriptive, aggregierte Darstellung der Vertrauenswerte über alle Fahrten (Abbildung 7.10) deutet auf einen leicht steigenden Trend der Vertrauensbewertungen hin. Die Schätzung einer globalen Trendgerade über alle Fahrten mithilfe eines LM unterstützt den visuellen Trend. Die Untersuchung auf signifikante Unterschiede zwischen den Fahrten erfolgt mithilfe eines LMM. Dieses zeigt erneut keine signifikanten Unterschiede (Fahrt 1/ Fahrt 2, $t(79) = 0,27$; $p = 0,79$; Fahrt 1/ Fahrt 3, $t(79) = 0,74$; $p = 0,46$; Fahrt 1/ Fahrt 4, $t(79) = 1,03$; $p = 0,30$; Fahrt 1/ Fahrt 5, $t(79) = 1,63$; $p = 0,11$).

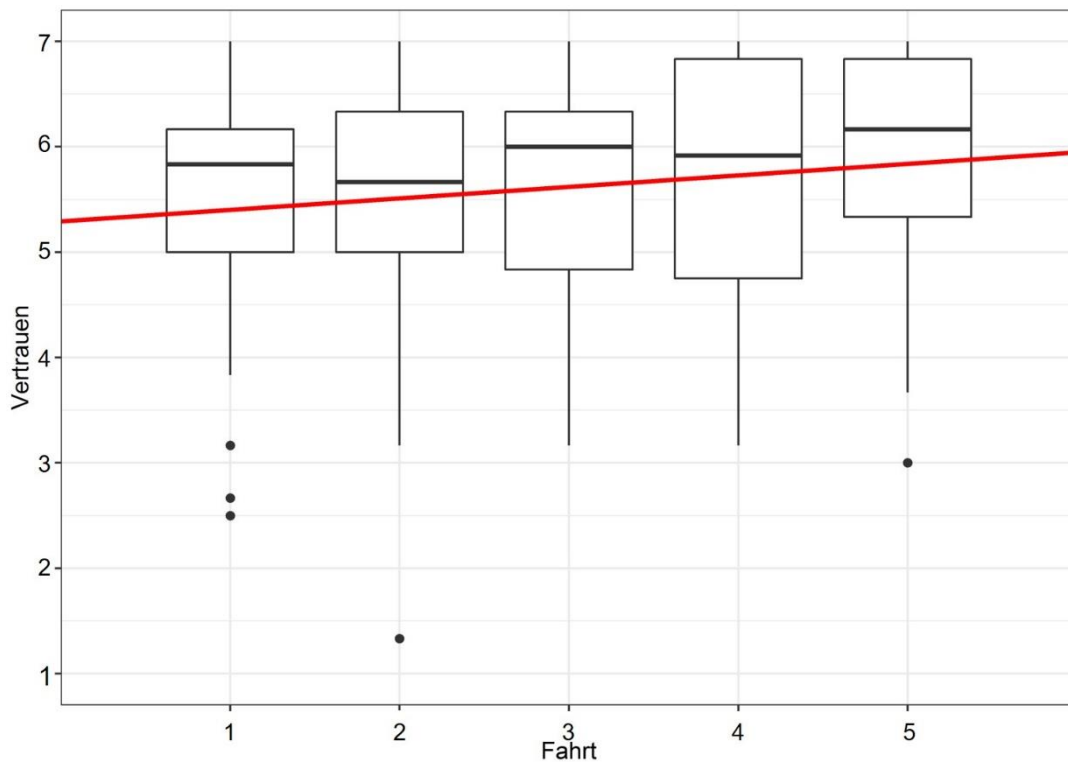


Abbildung 7.10: Deskriptive, aggregierte Darstellung der Vertrauensbewertungen über alle Fahrten mit geschätzter, linearer Trendgerade (1 \triangleq Trifft gar nicht zu; 7 \triangleq Trifft völlig zu)

7.3.3 Situationsspezifische Vertrauensentwicklung

Die Erfassung des situationsspezifischen Vertrauens erfolgt während der Simulation nach jeder auftretenden Verkehrssituation. Die Probanden geben auf einer Skala von 0-100 ihr aktuelles Vertrauensniveau an („Auf einer Skala von 0-100: Wie sehr vertrauen Sie dem hochautomatisierten System insgesamt zum jetzigen Zeitpunkt?“).

Deskriptive Statistik

Die deskriptive Darstellung der Ergebnisse erfolgt nach Fahrtanzahl, Randomisierungsgruppen und Szenario (reduzierte Darstellung: Abbildung 7.11, vollständige Darstellung: Anhang F). Die Darstellung der Daten über die Fahrten und Szenarien hinweg veranschaulicht die Entwicklung des situationsspezifischen Vertrauens mit zunehmender Systemerfahrung. Die Gruppierung der Daten nach Randomisierungsgruppe erlaubt einen visuellen Vergleich der Daten zwischen den Probanden der jeweiligen Randomisierungsgruppe.

Randomisierungsgruppe 1 zeigt ein homogenes Bewertungsbild mit hohen Vertrauensbewertungen über alle Fahrten hinweg. Zwei Probanden erreichen bereits nach Fahrt 1 Vertrauenswerte von 100. Ein Proband zeigt einen niedrigen Vertrauenswert zu Beginn von Fahrt 1. Dessen Bewertungen steigen jedoch nach drei Situationen auf ein Vertrauenslevel von 70.

Auch Randomisierungsgruppe 2 zeigt ein homogenes Bewertungsbild. Lediglich ein Proband zeigt größere Vertrauensschwankungen, insbesondere bei Fahrt 2. Die Schwankungen der Vertrauensbewertung verringern sich deskriptiv mit zunehmender Anzahl an Fahrten.

Ein ähnliches Bild spiegeln die Daten von Randomisierungsgruppe 3 wider. Die Vertrauensbewertungen erreichen bereits in Fahrt 1 ein hohes Niveau. Ein Proband zeigt starke Schwankungen in seinen Vertrauensbewertungen in Fahrt 1 nach Situation 5 (Überholmanöver, Kapitel 7.2.3). Die Vertrauensbewertungen steigen ab Situation 7 erneut an, erreichen jedoch in Fahrt 1 nicht mehr das bereits erreichte Vertrauensniveau von Situation 4. Im weiteren Fahrtenverlauf steigt das globale Vertrauenslevel des Probanden ab Fahrt 2 an und weist geringe Schwankungen auf. Dieser Trend bleibt in den nachfolgenden Fahrten bestehen.

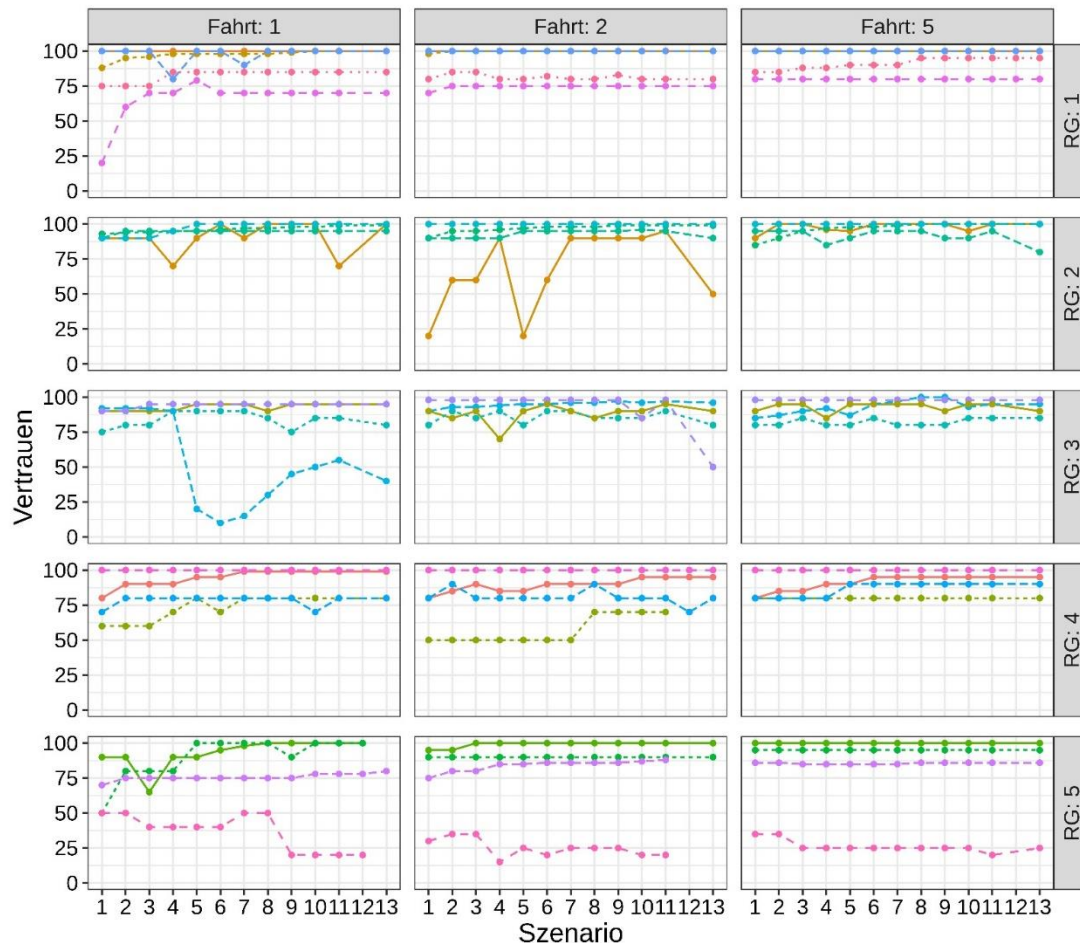


Abbildung 7.11: Deskriptive Darstellung des situationsspezifischen Vertrauens eingeteilt nach Randomisierungsgruppe, Fahrt 1-5 und Szenario 1-13

Randomisierungsgruppe 4 zeigt homogene Bewertungen innerhalb der Randomisierungsgruppe, weist jedoch ein niedrigeres globales Vertrauensniveau, im Vergleich zu den verbleibenden Randomisierungsgruppen, auf. Vertrauensschwankungen über alle Fahrten hinweg sind gering. Ein Proband zeigt niedrigere Vertrauensbewertungen über alle Fahrten hinweg.

Die deskriptive Darstellung der Vertrauensbewertungen von Randomisierungsgruppe 5 zeigt die heterogensten Bewertungen über alle Randomisierungsgruppen hinweg. Die Bewertungen in Fahrt 1 streuen über alle Probanden stark. Ein Proband zeigt einen erhöhten Vertrauenseinbruch nach Szenario 9 (Regen, Kapitel 7.2.3). Das Vertrauen regeneriert sich in Fahrt 1 nicht mehr. Im weiteren Fahrtverlauf zeigt der Proband die geringsten Vertrauensbewertungen über alle Szenarien hinweg. Das Ausgangsniveau von 50 in Fahrt 1 wird zu keinem Zeitpunkt erneut erreicht. Eine weitere Auffälligkeit zeigt sich bei Fahrt 4 mit einem Vertrauenseinbruch von 95

auf 30 nach Szenario 7 (keine Übernahme). Das Vertrauen regeneriert sich in Fahrt 4 nur minimal. Das Vertrauen erholt sich vollständig vor Fahrt 5 und weist durchgängig hohe Bewertungen auf.

Inferenzstatistik

Um den Einfluss der zunehmenden Anzahl an Fahrten und der Szenariotypen (kurzfristige / langfristige / keine Übernahme) auf die Vertrauensbewertung zu bestimmen, wird eine Beta-Regression modelliert [195]. Dieses Verfahren wird gewählt, weil die vorliegenden Daten Intervallskalenniveau aufweisen und sich ein Großteil der Daten an der Intervallgrenze befindet. Zur Berechnung werden die Daten auf den Bereich von [0,1] skaliert. Die Annahmen eines probandenspezifischen Intercepts, eines probandenspezifischen, linearen Szenario- und Fahrteneffekts und die Annahme eines nichtlinearen Effektes des Szenarios werden in das Modell aufgenommen.

Die Beta-Regression zeigt einen Einfluss des Faktors *Fahrt* auf die situationsspezifische Vertrauensbewertung. Das situationsspezifische Vertrauen steigt global pro Fahrt um 9 %. Dieser Effekt ist jedoch nicht signifikant (z-Wert = 1,6; $p=0,11$). Die Ergebnisse der Beta Regression zeigen jedoch einen signifikant negativen Einfluss kurzfristiger Übernahmen auf die situationsspezifische Vertrauensbewertung (z-Wert = -2,94; $p=0,003$). Die Vertrauensbewertung reduziert sich durch das Auftreten einer kurzfristigen Übernahme auf 61 % im Vergleich zum Szenario *keine Übernahme*. Die Berechnung eines Effektes für langfristige Übernahmen auf die Vertrauensbewertung zeigt ebenfalls einen negativen Effekt (Reduktion auf 87 %), der jedoch nicht signifikant unterschiedlich zum Szenariotyp *keine Übernahme* ist (z-Wert = -0,95; $p=0,34$).

Um Auskunft über den Verlauf und Schwere der Vertrauenseinbrüche über die Versuchsfahrten hinweg zu erhalten, wird eine Beta Regression berechnet. Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Reduktion der Schwere der Vertrauenseinbrüche mit zunehmender Anzahl an Fahrten, ausgelöst durch kurzfristige Übernahmen (z-Wert = 1,88; $p=0,06$). Der Vertrauenseinbruch reduziert sich um 10 % je Fahrt. Auch die Vertrauenseinbrüche durch langfristige Übernahmen nehmen pro Fahrt um 1 % ab, dieser Effekt ist jedoch nicht signifikant (z-Wert = 0,3; $p=0,77$).

7.3.4 Akzeptanzentwicklung

Abbildung 7.12 zeigt die deskriptive Verteilung der Nützlichkeits- und Zufriedenheitsbewertungen über alle fünf Versuchsfahrten. Deskriptiv zeigt sich eine durchgehend hohe Bewertung beider Subskalen (Tabelle 7.9).

Tabelle 7.9: Lage- und Streuungsmaße der Nützlichkeit und Zufriedenheit (MW = Mittelwert; MD= Median; SD= Standardabweichung)

Fahrt	Nützlichkeit			Zufriedenheit		
	MW	MD	SD	MW	MD	SD
1	3,28	3,2	0,43	4,14	4,00	0,71
2	3,45	3,6	0,49	4,40	4,50	0,52
3	3,40	3,4	0,49	4,35	4,50	0,67
4	3,44	3,4	0,53	4,39	4,75	0,69
5	3,51	3,4	0,41	4,45	4,50	0,59

Die Anwendung des Friedman-Tests ($p=0,033$) und anschließendem Post-hoc Tests zeigt, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen Fahrt 1 und Fahrt 5 bezüglich der Nützlichkeit gibt ($p=0,033$). Die Nützlichkeit wird nach Fahrt 5 signifikant besser bewertet. Die Analyse der Zufriedenheit mithilfe des Friedman Tests ergibt keinen signifikanten Unterschied zwischen Fahrt 1 und Fahrt 5 ($\chi^2(4) = 7,65$; $p=0,11$).

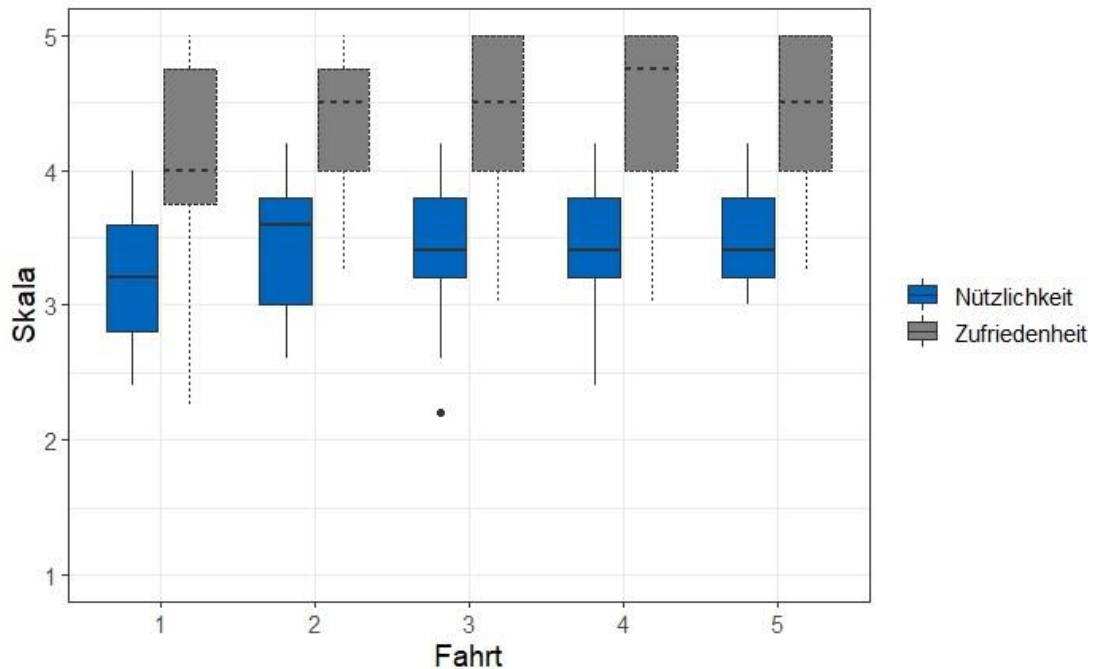


Abbildung 7.12: Deskriptive Darstellung der Akzeptanzbewertung (Nützlichkeit/Zufriedenheit) über alle fünf Fahrten (1 $\hat{=}$ niedrig, 5 $\hat{=}$ hoch)

7.3.5 Entwicklung der Nutzungsintention

Zur Bestimmung der Nutzungsintention werden die beiden Konstrukte *wahrgenommene Nützlichkeit* und *Nutzerfreundlichkeit* auf einer 5-stufigen Skala erhoben.

Die deskriptive Auswertung (Abbildung 7.13, Tabelle 7.10) zeigt, dass beide Konstrukte bereits in Fahrt 1 im oberen Bewertungsbereich liegen.

Tabelle 7.10: Lage- und Streuungsmaße der wahrgenommenen Nützlichkeit und Nutzerfreundlichkeit

	Wahrgenommene Nützlichkeit		Nutzerfreundlichkeit	
	MW	SD	MW	SD
Fahrt 1	3,68	0,76	3,92	0,70
Fahrt 2	3,94	0,82	4,30	0,54
Fahrt 3	3,90	0,78	4,22	0,61
Fahrt 4	4,03	0,87	4,51	0,48
Fahrt 5	4,04	0,76	4,38	0,53

Die Veränderung der wahrgenommenen Nützlichkeit über die Versuchsfahrten wird mithilfe eines Friedman Tests geprüft. Dieser zeigt einen signifikanten Unterschied ($\chi^2(4) = 18,04$; $p=0,001$). Conover's Post Hoc Test identifiziert signifikante Unterschiede zwischen Fahrt 1 und Fahrt 2 ($T(80) = 2,74$; $p=0,007$; $r_{sp}=0,87$), zwischen Fahrt 1 und Fahrt 3 ($T(80) = 2,46$; $p=0,016$;

$r_{sp}=0,69$), Fahrt 1 und Fahrt 4 ($T(80) = 3,55$; $p < 0,001$; $r_{sp}=0,65$), und Fahrt 1 und Fahrt 5 ($T(80) = 4,40$; $p < 0,001$; $r_{sp}=0,7$). Die Berechnung der Rangkorrelation nach Spearman (r_{sp}) ergibt nach COHEN [196, S. 157] große Effekte für alle paarweisen Vergleiche.

Auch die Untersuchung der Entwicklung der Nutzerfreundlichkeit mit steigender Anzahl an Fahrten ergibt signifikante Unterschiede (Friedman Test, $\chi^2(4) = 21,99$; $p < 0,001$). Conover's Post-hoc Test identifiziert Unterschiede zwischen F1 und F2 ($T(80) = 2,2$; $p=0,031$, $r_{sp}=0,66$), Fahrt 1 und Fahrt 4 ($T(80) = 4,83$; $p < 0,001$, $r_{sp}=0,56$) sowie Fahrt 1 und Fahrt 5 ($T(80) = 3,7$; $p < 0,001$, $r_{sp}=0,56$).

Weitere signifikante Unterschiede finden sich zwischen Fahrt 2 und Fahrt 4 ($T(80) = 2,63$; $p=0,01$, $r_{sp}=0,52$), Fahrt 3 und Fahrt 4 ($T(80) = 3,32$; $p=0,001$, $r_{sp}=0,78$) sowie Fahrt 3 und Fahrt 5 ($T(80) = 2,2$; $p=0,031$, $r_{sp}=0,75$). Spearman's Rangkorrelationen ergeben für die paarweisen Vergleiche der Nutzerfreundlichkeit große Effekte [150, S. 821, 196, S. 157].

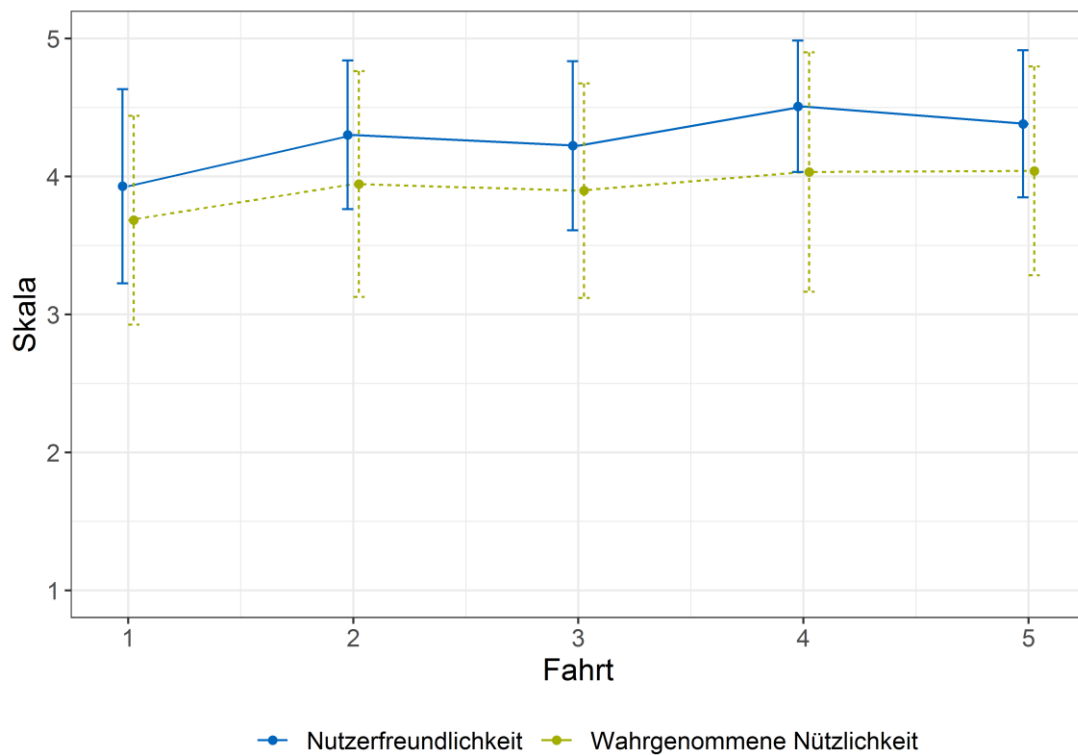


Abbildung 7.13: Deskriptive Darstellung der Bewertungen der Nutzerfreundlichkeit und wahrgenommenen Nützlichkeit über alle fünf Fahrten (1 \triangleq Stimme überhaupt nicht zu; 5 \triangleq Stimme voll und ganz zu)

Die deskriptive individuelle Darstellung der wahrgenommenen Nützlichkeit und Nutzerfreundlichkeit pro Proband gibt weitere detaillierte Einblicke in die Bewertung (Abbildung 7.14). Es lassen sich drei Bewertungsgruppen unterscheiden. 7 Probanden stufen die wahrgenommene Nützlichkeit und Nutzerfreundlichkeit gleich ein. 3 Probanden bewerten die wahrgenommene Nützlichkeit höher als die Nutzerfreundlichkeit, während die verbleibenden 11 Probanden die Nutzerfreundlichkeit höher einstufen.

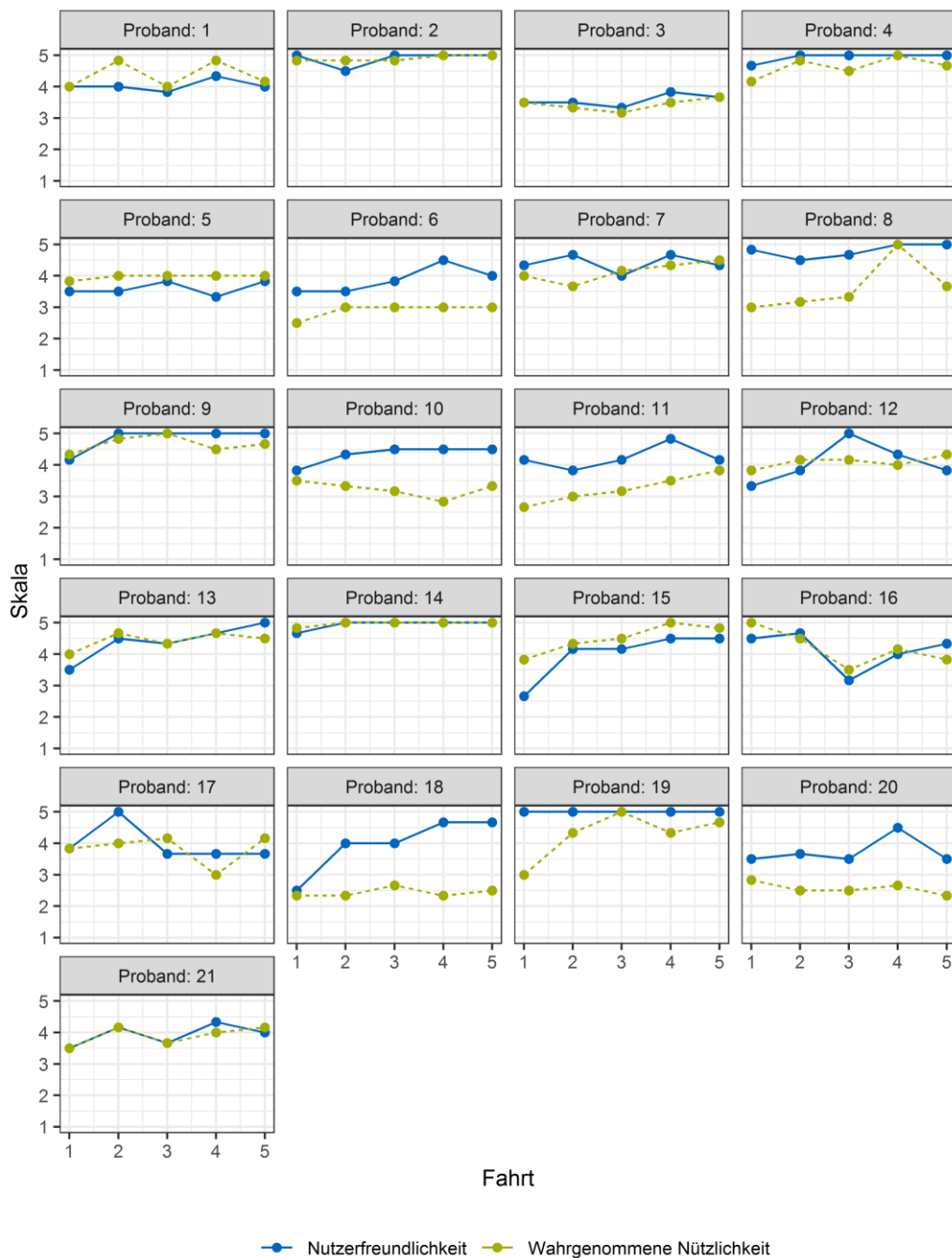


Abbildung 7.14: Darstellung der Nutzerfreundlichkeit (NF) und der wahrgenommenen Nützlichkeit (WN) pro Proband und Fahrt (1 ≙ Stimme überhaupt nicht zu; 5 ≙ Stimme voll und ganz zu)

7.3.6 Entwicklung der blickbasierten Interaktion

Zur Beurteilung der Blickverhaltensänderungen werden die Blicke innerhalb definierter Bereiche (AOI = Area of Interest) betrachtet. Die Auswertung der Blickdaten erfolgt im Hinblick auf eine Verschiebung der visuellen Aufmerksamkeitsverteilung zwischen dem Fahrgeschehen, der Bearbeitung der FFT und der blickbasierten Interaktion mit den Anzeigemedien HUD, Kombiinstrument und LED-Leiste.

Die deskriptive Analyse zeigt keine Verschiebung der kumulierten Blickdauer mit zunehmender Anzahl an Fahrten (Anhang E). Die Aufmerksamkeit verschiebt sich nicht vom Fahrgeschehen auf das Tablet. Im Mittel betrachten die Probanden das HUD 0,8% der Zeit, das Kombi 4,7%, die LED-Leiste 0,3 %, und das Tablet 0,01 % (Tablet in der Hand) respektive 3,6 % (Tablet in der Halterung) über alle Fahrten. Die verbleibende Zeit liegen die Blicke in anderen Bereichen (bspw. Straße).

Die inferenzstatistische Auswertung des Blickverhaltens mithilfe eines LMM bestätigt die deskriptiven Erkenntnisse. So verschiebt sich das Blickverhalten mit zunehmender Anzahl an Fahrten nicht signifikant auf das Tablet und somit die Bearbeitung der FFT.

Es ergibt sich ein signifikanter Effekt für die Blickverteilung in das Kombiinstrument mit zunehmender Fahrtanzahl ($t(73) = -2,43$; $p=0,017$). Die Berechnung der Effektstärke ergibt einen kleinen Effekt von $-0,003$. Die blickbasierte Interaktion in das Kombiinstrument sinkt mit steigender Fahrtanzahl um 0,3 %, bei einer mittleren Blickzuwendung von 4,7 % über alle Fahrten hinweg. Die mittlere Blickzuwendung reduziert sich folglich über fünf Fahrten um 1,5 % und resultiert in einer mittleren Blickzuwendung von 3,2 % in das Kombiinstrument.

7.3.7 Einfluss der Persönlichkeit und der Technikbereitschaft

Um den Einfluss der Persönlichkeitsdimensionen der Stichprobe auf das globale Vertrauen zu bestimmen, werden die Konstrukte in die Beta Regression aufgenommen. Die Regression zeigt keinen signifikanten Einfluss (Extraversion: $z=0,61$; $p=0,54$; Verträglichkeit: $z=0,44$; $p=0,66$; Gewissenhaftigkeit: $z=1,01$; $p=0,31$; Neurotizismus: $z=1,19$; $p=0,23$; Offenheit: $z=0,98$; $p=0,33$). Die Persönlichkeit der Stichprobe wirkt sich folglich über alle Probanden, Fahrten und Messzeitpunkte nicht signifikant auf die Vertrauensbewertung aus.

Zur Bestimmung eines möglichen Einflusses der Technikbereitschaft auf die Bildung des MM, wird die Technikbereitschaft als Faktor in das GAMM (Kapitel 7.3.1) aufgenommen. Die Schätzung des GAMM ergibt keinen signifikanten Effekt ($t=0,81$; $p=0,42$). Die Technikbereitschaft des Probandenkollektivs wirkt sich folglich über alle Probanden, Fahrten und Messzeitpunkte nicht signifikant auf die Bildung des MM aus.

7.4 Diskussion der summativen Evaluationsergebnisse

Das Ziel der summativen Fahrstudie ist es herauszufinden, inwieweit sich die Mensch-Maschine-Interaktion mit zunehmender Systemerfahrung verändert und adressiert Forschungsfrage F2 (Kapitel 3.2). Hierbei werden die Veränderung des MM, des Vertrauens, der Akzeptanz und der Nutzungsintention näher betrachtet. Zu Beginn geht die Diskussion auf die Interpretation und die Einordnung der gewonnenen Ergebnisse ein, um daraufhin Grenzen der Studie aufzuzeigen.

7.4.1 Hypothesenüberprüfung und Interpretation der Ergebnisse

Im Folgenden werden die gewonnenen Ergebnisse interpretiert und auf Übereinstimmung mit den aufgestellten Hypothesen überprüft.

Entwicklung des mentalen Modells

Das Probandenkollektiv verfügt bereits zu Beginn der Studie über ein eher korrektes MM, obwohl die Erhebung der Vorerfahrung mit FAS und die Abfrage vorheriger Teilnahmen an Fahrsimulatorstudien zum automatisierten Fahren auf ein Novizen-Kollektiv hinweisen. Die qualitativen Anmerkungen lassen drauf schließen, dass sich die Probanden die Funktionalität des hochautomatisierten Systems durch einen Vergleich mit bestehenden FAS erklären. Die Funktionalitäten genutzter FAS (bspw. ACC, Tempomat, Spurhalteassistent) werden auf die Funktionalität des HAF übertragen.

Die deskriptive und inferenzstatistische Auswertung über alle BZP zeigt, dass sich das MM mit zunehmender Systemerfahrung dem tatsächlichen, implementierten Modell annähert (Tabelle 7.11). Die Nullhypothese kann folglich abgelehnt werden. Ein vollständig korrektes MM wird nach fünf Versuchsfahrten jedoch nicht erreicht.

Die Ergebnisse spiegeln die Befunde von FORSTER ET AL. [96] wider. So sind die Probanden nach fünf Fahrtblöcken, innerhalb einer 60-minütigen Versuchsfahrt, in der Lage, die Systemeigenschaften einer Level 2 und Level 3 Automation korrekter einzuschätzen als zu Beginn. FORSTER ET AL. [96] berichten auch, dass nicht alle Probanden nach fünf Fahrten ein vollständig korrektes MM aufweisen. Eine Erklärung für die gefundenen Trends könnte in der Tendenz zur Mitte liegen. So neigen Probanden dazu, nicht die Extremwerte einer mehrstufigen Skala zu wählen, sondern Werte in der Mitte. Es ist festzuhalten, dass alle Lkw-Fahrer in der zugrundeliegenden Untersuchung in der Lage sind, in allen Situationen korrekt zu übernehmen, trotz unvollständiger MM.

Die Analyse des MM auf Itemebene zeigt die bestehenden Unsicherheiten des Kollektivs bei der Bewertung auf. Die Probanden können trotz der Instruktion zu den Systemfähigkeiten und -limitationen des hochautomatisierten Systems (vor Versuchsfahrt 1) nicht korrekt einschätzen:

- ob der Fahrer das hochautomatisierte System permanent überwachen muss
- ob das System in komplexen Baustellen funktioniert
- ob das System im Fall eines Fehlers am Straßenrand zum Stehen kommen kann

Das inkorrekte Einstufen der Überwachungsleistung resultiert in einem hohen Überwachungsverhalten der Probanden während HAF. Bereits BAINBRIDGE [78] stellt fest, dass Menschen schlecht als Überwacher geeignet sind. Eine hochautomatisierte Fahrt mit einer Dauer von mehr als 15 Minuten ohne die Ausführung einer FFT ist nach VOGELPOHL ET AL. [197, S. 15] als nicht sicher einzustufen, wenn der Fahrer die Automation überwachen oder auf schnelle Hinweise reagieren soll. Die induzierte Müdigkeit könnte zu einer geringeren Leistung bei kurzfristigen Übernahmen führen und die Sicherheit des Gesamtsystems einschränken. Der Fahrer benötigt ein korrektes MM. Dieses kann durch eine geeignete MMS Strategie erzeugt werden. Die Unterstützung des Fernverkehrsfahrer durch Schulungen bei der Einführung hochautomatisierter Systeme stellt eine weitere Möglichkeit dar.

Die steigende Fahrerfahrung und das (Fragebogen-) Priming beeinflussen den Lernprozess. Während die Korrektheit des MM mit steigender Fahrtanzahl langsam ansteigt, resultiert das Priming in einem schnelleren und steileren Lernverlauf. Bereits SIMON [88, S. 7] entwickelt ein Tutorssystem für ACC und stellt fest, dass das Tutorssystem den Lernprozess und die Lerngeschwindigkeit der Probanden positiv beeinflusst. BEGGIATO [39] untersucht den Einfluss unterschiedlicher Systembeschreibungen auf das MM bei Pkw-Fahrern in der Interaktion mit ACC. BEGGIATO [39] kommt zu dem Schluss, dass korrekte Vorabinformationen vor der ersten

Interaktion mit dem System gegeben werden sollten, weil in dieser Phase der Großteil des Lernens abgeschlossen wird. Ein reines Erfahrungslernen auf Trial and Error Basis ist für die Bildung eines korrekten MM nicht zielführend und beeinflusst die Vertrauens- und Akzeptanzbewertungen der untersuchten Pkw-Fahrer negativ [39, S. 70].

Tabelle 7.11: Fragestellungen und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung des mentalen Modells (MM) mit zunehmender Systemerfahrung

Kodierung	Fragestellung und abgeleitete Hypothesen bezüglich des MM
F2.MM	Wie entwickelt sich das MM mit zunehmender Systemerfahrung?
H1	Mit zunehmender Systemerfahrung gleicht sich das MM dem tatsächlich implementierten MM an ✓
H0	Mit zunehmender Systemerfahrung gleicht sich das MM nicht dem tatsächlich implementierten MM an ✗

Entwicklung des globalen Vertrauens und Misstrauens

Die Probanden zeigen bereits nach der ersten Fahrt hohe Vertrauens- und niedrige Misstrauenswerte. Die Bewertungen bleiben die folgenden vier Fahrten relativ konstant. Es kann keine Entwicklung in Form einer Lernkurve beobachtet werden. Die inferenzstatistische Untersuchung der Daten auf signifikante Unterschiede bestätigt die deskriptiven Befunde. Die Nullhypothesen bezüglich der Entwicklung des Vertrauens und Misstrauens können folglich nicht abgelehnt werden (Tabelle 7.12).

Tabelle 7.12: Fragestellung und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung des Vertrauens (VT) und Misstrauens (MT) mit zunehmender Systemerfahrung

Kodierung	Fragestellung und abgeleitete Hypothesen bezüglich des globalen VT und MT
F2.VT	Wie entwickelt sich das Vertrauen mit zunehmender Systemerfahrung?
H1	Mit zunehmender Systemerfahrung steigt das VT ✗
H0	Mit zunehmender Systemerfahrung sinkt bzw. bleibt das VT gleich ✓
F2.MT	Wie entwickelt sich das Misstrauen mit zunehmender Systemerfahrung?
H1	Mit zunehmender Systemerfahrung sinkt das MT ✗
H0	Mit zunehmender Systemerfahrung steigt bzw. bleibt das MT gleich ✓

LEE & SEE [80, S. 55] beschreiben ein angemessenes Vertrauen als Voraussetzung für eine angemessene Systemnutzung. Angemessenes Vertrauen entsteht, wenn das Vertrauen mit den tatsächlichen Systemfähigkeiten übereinstimmt. Das Wissen der Probanden über Systemfähigkeiten und –grenzen wird über das MM bestimmt. Da innerhalb der fünf Versuchsfahrten nur ein Proband ein vollständig korrektes MM bilden konnte, muss davon ausgegangen werden, dass nur dieser Proband über ein angemessenes Vertrauen verfügt. Die Vertrauensbewertungen der verbleibenden Probanden müssen als übersteigertes Vertrauen eingestuft werden.

Die Einordnung der gefundenen Ergebnisse in die Forschungslandschaft ist schwierig. Bestehende Langzeitstudien untersuchen die Lernprozesse bei ACC Nutzung und Pkw-Fahrern. Studien, die das Vertrauen im Kontext HAF untersuchen [179, 180], messen die Entwicklung meist nur über zwei Erhebungszeitpunkte (vor/nach der Fahrt), ebenfalls bei Pkw-Fahrern. Beide Kurzzeitstudien [179, 180] berichten jedoch höhere Vertrauenswerte nach der Fahrt als vor der Fahrt.

Situationsspezifische Vertrauensentwicklung

Die Untersuchung der situationsspezifischen Vertrauensbewertung zeigt, dass sich Übernahme-situationen negativ auf die Vertrauensbewertung auswirken (Tabelle 7.13). Es muss zwischen kurzfristigen und langfristigen Übernahmen unterschieden werden. So beeinflussen kurzfristige Übernahmen das Vertrauen signifikant negativer als langfristige Übernahmen. Die entstehenden Vertrauenseinbrüche durch Übernahmeszenarien verringern sich mit steigender Systemerfahrung. Die Nullhypothesen bezüglich der Auswirkungen von Übernahmeszenarien auf das situationsspezifische Vertrauen und die Schwere der Vertrauenseinbrüche kann folglich abgelehnt werden.

Tabelle 7.13: Fragestellung und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung des situationsspezifischen Vertrauens (SV) mit zunehmender Systemerfahrung

Kodierung	Fragestellung und abgeleitete Hypothesen bezüglich des situationsspezifischen Vertrauens (SV)	
F2.SV	Welche Auswirkungen haben Übernahmeszenarien auf das SV?	
H1	Übernahmeszenarien verringern das SV	✓
H0	Übernahmeszenarien erhöhen bzw. haben keine Auswirkungen auf das SV	X
F2.SV	Wie verändern sich die Vertrauenseinbrüche durch Übernahmeszenarien mit zunehmender Systemerfahrung?	
H1	Mit zunehmender Systemerfahrung verringern sich die Vertrauenseinbrüche durch Übernahmeszenarien	✓
H0	Mit zunehmender Systemerfahrung vergrößern sich bzw. bleiben die Vertrauenseinbrüche durch Übernahmeszenarien gleich	X

Diese Ergebnisse sind im Einklang mit den Befunden einer Kurzzeitstudie von HERGETH ET. AL [180] und LEE & SEE [80]. Die Ausgabe einer korrekten Übernahmeaufforderung wird durch die Probanden als Automationsfehler bewertet, was zu einer kurzzeitigen Reduktion des Vertrauens führt. Die Verringerung der Schwere der Vertrauenseinbrüche auf längere Sicht, kann durch das steigende Systemverständnis erläutert werden. So beschreiben LEE & SEE [80], dass das Vertrauen durch das Beobachten der Systemaktionen und durch das Entwickeln eines Verständnisses für die zugrundeliegenden kausalen Systemzusammenhänge positiv beeinflusst wird.

BEGGIATO & KREMS [149] postulieren weiterhin, dass Automationsfehler sich nur dann vertrauensmindernd auswirken, wenn diese für den Fahrer nicht vorhersehbar sind. Sind kurzfristige Übernahmen für den Probanden anfangs nicht antizipierbar (bspw. Regen), führen diese zu signifikanten Vertrauenseinbrüchen. Mit zunehmender Anzahl an Fahrten und dem aktiven Erleben

von kurzfristigen Übernahmen, wird der kausale Zusammenhang zwischen dem Einsetzen von Regen und der Ausgabe einer Übernahmeraufforderung durch das System antizipierbar. Es kommt zu geringeren Vertrauenseinbrüchen.

Entwicklung der Akzeptanz

Die deskriptiven Zufriedenheitsbewertungen deuten darauf hin, dass die Probanden die Interaktion mit der MMS annehmlich empfinden. Die durchgängig hohen Bewertungen weisen keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsfahrten auf. Die Nullhypothese (H_{0_2} , Tabelle 7.14) kann folglich nicht abgelehnt werden.

Die praktische Anwendung der MMS (Nützlichkeit) liegt im neutralen Bereich. Die inferenzstatistische Untersuchung findet einen signifikanten Effekt. So steigt die Nützlichkeitsbewertung zwischen Fahrt 1 und Fahrt 5 signifikant an. Die Nullhypothese (H_{0_1} , Tabelle 7.14) kann folglich abgelehnt werden. Die Ergebnisse könnten darauf hindeuten, dass sich die Probanden an die Interaktion mit den verschiedenen Anzeigeelementen (Kombiinstrument, HUD, Tablet) erst gewöhnen bzw. die Interaktion mit den verschiedenen Anzeigeelementen erlernen müssen. Die Umsetzung des Anzeigekonzepts erfolgt im Simulator prototypisch. Eine ausgereifere Umsetzung könnte die praktische Nützlichkeit insgesamt positiv beeinflussen.

Während der Befragung nach der Fahrt werden die Probanden instruiert die Nützlichkeit und Zufriedenheit des Anzeige-/Bedienkonzepts zu beurteilen, unabhängig von der technischen Auslegung des hochautomatisierten Systems. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die Probanden die Systemfunktionalität in die Bewertung einbeziehen. Eine verringerte Bewertung der Nützlichkeit könnte folglich auch auf die technische Systemauslegung zurückgeführt werden.

Tabelle 7.14: Fragestellung und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung der Akzeptanz (A) mit zunehmender Systemerfahrung

Kodierung	Fragestellung und abgeleitete Hypothesen bezüglich der Akzeptanz	
F2.A	Wie entwickelt sich die Akzeptanz (Nützlichkeit/ Zufriedenheit) mit zunehmender Systemerfahrung?	
H1	Mit zunehmender Systemerfahrung steigt die Nützlichkeit	✓
H_{0_1}	Mit zunehmender Systemerfahrung sinkt bzw. bleibt die Nützlichkeit gleich	✗
H2	Mit zunehmender Systemerfahrung sinkt die Zufriedenheit	✗
H_{0_2}	Mit zunehmender Systemerfahrung steigt bzw. bleibt die Zufriedenheit gleich	✓

Entwicklung der Nutzungsintention

Die Erfassung und Auswertung der wahrgenommenen Nützlichkeit und Nutzerfreundlichkeit geben Aufschluss über die Entwicklung der Nutzungsintention, die wiederum auf eine tatsächliche Nutzung des Systems schließen lässt.

Beide Konstrukte werden bereits nach Fahrt 1 hoch eingestuft. Die inferenzstatistische Untersuchung ergibt signifikant steigende Unterschiede für beide Subskalen zwischen den Fahrten. Die Bewertungen der Nutzerfreundlichkeit deuten auf eine klare und verständliche Interaktion mit dem hochautomatisierten System. Die Erlernbarkeit des Systems wird als einfach empfunden.

Die wahrgenommene Nützlichkeit beschreibt den positiven Einfluss des Systems auf die allgemeine Arbeitsleistung (Produktivität, Effektivität, Effizienz). Die Daten deuten darauf hin, dass die Probanden nach fünf Fahrten die wahrgenommene Nützlichkeit des Systems noch nicht konkret einschätzen können. Dieser Effekt kann mit dem Versuchsdesign und den zur Auswahl stehenden FFT erläutert werden. Die Bearbeitung von FFT ist im zugrundeliegenden Versuchsdesign fakultativ, um Einblicke in das Vertrauen des Probanden in das hochautomatisierte System zu erhalten. Auch setzen sich die angebotenen FFT vorwiegend aus freizeitbezogenen Tätigkeiten zusammen. Eine Übertragung, wie sich die Einführung hochautomatisierter Systeme auf die tatsächliche, alltägliche Arbeitsleistung auswirkt (Ausfüllen von Lieferscheinen, Frachtbriefen, Kundenanrufe), ist folglich nur eingeschränkt möglich. Die signifikanten unterschiedlichen Bewertungen zwischen Fahrt 1 und Fahrt 5 deuten jedoch auf einen positiven Entwicklungstrend der wahrgenommenen Nützlichkeit hin. Der Einsatz eines hochautomatisierten Systems zeigt einen positiven Einfluss auf die Effektivität und Produktivität der Arbeitsleistung.

Die Ergebnisse zeigen einen positiven Trend der wahrgenommenen Nützlichkeit und Nutzerfreundlichkeit auf. Die Nullhypothesen bezüglich der wahrgenommenen Nützlichkeit und Nutzerfreundlichkeit können abgelehnt werden (Tabelle 7.15). Es ist folglich davon auszugehen, dass die zunehmende Systemerfahrung die Nutzungsintention positiv beeinflusst.

Tabelle 7.15: Fragestellung und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung der Nutzungsintention (NI) mit zunehmender Systemerfahrung

Kodierung	Fragestellung und abgeleitete Hypothesen bezüglich der Nutzungsintention (wahrgenommene Nützlichkeit (WN) / Nutzerfreundlichkeit (NF))	
F2.NI	Wie entwickelt sich die Nutzungsintention mit zunehmender Systemerfahrung?	
H1	Mit zunehmender Systemerfahrung steigt die WN	✓
H0₁	Mit zunehmender Systemerfahrung sink bzw. bleibt die WN gleich	✗
H2	Mit zunehmender Systemerfahrung steigt die NF	✓
H0₂	Mit zunehmender Systemerfahrung sink bzw. bleibt die NF gleich	✗

Entwicklung der blickbasierten Interaktion

HERGETH [190, S. 40] stellt einen negativen Zusammenhang zwischen der subjektiven Vertrauensbewertung und dem blickbasierten Überwachungsverhalten während hochautomatisierter Fahrt fest. Probanden, die über ein höheres Vertrauenslevel verfügen, überwachen das Fahrgeschehen signifikant weniger. Auf Basis der Ergebnisse kommt HERGETH [190] zu dem Schluss, dass die Auswertung von objektiven Blickdaten Rückschlüsse auf das Vertrauenslevel der Probanden zulässt. Eine hohe Blickabwendung hin zur Nebenaufgabe spricht für ein hohes Maß an

Vertrauen in das hochautomatisierte System. Die Auswertung der gewonnenen Blickdaten zeigt keine signifikante Verschiebung der Aufmerksamkeitsverteilung vom Fahrgeschehen auf die Bearbeitung von FFT. Trotz hoher subjektiver Vertrauensbewertungen verändert sich die Blickzuwendung auf das Tablet nicht signifikant. Der Rückschluss, dass ein hohes Vertrauenslevel mit einer geringeren Überwachung einhergeht, kann nicht bestätigt werden.

Die gefundenen Ergebnisse könnten mit der Güte der Blickaufzeichnung erläutert werden. Das Tablet kann zur besseren Bearbeitung der FFT aus der Halterung entnommen werden (dynamisch). Die Definition der Areas of Interest erfolgt statisch. Durch die unterschiedlich eingenommenen Positionen der Probanden mit dem Tablet, wird die Erfassung der Blicke erschwert. Auch geht die neu eingenommene Position meist mit nach unten gerichteten Blicken einher, die durch das Blickerfassungssystem nicht gemessen werden können. Die subjektiv erhobenen Fragebogendaten zeigen ein hohes Vertrauen und geringes Misstrauen. Die objektiven Blickdaten deuten auf ein hohes Überwachungsverhalten hin. Eine weitere Möglichkeit zur Erläuterung der gefundenen Daten stellt der Rosenthal-Effekt [150, S. 101] dar. So kann die Anwesenheit des Versuchsleiters bei dem Ausfüllen der Fragebögen die Bewertung der Probanden verzerren.

Einfluss der Persönlichkeit und der Technikbereitschaft

Das dreistufige Automations-Vertrauensmodell nach HOFF & BASHIR [85] postuliert die Persönlichkeit als einen Einfluss auf das veranlagte Vertrauen. Es wird die Annahme getroffen, dass Individuen mit einem hohen Level an veranlagtem Vertrauen dazu neigen, sich eher auf automatisierte Systeme zu verlassen. Innerhalb des Probandenkollektivs konnte dieser (populationsspezifische) Einfluss nicht bestätigt werden. So beeinflussen die fünf Dimensionen der Persönlichkeit die Vertrauensbewertungen nicht signifikant. Der gefundene Effekt könnte durch die inferenzstatistische Modellierung erläutert werden. So bezieht das Modell probandenspezifische Effekte (random effects) mit ein, um die Heterogenität der Stichprobe abzufangen. Random effects stellen stabile Merkmale dar. Die Schätzung individueller probandenspezifischer Effekte ist folglich nicht möglich.

In einem weiteren Schritt wird der Einfluss der Technikbereitschaft auf die Bildung des MM untersucht. Die Entwicklung des MM wird im Versuch über das vorliegende Strukturwissen der Probanden abgefragt. Die Systemfähigkeiten und -limitationen des hochautomatisierten Systems werden bewertet. Eine hohe Technikbereitschaft könnte sich auf das Auseinandersetzen mit Technik auswirken und somit die Bildung eines korrekten MM beschleunigen. Die Analyse der Daten zeigt keinen Einfluss der Technikbereitschaft auf die Bildung des MM. Da es sich auch bei der Technikbereitschaft um ein stabiles Merkmal handelt, kann erneut kein probandenspezifischer Effekt über die zufälligen random effects modelliert werden.

Die Erkenntnis, dass die Persönlichkeit und die Technikbereitschaft keinen Einfluss auf die Vertrauensbewertung und die Bildung des MM haben, sind positiv zu bewerten. So ermöglicht der Einsatz der entwickelten MMS, unabhängig von personenspezifischen Einflüssen, die Bildung eines eher korrekten MM und hohen Vertrauensbewertungen.

7.4.2 Grenzen der Studie

Mit jedem experimentellen Design gehen Störfaktoren einher, welche die Reliabilität und Validität eines Experiments einschränken.

Probandenkollektiv

BEGGIATO [84, S. 122] nutzt zur Erfassung von Langzeiteffekten im Pkw parallelisierte Stichproben, um statistisch signifikante Unterschiede bezüglich Alter, Geschlecht, Erfahrung und Persönlichkeitsvariablen auszuschließen und eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zwischen den Probanden herzustellen.

Die zugrundeliegende Stichprobe setzt sich größtenteils aus Berufskraftfahrern im Lkw-Fernverkehr zusammen. Das Wissens- und Erfahrungslevel der Probanden bezüglich automatisierten Fahrens deutet auf ein Novizen-Kollektiv hin. Nichtsdestotrotz muss berücksichtigt werden, dass sich Berufskraftfahrer berufsbedingt mit Technik auseinandersetzen. Das Alter und die Persönlichkeitsausprägung der Probanden weisen eine hohe Streuung auf. Die Zusammensetzung der vorliegenden Stichprobe wird nicht parallelisiert, um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Grundgesamtheit zu gewährleisten.

Es liegen keine Informationen vor, inwieweit sich die Probanden zwischen den BZP mit dem Thema HAF weiterführend auseinandersetzen. Die Messung des MM, insbesondere bei BZP 6, könnte hierdurch beeinflusst sein und eine mögliche Erklärung für die hohe Korrektheit des MM darstellen.

Auswahl der Prüfzenarien und Randomisierung

Der Fokus der Streckengestaltung liegt in der Abbildung realistischer Verkehrs- und Umweltbedingungen. Die Ableitung und Auswahl der Prüfzenarien erfolgt auf Basis einer Expertenbefragung. Die Erfassung der Auftretenshäufigkeit der Szenarien basiert auf einer Befragung von Lkw-Fahrern. Eine Ableitung der Verkehrsszenarien und Auftretenshäufigkeiten aus objektiven Fahrdaten könnte die Validität der Streckengestaltung erhöhen.

Die SHRP2 NDS Datenbank [198] stellt objektive Fahrdaten aus dem amerikanischen Raum zur Verfügung. Eine Ableitung und Übertragung von Prüfzenarien und Auftretenshäufigkeiten ist aufgrund der unterschiedlichen Verkehrs- und Umweltbedingungen in USA und Deutschland nur eingeschränkt möglich. Objektive Daten aus Deutschland zur Ableitung von Situationshäufigkeiten existieren lediglich für das Jahr 1985 [199]. Das derzeit vorherrschende Verkehrsgeschehen wird durch diese Daten nur unzureichend repräsentiert. Beide Datenbanken können folglich nicht für die Situationsauswahl und Häufigkeitsbestimmung herangezogen werden.

In der vorliegenden Studie liegt eine isolierte Betrachtung der Szenarien vor (bspw. Regen), um den Effekt der Situation auf das situationsspezifische Vertrauen zu erfassen. Im realen Straßenverkehr können die Situationen jedoch auch in Kombination auftreten (bspw. Stau mit Regen). Fortführende Studien sollten untersuchen, wie sich Kombination verschiedener Situationen auf die Bildung des MM auswirken, insbesondere bei Kombinationen aus unterschiedlichen Kategorien (Stau \triangleq systemseitig handhabbare Situation; Regen \triangleq kurzfristige Übernahmesituation).

Nutzungsdauer vs. Nutzungshäufigkeit

Für die vorliegende Studie wird als Basis eine schrittweise Einführung automatisierter Lkw bei Speditionen angenommen. So hat nicht jeder Lkw-Fahrer die Möglichkeit, täglich mit einem hochautomatisierten Lkw zu interagieren. Die vorliegende Studie gibt folglich keine Auskunft darüber, ob die Dauer oder die Häufigkeit der Nutzung mit dem hochautomatisierten System für den zugrundeliegenden Lernprozess verantwortlich ist.

Um Hinweise auf einen möglichen Einfluss der Nutzungsdauer bzw. -häufigkeit zu erhalten, könnte die vorliegende Studie mit einer durchgängig 5-tägigen Interaktion erneut durchgeführt werden.

Beeinflussung des Lernprozesses durch Reflexion

Der Einsatz verschiedener Messmethoden u.a. von Tiefeninterviews und Fragebögen regt den Probanden zur aktiven Auseinandersetzung mit Inhalten an. So werden durchgeführte Handlungen analysiert, Entscheidungen hinterfragt oder Zusammenhänge hergestellt. Der Reflexionsprozess führt zu einer Beeinflussung des Lernverhaltens.

Der vorliegende Versuch greift auf die Erfassung des MM mithilfe eines Fragebogens zurück. Da der Proband die Aussagen des Fragebogens auf einer Skala bestätigt bzw. ablehnt, wird der Proband nicht tiefer zur Reflexion angeregt, im Gegensatz zu einem Tiefeninterview. Der in diesem Versuch eingesetzte randomisierte Blockplan, bei dem nicht jeder Proband nach jeder Fahrt zu seinem MM befragt wird, soll die Beeinflussung durch das Messinstrument möglichst geringhalten.

OJEDA & NATHAN [95, S. 72] merken an: „[...] post driving questionnaires work as pictures taken at different moments of the learning process, whose comparisons allow to appreciate roughly when changes appear.“ Der Fragebogen erfasst folglich nur Momentaufnahmen des MM. Situationsspezifische Einflüsse auf das MM werden durch den Fragebogen nicht erhoben.

Übertragbarkeit von Fahrsimulatorergebnissen auf die Realität

„Fahrsimulatoren haben sich als Werkzeug in der Fahrzeugentwicklung fest etabliert“ [183, S. 153]. Dies ist auf die vielfältigen Vorteile von Fahrsimulatorstudien zurückzuführen (Kapitel 6.5). Die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Fahrsimulatorstudien auf die Realität wird jedoch diskutiert. Eine Reihe von Faktoren beeinflussen die Validität von Fahrsimulatoren u.a. technische Einschränkungen, Versuchsleitereffekte oder das gewählte Versuchsdesign [200, S. 152]. Die reduzierte Gefahrenwahrnehmung und ein damit verbunden erhöhtes Sicherheitsgefühl, tragen zu einer eingeschränkten Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Realität bei [183, S. 187, 201, S. 57]. SCHMIDTKE & BERNOTAT [42, S. 89-90] merken an, dass in vielen Fällen die Testsituation im Fahrsimulator nicht deckungsgleich mit der realen Lernsituation ist. Ein positiver Transfer gelernter Inhalte findet nur statt, wenn die Art der Verarbeitung von Informationen in Test- und Lernsituation identisch ist.

Die tatsächlichen gefahrenen Kilometer bzw. die Nutzungszeit des Systems in der Realität und bei der vorliegenden Langzeitstudie unterscheiden sich stark [95, S. 72]. Die Kilometerleistung eines Fernfahrers im nationalen respektive internationalen Fernverkehr liegt bei 2753 km respektive 2815 km pro Woche [2, S. 44]. Die Versuchsfahrten im Simulator der summativen Evaluation belaufen sich auf 400 km pro Woche. Lern- und Testsituation sind bezüglich der Nutzungsdauer nicht identisch. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die im Fahrsimulatorversuch gefundenen Ergebnisse in Realität schneller eintreten, aufgrund der erhöhten Anzahl gefahrener Kilometer.

SCHÖNER & MORYS [200, S. 153] kommen zu dem Schluss, dass die Ergebnisse aus High-Fidelity Simulatoren ähnlich zu denen aus Realfahrzeugstudien sind. Eine Fahrsimulatorstudie eignet sich gut, um erste Effekte zu entdecken oder Systeme in frühen Entwicklungsphasen zu testen [201, S. 57, 202, S. 349]. Die Ergebnisse können Gestaltungsempfehlungen zur nutzerfreundlichen Funktionsauslegung geben.

Der Einsatz eines hochautomatisierten Systems im Lkw in Kombination mit der gestalteten MMS kann nach den Ergebnissen der Fahrsimulatorstudie als sicher eingestuft werden. Die MMS sollte für finale Untersuchungen im Realfahrzeug implementiert und erprobt werden [202, S. 349].

7.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Auf Basis der Ergebnisse lassen sich bezüglich der aufgestellten Forschungsfrage F2 („Wie wirkt sich eine zunehmende Systemerfahrung auf die Mensch-Maschine-Interaktion bezüglich der Entwicklung des MM, des Vertrauens, der Akzeptanz und der Nutzungsintention aus?“) folgende Erkenntnisse festhalten:

- **Mentales Modell:** Die Probanden verfügen bereits zu Beginn über ein eher korrektes MM. Mit steigender Systemerfahrung gleicht sich das MM dem tatsächlich implementierten technischen Modell an. Nicht alle Probanden erreichen ein korrektes MM nach fünf Versuchsfahrten. Die Daten zeigen, dass die Probanden das hochautomatisierte System überwachen, obwohl dies nicht notwendig ist.
- **Vertrauen und Misstrauen:** Die Ergebnisse zeigen hohe Vertrauens- und niedrige Misstrauensbewertung der Probanden von Beginn an. Die hohen Vertrauens- und Misstrauensbewertungen könnten auf die hohe Korrektheit des MM zurückgeführt werden.
- **Situationsspezifisches Vertrauen:** Die Bewertungen des situationsspezifischen Vertrauens sind bereits zu Beginn hoch. Kurzfristige und langfristige Übernahmen beeinflussen das situationsspezifische Vertrauen negativ. Die Schwere der Vertrauenseinbrüche sinkt jedoch mit zunehmender Anzahl an Fahrten.
- **Akzeptanz:** Die Nützlichkeit und Zufriedenheit der Probanden weisen bereits zu Beginn ein hohes Niveau auf. Die Nützlichkeit steigt signifikant mit zunehmender Systemerfahrung.
- **Nutzungsintention:** Die wahrgenommene Nützlichkeit und Nutzerfreundlichkeit weisen ein hohes Bewertungsniveau auf und steigen mit zunehmender Anzahl an Fahrten. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Probanden eine positive Intention zur Nutzung besitzen, welche die tatsächliche Nutzung des hochautomatisierten Systems bestimmt. Die positive Einstellung steigt mit zunehmender Systemerfahrung.

8 Diskussion und Ausblick

Im Folgenden werden die gewählte Entwicklungsmethodik und die Forschungsfragen (Kapitel 3.2) diskutiert. Ein Ausblick zeigt weiteren Forschungsbedarf auf und gibt einen Einblick bezüglich dem Einsatz von Schulungskonzepten bei der Einführung hochautomatisierter Systeme, der Entwicklung des Informationsbedarfs mit steigender Systemerfahrung sowie der Übertragbarkeit der entwickelten Anzeige-/ Bedienstrategie auf höhere Automatisierungsgrade (Level 4).

8.1 Diskussion der Entwicklungsmethodik

Die Beantwortung der ersten Forschungsfrage F1 gibt Aufschluss darüber, wie eine geeignete MMS für das HAF im Lkw gestaltet sein könnte. Die Bearbeitung erfolgt unter Anwendung des nutzerzentrierten Entwicklungsansatzes der DIN EN ISO 9241-210. Diese definiert die Phasen des Gesamtvorgehens. Zur Bearbeitung der einzelnen Phasen werden geeignete Entwicklungs- und Evaluationsverfahren gewählt, entsprechend der jeweiligen Fragestellung [86, S. 627]. Das Ergebnis des iterativen, nutzerzentrierten Entwicklungsprozesses stellt eine holistische MMS dar, die den Lkw-Fahrer während aller Phasen des HAF unterstützt.

Es existieren weitere Entwicklungs- und Evaluationsverfahren im Bereich der Fahrerassistenz, wie das V-Modell (Abbildung 8.1) [203, S. 129]. Dieses stellt, im Gegensatz zur DIN EN ISO 9241, einen chronologischen Entwicklungsprozess dar.

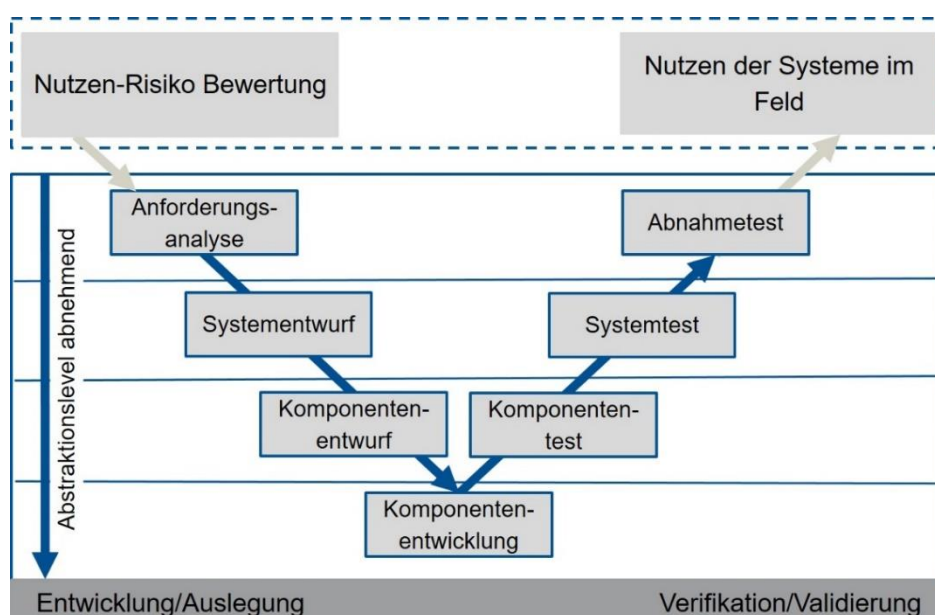


Abbildung 8.1: V-Modell der Produktentwicklung für FAS nach [204, S. 169]

In einem ersten Schritt erfolgt die Analyse der Kundenanforderungen. Darauf folgt die Entwicklung der Architektur, der Systeme und Komponenten. Abschließend erfolgt die Überprüfung der Erfüllung der anfangs aufgestellten Kundenanforderungen durch Akzeptanztests.

Durch das chronologische Vorgehen kann erst im letzten Schritt des Entwicklungsprozesses festgestellt werden, ob die Lösung den Anforderungen entspricht. Sind die Spezifikationen unvollständig oder fehlerhaft, sind alle weiteren Spezifikationen davon betroffen. Bei einer Entwicklungszeit von mindestens drei Jahren im automobilen Produktentwicklungsprozess (PEP) ziehen fehlerhafte oder unvollständige Spezifikationen erhöhte Entwicklungskosten und eine erhöhte Entwicklungszeit nach sich. Es gilt, geeignete Methoden bzw. methodische Ergänzungen zu finden, die bereits zu einem frühen Zeitpunkt, Aussagen bezüglich der Qualität der Entwicklung treffen können. Weiterhin wird gefordert, dass die Anpassung von Spezifikationen durchgehend möglich sein sollte, ohne die zuvor erstellten Inhalte maßgeblich zu verändern [203, S. 129].

Iterative, nutzerzentrierte Verfahren sollten insbesondere eingesetzt werden, wenn [144, S. 94, 203, S. 131]:

- ein hohes Entwicklungsrisiko aufgrund geringer Erfahrungen zur Kundenakzeptanz bestehen (neuartiges FAS, keine bestehende Marktdurchdringung)
- die Gestaltung der Funktions- und Datenebene des FAS noch nicht abgeschlossen ist (frühe Konzeptphase)
- frühe Aussagen bezüglich des Nutzens und der Anwendbarkeit im späteren Nutzungskontext benötigt werden
- der Fokus auf der Interaktion zwischen Fahrer und FAS liegt

Auf Basis der Erkenntnisse wird der Einsatz des iterativen, nutzerzentrierten Entwicklungsansatzes nach DIN EN ISO 9241-210 als zielführend, für die Bearbeitung der Forschungsfrage F1, bewertet.

8.2 Einsatz von Schulungskonzepten

Die Kernerkenntnis der Untersuchung der zweiten Forschungsfrage F2 („Wie wirkt sich eine zunehmende Systemerfahrung auf die Mensch-Maschine-Interaktion bezüglich der Entwicklung des MM, des Vertrauens, der Akzeptanz und der Nutzungsintention aus?) stellt die Unterstützung der Lkw-Fahrer bei der Einführung hochautomatisierter Systeme durch Schulungen dar.

SIMON [88] bestätigt die positive Wirkung eines ACC- Tutorsystems im Pkw. Forster et al. [205] untersuchen die Wirkung von Bedienungsanleitungen und aktiven Tutorsystemen auf das MM bei automatisierter Fahrt. Die Ergebnisse zeigen, dass beide Konzepte das MM und die Mensch-Maschine-Interaktion positiv beeinflussen. Auch WICKENS & XU [206, S. 13] kommen zu dem Schluss, dass Schulungsprogramme und Informationsmaterialien bei der Einführung hochautomatisierter Systeme notwendig sind. Die Übertragung negativer Effekte durch Automationsfehler auf das MM und die Vertrauenskalibrierung sollen gemindert werden. LEE & SEE [80] fordern, dass Schulungskonzepte das grundlegende Funktionsprinzip des Systems darstellen, Systemlimitationen aufzeigen und die Kausalzusammenhänge zwischen auftretenden

Verkehrssituationen und Systemreaktionen erläutern sollen. Fehler, die im MM des Fahrers vorhanden sein könnten, sollen somit korrigiert werden. Sind dem Fahrer alle potentiell mögliche Systemgrenzen bekannt, könnte dies das Vertrauen des Probanden in das System positiv beeinflussen.

8.3 Entwicklung des Informationsbedarfs mit zunehmender Systemerfahrung

Studien (Pkw) zeigen, dass sich das Informationsbedürfnis des Fahrers mit steigender Systemerfahrung ändert [105, 207, 208]. Adaptive MMS, die sich individuell an den Informationsbedarf des Fahrers anpassen, könnten eine Lösungsmöglichkeit darstellen, um die Systemakzeptanz über einen längeren Nutzungszeitraum zu fördern. Die Nutzungsintention des Fahrers könnte somit langfristig aufrechterhalten werden.

Fortführende Studien sollten die Veränderung des Informationsbedarfs im Lkw während HAF untersuchen. Weiterhin gilt es herauszufinden, welche Informationseinheiten essentiell sind, um den Fahrer zu einer sicheren Übernahme bei dem Erreichen von Systemgrenzen zu befähigen.

8.4 Übertragbarkeit auf höhere Automatisierungsgrade

Nach VDA [13] unterscheiden sich Level 3 und 4 Systeme durch die dem Fahrer zur Verfügung stehenden Zeit bis zu einer Übernahme und im systemseitigen Herstellen eines risikominimalen Zustands bei auftretenden Systemgrenzen. Kurzfristige, unvorhersehbare Übernahme-situationen, wie in Level 3 möglich, kommen per Definition bei Level 4 Systemen nicht vor.

Eine erste inhaltliche Prüfung bezüglich einer möglichen Übertragbarkeit der entwickelten Anzeige-/Bedienstrategie auf ein Level 4 System fällt positiv aus. Level 3 und Level 4 Systeme unterscheiden sich lediglich hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Zeitbudgets bei einer anstehenden Übernahme und in der Herstellung eines risikominimalen Zustands bei Systemgrenzen. Der in dieser Arbeit erfasste Informationsbedarf (Level 3) könnte folglich auch für ein Level 4 System geeignet sein. Übernahmeaufforderungen würden stets 3-stufig ausgegeben werden, durch die entwickelte MMS Strategie. Die Vereinbarkeit der MMS Strategie mit einem Level 4 System und der Informationsbedarf des Lkw-Fahrers sollte jedoch in einer weiteren Fahrsimulatorstudie getestet werden.

Die steigende Vorhersehbarkeit von Übernahmesituationen könnte das Vertrauen der Probanden in das System positiv beeinflussen. Auch die Akzeptanz und Nutzungsintention in das Gesamtsystem könnte, durch die Bearbeitung vielfältigerer FFT mit geringeren Unterbrechungsraten, steigen. Auch diese Hypothese gilt es, in weiteren Fahrsimulatorstudien mit Lkw-Fahrern zu evaluieren.

9 Zusammenfassung

Die Einführung hochautomatisierter Systeme soll die Fahraufgabe des Fahrers erleichtern, die Sicherheit des Gesamtsystems Fahrer-Fahrzeug erhöhen, das Image des Berufsbildes Kraftfahrer im Güterfernverkehr verbessern und somit dem vorherrschenden und zukünftigen Fahrermangel entgegenwirken.

Um negativen Automationseffekten, wie einem unangemessenen Vertrauen, inkorrekten MM, oder fehlenden Situations- und Systembewusstsein vorzubeugen und eine erfolgreiche Einführung hochautomatisierter Systeme zu ermöglichen, ist die Gestaltung einer nutzerzentrierten, transparenten MMS nötig. Eine eindeutige Vermittlung der Aufgabenverteilung zwischen Fahrer und Fahrzeug sowie die Förderung des Vertrauens und der Akzeptanz des Fahrers in das hochautomatisierte System sind Aufgabe der MMS. Es gilt weiterhin, die Nutzungsintention des Fahrers positiv zu beeinflussen. Nur, wenn der Fahrer das hochautomatisierte System nutzt, können die Vorteile einer Fahrzeugautomatisierung wirken.

Mithilfe des iterativen, nutzerzentrierten Entwicklungsansatzes wurde eine MMS iterativ entwickelt und evaluiert. Hierfür kamen neben qualitativen Experten- und Nutzerbefragungen auch quantitative Evaluationsmethoden zum Einsatz. Die Gestaltung der MMS erfolgt unter Einbezug aktueller Normen und Gestaltungsrichtlinien u.a., um die Gebrauchstauglichkeit der MMS sicherzustellen. Zur Anforderungsdefinition erfolgte in einem ersten Schritt die Erfassung des Informationsbedarfs während hochautomatisierter Fahrphasen, mithilfe einer qualitativen Fokusgruppe und einem explorativen Fahrsimulatorversuch. Die Ergebnisse geben Auskunft darüber, welche Informationen der Fahrer benötigt. Eine Literaturrecherche zeigt auf, welche Darstellungsformen sich für die Präsentation der Informationen eignen und beantwortet die Frage, wo Informationen dargeboten werden sollen. Für die Verortung der Informationen werden bestehende Normen, Gestaltungsrichtlinien sowie Literaturerkenntnisse herangezogen und die durch die neue Fahraufgabe entstehenden Anforderungen analysiert. Im weiteren Entwicklungsverlauf wurden iterativ Prototypen mit steigendem Detaillierungsgrad erarbeitet, evaluiert und optimiert.

Das Ergebnis des nutzerzentrierten Entwicklungsprozesses bildet eine holistische MMS, die den Fahrer durch die Darstellung kontinuierlicher Informationen während hochautomatisierter Fahrphasen und in Übernahmesituationen unterstützt. Die Bearbeitung von FFT wird dem Fahrer ermöglicht.

Menschen sind in der Lage, zu lernen und ihr Verhalten mit Erfahrung an sich ändernde Umgebungsbedingungen anzupassen. Auch das Vertrauen und die Akzeptanz weisen einen dynamischen Charakter auf und können sich mit zunehmender Systemerfahrung kalibrieren. Um die mit zunehmender Systemerfahrung entstehenden Lernprozesse zu untersuchen, wurde ein summativer Fahrsimulatorversuch durchgeführt. Hierbei wurden speziell die Veränderung des MM, des Vertrauens und der Akzeptanz, über einen Versuchszeitraum von sechs Wochen, betrachtet. Auch das Auftreten von Vergessensprozessen wurde berücksichtigt.

Die Analyse der Lern- und Gewöhnungsprozesse ergibt, dass die Probanden bereits zu Beginn über ein eher korrektes MM verfügen und sich das MM mit steigender Systemerfahrung an das tatsächlich implementierte technische Modell annähert. Der Lernprozess wird hierbei stärker durch das schriftliche Priming geleitet als durch die Systeminteraktion. Die Probanden lernen durch schriftliche Informationen schneller als durch reines Erfahrungslernen nach dem Trial-and-Error Prinzip. Es gibt keine Hinweise auf signifikantes Vergessen nach einer Woche ohne Systeminteraktion. Innerhalb des Versuchszeitraums erreicht lediglich ein Proband ein vollständiges MM über die Funktionsweise des hochautomatisierten Systems.

Hohe Vertrauensbewertungen und geringe Misstrauensbewertungen über den gesamten Versuchszeitraum hinweg kennzeichnen den Verlauf des Vertrauens. Übernahmesituationen beeinflussen das Vertrauen kurzzeitig negativ. Die Schwere der Vertrauenseinbrüche sinkt jedoch mit steigender Systeminteraktion. Die Interpretation der Vertrauensbewertungen im Zusammenhang mit den Erkenntnissen des MM deutet darauf hin, dass die Probanden nach fünf Systeminteraktionen über kein angemessenes Vertrauen verfügen.

Die Erkenntnisse weisen darauf hin, dass der Lkw- Fahrer bei der Einführung hochautomatisierter Systeme durch geeignete Schulungskonzepte unterstützt werden sollte. Das schnellstmögliche Erreichen eines korrekten MM nimmt eine bedeutende Rolle ein und ist in der Lage, das Vertrauen und die Akzeptanz positiv zu beeinflussen.

Einen positiven Entwicklungstrend zeigen die Akzeptanz, die wahrgenommene Nützlichkeit und die Nutzerfreundlichkeit. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Nutzungsintention mit zunehmender Systemerfahrung erhöht.

Die entwickelte MMS Strategie ist in der Lage, den Fahrer zu einer sicheren Interaktion mit dem hochautomatisierten System zu befähigen. Die Vorteile einer Fahrzeugautomatisierung können wirken, den Fahrzeugführer entlasten und die Sicherheit positiv beeinflussen. Der Einsatz eines hochautomatisierten Systems könnte das Berufsbild des Berufskraftfahrers positiv beeinflussen und einem fortschreitenden Fahrermangel entgegenwirken.

Um die Akzeptanz weiterhin zu fördern, sollte beachtet werden, dass sich der Informationsbedarf des Fahrers mit zunehmender Systemerfahrung ändern kann. Informationen, die zu Beginn essentiell erscheinen, könnten mit Erfahrung an Bedeutung verlieren. Diese Fragestellung stellt weiteren Forschungsbedarf dar. Eine abschließende inhaltliche Prüfung einer möglichen Übertragbarkeit der entwickelten MMS Strategie auf höhere Automatisierungsgrade ergibt, dass diese auch für eine Level 4 Automation geeignet sein könnte. Auch diese Fragestellung gilt es, in weiterführenden Nutzerstudien zu überprüfen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Prognose der Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr bis 2040 [8, S. 244-245, 9, S. 14].....	1
Abbildung 2.1: Drei- Ebenen-Modell der Fahraufgabe [26, 28, S. 6].....	6
Abbildung 2.2: Verknüpfung des 3-Ebenen Modells nach DONGES [30, S. 19] mit dem Handlungsmodell nach RASMUSSEN [31, S. 258]	7
Abbildung 2.3: Nutzermodell und Entwicklermodell nach [41, S. 51].....	9
Abbildung 2.4: Prozessmodell der Verhaltensadaptation [37, S. 79, 51]	11
Abbildung 2.5: Qualitatives Modell der Verhaltensadaptation nach RUDIN-BROWN & NOY [52, 53, S. 61].....	12
Abbildung 2.6: Driver Appropriation Modell nach COTTER & MOGLIKA [54, S. 14]	13
Abbildung 2.7: Darstellung des Situationsbewusstseins [57, S. 35]	14
Abbildung 2.8: Darstellung des Zusammenhangs zwischen mentalem Modell und dem Situationsbewusstsein [36, S. 62].....	15
Abbildung 2.9: Einteilung der Automatisierungsgrade nach VDA [13].....	16
Abbildung 2.10: Zusammenhang zwischen Aufgabenschwierigkeit, Workload und Performanz [77, S. 24].....	18
Abbildung 2.11: Darstellung des Zusammenhangs von Misstrauen, übersteigertem Vertrauen und angemessenem Vertrauen (eigene Darstellung in Anlehnung an [80, S. 55]).....	20
Abbildung 2.12: Das dynamische Vertrauensmodell nach LEE & SEE [70, S.55]	22
Abbildung 2.13: Dreistufiges Vertrauensmodell (eigene Darstellung in Anlehnung an HOFF & BASHIR 2015, S.427).....	23
Abbildung 2.14: Automations-Akzeptanzmodell nach GHAZIZADEH [82], welches das Technologie-Akzeptanz-Modell nach DAVIS [87] (grau hinterlegt) erweitert..	24
Abbildung 2.15: Darstellung möglicher Einflussfaktoren auf den Lernprozess im hochautomatisierten Fahren (eigene Darstellung).....	25
Abbildung 2.16: Entwickeltes HMI Konzept des Projektes HAVEit bestehend aus den drei Elementen Automation Scale, Automation Monitor und Message Field [100, S. 149].....	30
Abbildung 2.17: Volvo Intellisafe Anzeigeconcept [101].....	31
Abbildung 2.18: Anzeigeconcept Bosch Automated Driving [102, 104, S. 25].....	31

Abbildung 2.19: Anzeigekonzept Jack [105, S. 459].....	32
Abbildung 2.20: Konzeptstudie BMW iVision [104, S. 26, 106]	32
Abbildung 2.21: Konzeptstudie Mercedes Benz Future Truck 2025 [104, S. 27, 108]	33
Abbildung 2.22: Anzeigekonzept Scania - Active Frame. Darstellung Kombidisplay (links) und Tablet (rechts) [104, S. 26, 109]	33
Abbildung 4.1: Menschzentrierter Gestaltungsprozess nach DIN EN ISO 9241-210 ([104] nach [152, S. 15]).....	43
Abbildung 4.2: Systemklassifikation zur Gestaltung von Systemausgaben basierend auf den Prämissen des Schadensausmaßes und des vorhandenen Zeitbudgets [104, S. 14, 113, S. 54]	45
Abbildung 6.1: Darstellung der zwei Dimensionen des Prototyping: Vertikaler und horizontaler Prototyp [163, S. 94]	53
Abbildung 6.2: Ergebnis des <i>World-Café</i> Workshops: Skizze einer möglichen MMS für das HAF im Lkw.....	55
Abbildung 6.3: Entwickelter Papierprototyp (links: LED-Leiste am Lenkrad; Mitte: zusätzliches Display; Rechts: LED-Leiste in der Scheibenwurzel).....	56
Abbildung 6.4: Darstellung der Bewertungen des Videoprototypen mithilfe der ISO-Norm 9241/110 Kriterien [170].....	58
Abbildung 6.5: Deskriptive Darstellung der Bewertung des Videoprototypen mithilfe der HMI Kriterien nach [156]; (0 $\hat{=}$ „Trifft gar nicht zu“; 6 $\hat{=}$ „Trifft voll und ganz zu“)..	59
Abbildung 6.6: Dynamischer Fahrsimulator: Ansicht von innen (links), Fahrerkabine mit Bewegungssystem und 210° Sichtsystem (rechts)	61
Abbildung 6.7: Deskriptive Darstellung der DALI Bewertungen (0 = „niedrig“, 5 = „hoch“; Konzept A: keine zusätzlichen Informationen; Konzept B: Information zeitbasiert; Konzept C: Information distanzbasiert).....	62
Abbildung 6.8: Deskriptive Darstellung der Akzeptanzbewertungen (Nützlichkeit/Zufriedenheit)	63
Abbildung 6.9: Deskriptive Darstellung der UEQ Bewertungen (Konzept A: keine zusätzlichen Informationen; Konzept B: Information zeitbasiert; Konzept C: Information distanzbasiert)	64
Abbildung 6.10: Phasendiagramm der System- und HMI-Zustände	67
Abbildung 7.1: Darstellung der systemseitig handhabbaren (SH) Testsituationen.....	74
Abbildung 7.2: Darstellung der kurzfristigen, unvorhersehbaren Übernahmesituationen (KÜ) .	75
Abbildung 7.3: Darstellung der langfristigen, vorhersehbaren Übernahmesituationen (LÜ)	75
Abbildung 7.4: Versuchsablauf und Abfragezeitpunkte über einen Versuchszeitraum von 6 Wochen.....	79
Abbildung 7.5: Ergebnisse des BFI-10 Persönlichkeitsfragebogens	80
Abbildung 7.6: Darstellung der globalen Entwicklung des MM über alle 7 BZP (Wertebereich 1 - 3 $\hat{=}$ eher inkorrekt; Wertebereich 4-6 $\hat{=}$ eher korrekt).....	82

Abbildung 7.7:	Probandenspezifische Entwicklungsverläufe des MM über alle Befragungszeitpunkte. Fehlende Werte ergeben sich durch die Blockrandomisierung zur Schätzung des Primingeffekts.....	84
Abbildung 7.8:	Deskriptive Darstellung der globalen Misstrauensentwicklung (oben) und Vertrauensentwicklung (unten) über alle Fahrten nach Randomisierungsgruppen (RG) (1 $\hat{=}$ <i>Trifft gar nicht zu</i> ; 7 $\hat{=}$ <i>Trifft völlig zu</i>); Gleich kodierte Linien innerhalb der RG stellen die Vertrauens- und Misstrauensbewertung desselben Probanden dar	85
Abbildung 7.9:	Deskriptive, aggregierte Darstellung der Misstrauensbewertungen über alle Fahrten mit geschätzter, linearer Trendgerade (1 $\hat{=}$ <i>Trifft gar nicht zu</i> ; 7 $\hat{=}$ <i>Trifft völlig zu</i>).....	86
Abbildung 7.10:	Deskriptive, aggregierte Darstellung der Vertrauensbewertungen über alle Fahrten mit geschätzter, linearer Trendgerade (1 $\hat{=}$ <i>Trifft gar nicht zu</i> ; 7 $\hat{=}$ <i>Trifft völlig zu</i>).....	87
Abbildung 7.11:	Deskriptive Darstellung des situationsspezifischen Vertrauens eingeteilt nach Randomisierungsgruppe, Fahrt 1-5 und Szenario 1-13.....	88
Abbildung 7.12:	Deskriptive Darstellung der Akzeptanzbewertung (Nützlichkeit/Zufriedenheit) über alle fünf Fahrten (1 $\hat{=}$ <i>niedrig</i> , 5 $\hat{=}$ <i>hoch</i>).....	90
Abbildung 7.13:	Deskriptive Darstellung der Bewertungen der Nutzerfreundlichkeit und wahrgenommenen Nützlichkeit über alle fünf Fahrten (1 $\hat{=}$ <i>Stimme überhaupt nicht zu</i> ; 5 $\hat{=}$ <i>Stimme voll und ganz zu</i>).....	91
Abbildung 7.14:	Darstellung der Nutzerfreundlichkeit (NF) und der wahrgenommenen Nützlichkeit (WN) pro Proband und Fahrt (1 $\hat{=}$ <i>Stimme überhaupt nicht zu</i> ; 5 $\hat{=}$ <i>Stimme voll und ganz zu</i>).....	92
Abbildung 8.1:	V-Modell der Produktentwicklung für FAS nach [204, S. 169].....	103
Abbildung 9.1:	Überblick zu den sechs Szenarien in der Fahrsimulation v. l. n. r.: Freie Fahrt mit anschließender Folgefahrt (S1), Überholmanöver (S2), Baustelle (S3), fehlende Fahrbahnmarkierungen (S4), Freie Fahrt mit Sensorausfall (S5), Autobahnabfahrt (S6).....	xxvii
Abbildung 9.2:	Finale Situationsrandomisierung und Aufteilung der Versuchsstrecken (S1=Autobahnauffahrt, S2=Folgefahrt, S3=Freie Fahrt, S4=Baustelle-Ersatzfahrbahnmarkierungen, S5=Geschwindigkeitsbegrenzung, S6=Stau, S7=Baustelle-Reißverschluss, S8=Überholmanöver, S9=Regen, S10=Fehlende Fahrbahnmarkierung, S11=Notbremsung, S12=Sensorausfall, S13=Autobahnabfahrt).....	xxxi
Abbildung 9.3:	Deskriptive Auswertung des situationsspezifischen Vertrauens nach Randomisierungsgruppe 1-5, Fahrt 1-5 und Szenario 1-13.....	xxxvii

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Langzeituntersuchungen zum Erlernen von ACC-Systemen	28
Tabelle 3.1: Vergleichende Darstellung der Konzeptstudien (Kapitel 2.7), (✓ = im Konzept enthalten, - = nicht enthalten/ keine Auskunft)	40
Tabelle 5.1: Darstellung der ermittelten Informationseinheiten für das HAF im Lkw	50
Tabelle 6.1: Ergebnisse des Conover Post-hoc Tests des paarweisen Vergleichs der MMS Konzeptvarianten;.....	64
Tabelle 7.1: Fragestellungen und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung des mentalen Modells (MM) mit steigender Systemerfahrung.....	70
Tabelle 7.2: Fragestellung und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung des Vertrauens (VT) und Misstrauens (MT) mit steigender Systemerfahrung	70
Tabelle 7.3: Fragestellung und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung der Nutzungsintention (NI) mit zunehmender Systemerfahrung.....	71
Tabelle 7.4: Fragestellung und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung der Akzeptanz (A) mit steigender Systemerfahrung	71
Tabelle 7.5: Permutationsplan der zu durchfahrenden Strecken A-E pro Randomisierungsgruppe (RG)	76
Tabelle 7.6: Deskriptive Statistik (MW, MD und SD) des globalen MM über alle BZP und alle Probanden.....	82
Tabelle 7.7: Deskriptive Statistik (MW, MD und SD) der globalen Misstrauensentwicklung über alle Befragungszeitpunkte (BZP) und alle Probanden	85
Tabelle 7.8: Deskriptive Statistik (MW, MD und SD) der globalen Vertrauensentwicklung über alle Befragungszeitpunkte (BZP).....	86
Tabelle 7.9: Lage- und Streuungsmaße der Nützlichkeit und Zufriedenheit (MW = Mittelwert; MD= Median; SD= Standardabweichung)	89
Tabelle 7.10: Lage- und Streuungsmaße der wahrgenommenen Nützlichkeit und Nutzerfreundlichkeit	90
Tabelle 7.11: Fragestellungen und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung des mentalen Modells (MM) mit zunehmender Systemerfahrung.....	95
Tabelle 7.12: Fragestellung und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung des Vertrauens (VT) und Misstrauens (MT) mit zunehmender Systemerfahrung	95

Tabelle 7.13: Fragestellung und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung des situationsspezifischen Vertrauens (SV) mit zunehmender Systemerfahrung96

Tabelle 7.14: Fragestellung und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung der Akzeptanz (A) mit zunehmender Systemerfahrung97

Tabelle 7.15: Fragestellung und abgeleitete Hypothesen zur Entwicklung der Nutzungsintention (NI) mit zunehmender Systemerfahrung98

Tabelle 9.1: Darstellung der im Workshop erfassten Prüf szenarien, mit Beschreibung und Einteilung in Kategorien (systemseitig handhabbare Situation = SH; Langfristige Übernahme = LÜ; Kurzfristige Übernahme = KÜ) xxviii

Tabelle 9.2: Finale Auftretenshäufigkeit und Situationsdauer xxx

Tabelle 9.3: Deskriptive Statistik (MW) der Persönlichkeitsdimensionen mit Referenzwerten [193]xxxv

Tabelle 9.4: Deskriptive Statistik des Mentalen Modells auf Itemebene nach Befragungszeitpunkt 6.....xxxv

Literaturverzeichnis

- [1] D. A. Norman, "Some Observations on Mental Models," in *Mental models*, D. Gentner und A. L. Stevens, Hrsg, 1st Aufl, Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 1983, S. 7–14.
- [2] D. Lohre, T. Bernecker, und W. Stock. (12.04.2019). *ZF Zukunftsstudie Fernfahrer: Der Mensch im Transport- und Logistikmarkt*. [Online] Verfügbar: https://www.zf-zukunftsstudie.de/wp-content/uploads/2012/08/ZF_LKW_Studie_gesamt.pdf.
- [3] H. Gaida. (12.04.2019). *Mensch am Steuer: Fahrer lenken den Güterverkehr*. [Online] Verfügbar: https://www.btk.de/fileadmin/Karriere/BTK_Studie_Mensch_am_Steuer.pdf.
- [4] J. Brauckmann, und W. Echterhoff. *Einflüsse auf Gesundheit, Verkehrssicherheit und Wirtschaftlichkeit von LKW-Fahrern im Güterfernverkehr: Eine Studie der Gesellschaft für Ursachenforschung bei Verkehrsunfällen e.V. im Auftrag von TÜV Rheinland*, 2007.
- [5] M. Michaelis. *Gesundheitsschutz und Gesundheitsförderung von Berufskraftfahrern: Forschung Projekt F 2038*. Dortmund, Berlin, Dresden: BAuA, 2008.
- [6] B. Lenz et al. (20.06.2017). *Shell Lkw-Studie: Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030*. [Online] Verfügbar: www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/portal.../Shell_Lkw_Studie_FIN_17042010.pdf.
- [7] Bundesamt für Güterverkehr. (20.06.2017). *Marktbeobachtung Güterverkehr: Auswertung der Arbeitsbedingungen in Güterverkehr und Logistik 2016- I - Fahrerberufe*. [Online] Verfügbar: https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Marktbeobachtung/Turnusberichte_Arbeitsbedingungen/Bericht_5E_Fahrerberufe_2016-I.html.
- [8] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. *Verkehr in Zahlen 2017/18*, 45. Aufl. Hamburg: DVV Media Group, 2017.
- [9] J. Adolf et al. *Shell Nutzfahrzeug-Studie: Diesel oder alternative Antriebe - Womit fahren Lkw und Bus morgen? Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040*. Hamburg, 2016.
- [10] Destatis. . *Unfallentwicklung auf deutschen Strassen 2017*. [Online] Verfügbar: https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressekonferenzen/2018/verkehrsunfaelle_2017/Pressebrochure_unfallentwicklung.pdf?__blob=publicationFile.
- [11] M. Kühn, und L. Hannawald, "Verkehrssicherheit und Potenziale von Fahrerassistenzsystemen," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 55–70.
- [12] T. M. Gasser. *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe; Bericht zum Forschungsprojekt F 1100.5409013.01*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für neue Wiss, 2012.

- [13] H.-T. Ebner. (01.09.2017). *Motivation und Handlungsbedarf für Automatisiertes Fahren*. [Online] Verfügbar: www.dvr.de/download2/p3745/3745_0.pdf.
- [14] D. Manzey, "Systemgestaltung und Automatisierung," in *Human factors: Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen ; mit 17 Tabellen*, P. Badke-Schaub, Hrsg, Heidelberg: Springer, 2008, S. 307–324.
- [15] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (22.06). *Ethik-Kommission: Automatisiertes und vernetztes Fahren*. [Online] Verfügbar: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Presse/084-dobrindt-bericht-der-ethik-kommission.html?nn=12830>.
- [16] F. Naujoks *et al*, "Improving Usefulness of Automated Driving by Lowering Primary Task Interference through HMI Design," *Journal of Advanced Transportation*, Bd. 2017, Rn. 3, S. 1–12, 2017.
- [17] V. Venkatesh, und F. D. Davis, "A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies," *Management Science*, Bd. 46, Rn. 2, S. 186–204, 2000.
- [18] D. Garcia *et al*, "Measuring Trust of Autonomous Vehicles: A Development and Validation Study," in *Communications in Computer and Information Science, HCI International 2015 - Posters' Extended Abstracts*, C. Stephanidis, Hrsg, Cham: Springer International Publishing, 2015, S. 610–615.
- [19] S. Brandenburg, F. Roche, und M. Thuring, "Kognitionspsychologische Erkenntnisse zum hochautomatisierten Fahren – eine Übersicht," in *11. VDI-Tagung: Fahrzeugsicherheit*, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2017.
- [20] F. Saad *et al*. (17.05.2017). *Literature review of behavioural effects*. [Online] Verfügbar: http://www.aide-eu.org/pdf/sp1_deliv_new/aide_d1_2_1.pdf.
- [21] S. Geyer, "Entwicklung und Evaluierung eines kooperativen Interaktionskonzepts an Entscheidungspunkten für die teilautomatisierte, manöverbasierte Fahrzeugführung," Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2013.
- [22] G. Geiser, "Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug," *Automobiltechnische Zeitschrift*, Rn. 87, S. 77–84, 1985.
- [23] D. Damböck, "Automationseffekte im Fahrzeug: Von der Reaktion zur Übernahme," Dissertation, Technische Universität München, München, 2013.
- [24] W. Spießl, "Assessment and Support of Error Recognition in Automated Driving," Dissertation, Technische Universität München, München, 2011.
- [25] R. Bernotat, "Anthropotechnik in der Fahrzeugführung," (ger), *Ergonomics*, Bd. 13, Rn. 3, S. 353–377, 1970.
- [26] E. Donges, "Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen," *Automobil-industrie*, Rn. 27, S. 183–190, 1982.
- [27] J. A. Michon, "A critical view of driver behavior models: What do we know, what should we do?," in *Human behavior and traffic safety*, L. Evans und R. C. Schwing, Hrsg, New York: Plenum Press, 1985, S. 485–520.
- [28] T. Lindberg, "Entwicklung einer ABK-Metapher für gruppierte Fahrerassistenzsysteme," Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2011.

-
- [29] B. Abendroth, und R. Bruder, "Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 3–15.
- [30] E. Donges, "Fahrerverhaltensmodelle," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 17–26.
- [31] J. Rasmussen, "Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models," *IEEE Trans. Syst, Man, Cybern*, Bd. SMC-13, Rn. 3, S. 257–266, 1983.
- [32] J. Rasmussen. *Information processing and human-machine interaction: An approach to cognitive engineering*. New York, N.Y.: North-Holland, 1986.
- [33] P. N. Johnson-Laird. *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*, 6. Aufl. Cambridge: Harvard Univ. Press, 1983.
- [34] J. M. Carroll, und J. R. Olson. *Mental Models in Human-Computer Interaction*. Washington, D.C.: National Academies Press, 1987.
- [35] J. R. Wilson, und A. Rutherford, "Mental Models: Theory and Application in Human Factors," *Human factors*, Bd. 31, Rn. 5, S. 617–634, 1989.
- [36] M. R. Endsley, "Situation Models: An Avenue to the Modeling of Mental Models," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Bd. 44, Rn. 1, S. 61–64, 2000.
- [37] B. Schlag, und G. Weller, "Verhaltenswissenschaftliche Aspekte von Fahrerassistenzsystemen," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 71–84.
- [38] F. T. Durso, K. A. Rawson, und S. Giroto, "Comprehension and Situation Awareness," in *Handbook of applied cognition*, F. T. Durso und R. S. Nickerson, Hrsg, 2nd Aufl, Chichester [etc.]: Wiley, 2008, S. 163–193.
- [39] M. Beggiano, "Changes in motivational and higher level cognitive processes when interacting with in-vehicle automation," Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2014.
- [40] C. Cherri, E. Nodari, und A. Toffetti. (30.06.2017). *Review of Existing Tools and Methods: AIDE*. [Online] Verfügbar: http://www.aide-eu.org/pdf/sp2_deliv_new/aide_d2_1_1.pdf.
- [41] A. Butz, und A. Krüger. *Mensch-Maschine-Interaktion*, 2. Aufl. Oldenburg: De Gruyter, 2017.
- [42] H. Schmidtke, und R. Bernotat. *Ergonomie*, 3. Aufl. München: Hanser, 1993.
- [43] C. D. Wickens, S. E. Gordon, und Y. Liu. *An introduction to human factors engineering*, 2. Aufl. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [44] P. M. Fitts, und M. I. Posner. *Human performance*. Westport, Connecticut: Greenwood Press Publishers, 1979.
- [45] H. Marienfeld, "Modelle für den "Regler Mensch" - ein Praktikumsversuch," in *Der Mensch als Regler*, W. Oppelt und G. Vossius, Hrsg, Berlin: VEB Verlag, 1970, S. 19–42.

- [46] F. Schmithüsen. *Lernskript Psychologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [47] H. Ebbinghaus. *Über das Gedächtnis: Untersuchungen zur experimentellen Psychologie*. Leipzig: Duncker & Humblot, 1885.
- [48] A. Newell, und P. S. Rosenbloom, "Mechanisms of Skill acquisition and the law of practice," in *Carnegie Mellon Symposia on Cognition Series, Cognitive Skills and Their Acquisition*, J. R. Anderson, Hrsg, London: Taylor and Francis, 2013, S. 1–55.
- [49] G. L. Lacroix, und D. Cousineau, "The introduction to the special issue on "RT(N) = a + b N-c: The power law of learning 25 years later"," *TQMP*, Bd. 2, Rn. 2, S. 38–42, 2006.
- [50] Organisation for Economic Co-operation and Development. *Behavioural adaptations to changes in the road transport system*. Road Transport Research Programme. Paris, 1990.
- [51] B. Schlag, Hrsg. *Verkehrspsychologie: Mobilität - Sicherheit - Fahrerassistenz*. Lengerich: Pabst Science Publ, 2004.
- [52] C. Rudin-Brown, und Y. Ian Noy, "Investigation of Behavioral Adaptation to Lane Departure Warnings," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Bd. 1803, S. 30–37, 2002.
- [53] C. M. Rudin-Brown, und H. A. Parker, "Behavioural adaptation to adaptive cruise control (ACC): Implications for preventive strategies," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Bd. 7, Rn. 2, S. 59–76, 2004.
- [54] S. Cotter und A. Mogilka. (06.07.2017). *Methodologies for the assessment of ITS in terms of driver appropriation processes over time*. [Online] Verfügbar: http://www.transport-research.info/sites/default/files/project/documents/20130201_090718_81352_E-6-HUMANIST_TRL_deliverable_VA1.pdf.
- [55] M. R. Endsley, "Automation and Situation Awareness," in *Human factors in transportation, Automation and human performance: Theory and applications*, R. Parasuraman, Hrsg, Mahwah, NJ: Erlbaum, 1996, S. 163–181.
- [56] N. Rauch, B. Gradenegger, und H.-P. Krüger, "Darf ich oder darf ich nicht?: Situationsbewusstsein im Umgang mit Nebenaufgaben während der Fahrt," *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, Bd. 63, Rn. 1, S. 3–16, 2009.
- [57] M. R. Endsley, "Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems," *hum factors*, Bd. 37, Rn. 1, S. 32–64, 1995.
- [58] M. R. Endsley, "Theoretical underpinnings of situation awareness: A critical review," in *Situation awareness analysis and measurement*, M. R. Endsley und D. J. Garland, Hrsg, Boca Raton: CRC Press, 2000, S. 1–24.
- [59] M. R. Endsley, "Situation awareness global assessment technique (SAGAT)," in *Proceedings of the IEEE 1988 National Aerospace and Electronics Conference: IEEE*, 1988, S. 789–795.
- [60] C. D. Wickens. *Situation awareness: limitations and enhancement in the aviation environment*. Neuilly-sur-Seine: AGARD, 1996.
- [61] R. Parasuraman, T. B. Sheridan, und C. D. Wickens, "A model for types and levels of human interaction with automation," *IEEE Trans. Syst, Man, Cybern. A*, Bd. 30, Rn. 3, S. 286–297, 2000.

- [62] R. Parasuraman, und V. Riley, "Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse," *hum factors*, Bd. 39, Rn. 2, S. 230–253, 1997.
- [63] I. Othersen. *Vom Fahrer zum Denker und Teilzeitlenker: Einflussfaktoren und Gestaltungsmerkmale nutzerorientierter Interaktionskonzepte für die Überwachungsaufgabe des Fahrers im teilautomatisierten Modus*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [64] T. B. Sheridan. *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. Cambridge: MIT Press, 1992.
- [65] M. R. Endsley, und Kaber, David, B, "Level of automation effects on performance, situaton awareness and workload in a dynamic control task," *Ergonomics*, Bd. 42, Rn. 3, S. 462–492, 1999.
- [66] C. D. Wickens, und J. G. Hollands. *Engineering psychology and human performance*, 3. Aufl. Upper Saddle River, N.J, London: Prentice Hall, 2010.
- [67] N. Richardson *et al*, "Assessing Truck Drivers' and Fleet Managers' Opinions Towards Highly Automated Driving," in *Advances in Intelligent Systems and Computing, Advances in Human Aspects of Transportation*, N. A. Stanton, S. Landry, G. Di Bucchianico, und A. Vallicelli, Hrsg, Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 473–484.
- [68] F. Naujoks, K. Wiedemann, und N. Schömig, "The Importance of Interruption Management for Usefulness and Acceptance of Automated Driving," in *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '17*, New York, New York, USA: ACM Press, 2017, S. 254–263.
- [69] F. Naujoks, D. Befelein, und A. Neukum, "Welche Aspekte fahrfremder Tätigkeiten schränken die Übernahmefähigkeit beim hochautomatisierten Fahren ein?," S. 1–13, 2016.
- [70] F. Naujoks, C. Purucker, und A. Neukum, "Secondary task engagement and vehicle automation – Comparing the effects of different automation levels in an on-road experiment," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Bd. 38, S. 67–82, 2016.
- [71] D. Damböck, M. Farid, L. Tönert, und K. Bengler. . *Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren*
- [72] I. Petermann-Stock *u.a.* , Hrsg. *Wie lange braucht der Fahrer?: Eine Analyse zu Übernahmezeiten aus verschiedenen Nebentätigkeiten während einer hochautomatisierten Staufahrt*, 2013.
- [73] M. Schreiber, "Konzeptionierung und Evaluierung eines Ansatzes zu einer manöverbasierten Fahrzeugführung im Nutzungskontext Autobahnfahrten," Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2012.
- [74] H. Winner *u.a.* , Hrsg. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012.
- [75] T. M. Gasser, A. Seeck, und B. W. Smith, "Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 27–54.
- [76] T. B. Sheridan, "Supervisory Control," in *Handbook of human factors and ergonomics*, G. Salvendy, Hrsg, 3rd Aufl, Hoboken: Wiley, 2006, S. 1025–1052.

- [77] D. d. Waard, "The measurement of drivers' mental workload," Dissertation, University of Groningen, Groningen, 1996.
- [78] L. Bainbridge, "Ironies of automation," *Automatica*, Bd. 19, Rn. 6, S. 775–779, 1983.
- [79] M. R. Endsley, und E. O. Kiris, "The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation," *hum factors*, Bd. 37, Rn. 2, S. 381–394, 2016.
- [80] J. D. Lee, und K. A. See, "Trust in Automation: Designing for Appropriate Reliance," *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Bd. 46, Rn. 1, S. 50–80, 2004.
- [81] D. Manzey, und J. E. Bahner, "Vertrauen in Automation als Aspekt der Verlässlichkeit von Mensch-Maschine-Systemen," in *Beiträge zur Mensch-Maschine-Systemtechnik aus Forschung und Praxis: Festschrift für Klaus-Peter Timpe*, K. Karrer und J. E. Bahner, Hrsg, 1st Aufl, Düsseldorf: Symposion Publ, 2005, S. 93–109.
- [82] M. Ghazizadeh, J. D. Lee, und L. N. Boyle, "Extending the Technology Acceptance Model to assess automation," *Cogn Tech Work*, Bd. 14, Rn. 1, S. 39–49, 2012.
- [83] B. M. Muir, und N. Moray, "Trust in automation. Part II. Experimental studies of trust and human intervention in a process control simulation," (eng), *Ergonomics*, Bd. 39, Rn. 3, S. 429–460, 1996.
- [84] M. Beggiato, und J. Krems, "Auswirkungen erwarteter und unerwarteter Systemgrenzen von Adaptive Cruise Control auf das Situationsbewusstsein im Zeitverlauf," in *VDI-Berichte*, Bd. 2205, 7. *VDI-Tagung Der Fahrer im 21. Jahrhundert: Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit ; Braunschweig, 5. und 6. November 2013*, VDI, Hrsg, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2013, S. 119–132.
- [85] K. A. Hoff, und M. Bashir, "Trust in automation: integrating empirical evidence on factors that influence trust," (eng), *Human factors*, Bd. 57, Rn. 3, S. 407–434, 2015.
- [86] W. König, "Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 621–632.
- [87] F. D. Davis, "Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology," *MIS Quarterly*, Bd. 13, Rn. 3, S. 319, 1989.
- [88] J. H. Simon, "Learning to drive with Advanced Driver Assistance Systems: Empirical studies of an online tutor and a personalised warning display on the effects of learnability and the acquisition of skill," Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2005.
- [89] F. Saad, "Some critical issues when studying behavioural adaptations to new driver support systems," *Cogn Tech Work*, Bd. 8, Rn. 3, S. 175–181, 2006.
- [90] E. Heit, "Properties of inductive reasoning," *Psychonomic Bulletin & Review*, Bd. 7, Rn. 4, S. 569–592, 2000.
- [91] S. K. Carpenter *et al*, "Using Spacing to Enhance Diverse Forms of Learning: Review of Recent Research and Implications for Instruction," *Educ Psychol Rev*, Bd. 24, Rn. 3, S. 369–378, 2012.
- [92] J. J. Donovan, und D. J. Radosevich, "A meta-analytic review of the distribution of practice effect: Now you see it, now you don't," *Journal of Applied Psychology*, Bd. 84, Rn. 5, S. 795–805, 1999.

- [93] M. Weinberger, "Der Einfluß von Adaptive Cruise Control auf das Fahrerverhalten," Dissertation, Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, München, 2000.
- [94] M. Prince, "Epidemiology," in *Core psychiatry*, P. Wright, Hrsg, 3rd Aufl, Edinburgh: Saunders, 2012, S. 115–129.
- [95] V. Ojeda und F. Nathan. (17.05.17). *AIDE: Driver support and information systems: Experiments on learning, appropriation and effects of adaptiveness*. [Online] Verfügbar: www.aide-eu.org/pdf/sp1_deliv_new/aide_d1_2_3.pdf.
- [96] Y. Forster *et al*, "Learning and development of mental models during interactions with driving automation: A simulator study," in *Proceedings of the 10th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, 2019, S. 398–404.
- [97] M. Beggiano *et al*, "Learning and development of trust, acceptance and the mental model of ACC. A longitudinal on-road study," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Bd. 35, S. 75–84, 2015.
- [98] F. Saad, "Dealing with Behavioural Adaptations to Advanced Driver Support Systems," in *Modelling driver behaviour in automotive environments: Critical issues in driver interactions with intelligent transport systems*, P. C. Cacciabue, Hrsg, London: Springer-Verlag London, 2007, S. 147–161.
- [99] F. Flemisch *et al*, "Design of Human Computer Interfaces for Highly Automated Vehicles in the EU-Project HAVEit," in *Lecture Notes in Computer Science, Universal Access in Human-Computer Interaction. Context Diversity*, D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell, M. Naor, O. Nierstrasz, C. Pandu Rangan, B. Steffen, M. Sudan, D. Terzopoulos, D. Tygar, M. Y. Vardi, G. Weikum, und C. Stephanidis, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 270–279.
- [100] R. Hoeger *et al*. (02.05.2019). *HAVEit - The future of driving.: Final Report (D61.1)*. [Online] Verfügbar: http://www.haveit-eu.org/LH2Uploads/ItemsContent/24/HAVEit_212154_D61.1_Final_Report_Published.pdf.
- [101] Volvo Car Group. (02.05.2019). *Volvo Cars reveals safe and seamless user interface for self-driving cars*. [Online] Verfügbar: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/167739/volvo-cars-reveals-safe-and-seamless-user-interface-for-self-driving-cars>.
- [102] Bosch Mobility Solutions. (02.05.2019). *EN | Bosch User experience for automated driving*. [Online] Verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=2i-t0C7RQWM>.
- [103] Bosch Mobility Solutions. (02.05.2019). *Automated Driving*. [Online] Verfügbar: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/highlights/automated-mobility/automateddriving/>.
- [104] L. Flohr, "Evaluation und Optimierung einer multimodalen Mensch-Maschine-Schnittstelle für das hochautomatisierte Fahren im Lkw," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2018.
- [105] L. Bendewald *et al*, "„Jack“ – A holistic approach of designing a human machine interface for highly-automated driving," in *17. Internationaler Kongress ELIV*, VDI Wissensforum GmbH, Hrsg, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2015, S. 453–467.

- [106] BMWi. (02.05.2019). *BMW i Vision Future Interaction*. [Online] Verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=LqCVfn7mwgw&frags=pl%2Cwn>.
- [107] C. Brünglinghaus. (02.05.2019). *BMW i Vision Future Interaction: Ausblick auf das vernetzte Cockpit*. [Online] Verfügbar: <https://www.springerprofessional.de/fahrzeugtechnik/ergonomie---hmi/bmw-i-vision-future-interaction-ausblick-auf-das-vernetzte-cockp/7074598>.
- [108] Daimler AG. (02.05.2019). *Mercedes Future Truck 2025*. [Online] Verfügbar: https://www.youtube.com/watch?v=mRkOGU3Gz9Y&ab_channel=DaimlerAG.
- [109] A. Kleen *et al*, "Automatische Fahrfunktion und Mobile Devices: HMI- Konzept "Active Frame": Darstellung von system- und umweltbezogenen Informationen auf Tablet PCs während der automatischen Fahrt," in Bd. 2223, 30. *VDI-VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit*, VDI Wissensforum GmbH, Hrsg, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2014.
- [110] L. Hackenberg *et al*, "Licht oder Sound?: Evaluation von diffusen Modalitäten zur Fahrerunterstützung während des teilautomatisierten Fahrens," in 16. *Internationaler Kongress Elektronik im Fahrzeug*, VDI Wissensforum GmbH, Hrsg, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2013, S. 663–676.
- [111] I. Petermann-Stock *et al*, "'Bitte übernehmen Sie das Fahren!" Ein multimodaler Vergleich von Übernahmestrategien," in *Tagungsband zur AAET 2015 - Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, AAET, Hrsg, Braunschweig: ITS Niedersachsen e.V, 2015, S. 345–369.
- [112] K. Maier. *Multimodaler Warnbaukasten: Entwicklung einer neuen Warnphilosophie für Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung unfallkritischer Bremsszenarien*, 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2014.
- [113] R. J. M. Lermer. *Konzeption und Bewertung eines fahrsituations- und fahrerleistungsadaptiven Warn- und Informationsmanagers*. Berlin: dissertation.de, 2010.
- [114] S. M. Petermeijer, J. C. F. de Winter, und K. J. Bengler, "Vibrotactile Displays: A Survey With a View on Highly Automated Driving," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst*, Bd. 17, Rn. 4, S. 897–907, 2016.
- [115] S. Petermeijer, F. Doubek, und J. de Winter, "Driver response times to auditory, visual, and tactile take-over requests: A simulator study with 101 participants," in *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*: IEEE, 2017, S. 1505–1510.
- [116] S. Osterwald, "Secondary Tasks, Risks and Benefits arising with increasing HUD Sizes," in *Secondary Tasks: An overview of current trends, developments, and research in human-computer interaction*, E. von Zezschwitz, A. Hang, D. Hausen, R. Häuslschmid, A. Hösl, F. Lauber, S. Löhmann, H. Palleis, B. Slawik, S. Stusak, S. Tausch, A. Butz, und H. Hussmann, Hrsg, 2014, S. 39–46.
- [117] N. Miličić, "Sichere und ergonomische Nutzung von Head-Up Displays im Fahrzeug," Dissertation, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München, München, 2010.
- [118] R. Azuma *et al*, "Recent advances in augmented reality," *IEEE Comput. Grap. Appl*, Bd. 21, Rn. 6, S. 34–47, 2001.

- [119] M. Schneid, "Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-up-Displays im Fahrzeug," Dissertation, Technische Universität München, München, 2008.
- [120] B. Israel, "Potenzial eines kontaktanalogen Head-up Displays für den Serien-einsatz," Dissertation, Technische Universität München, München, 2012.
- [121] M. Götze, und K. Bengler, "Urban Driving: Where to Present What Types of Information – Comparison of Head-Down and Head-Up Displays," in *Lecture Notes in Computer Science, Human Interface and the Management of Information. Information and Knowledge in Context*, S. Yamamoto, Hrsg, Cham: Springer International Publishing, 2015, S. 190–200.
- [122] D. Damböck *et al*, "Evaluation of a Contact Analog Head-Up Display for Highly Automated Driving," in *Advances in human factors and ergonomics series, Advances in human aspects of road and rail transportation*, N. A. Stanton, Hrsg, Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2013, S. 3–12.
- [123] L. Lorenz, P. Kerschbaum, und J. Schumann, "Designing take over scenarios for automated driving," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Bd. 58, Rn. 1, S. 1681–1685, 2014.
- [124] A. P. van den Beukel. *Driving automation interface design: Supporting drivers' changing role*, 2016.
- [125] I. Politis, S. Brewster, und F. Pollick, "Using Multimodal Displays to Signify Critical Handovers of Control to Distracted Autonomous Car Drivers," *International Journal of Mobile Human Computer Interaction*, Bd. 9, Rn. 3, S. 1–16, 2017.
- [126] F. Utesch, "Unscharfe Warnungen im Kraftfahrzeug: Eignet sich eine LED-Leiste als Anzeige für Fahrerassistenzsysteme?," Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2014.
- [127] Blanco, M, Atwood, J, Vasquez, H. M, Trimble, T. E, Fitchett, V. L, Radlbeck, J. *et al*. (15.10.2018). *Human factors evaluation of level 2 and level 3 automated driving concepts: Report No. DOT HS 812 182*. [Online] Verfügbar: https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/812182_humanfactorseval-l2l3-automdrivingconcepts.pdf.
- [128] S. S. Borojeni *et al*, "Assisting Drivers with Ambient Take-Over Requests in Highly Automated Driving," in *the 8th International Conference*, S. 237–244.
- [129] Marc Dziennus, Johann Kelsch, und Anna Schieben. (23.01.2019). *Ambient light based interaction concept for an integrative driver assistance system*. [Online] Verfügbar: https://www.researchgate.net/publication/310361609_Ambient_light_based_interaction_concept_for_an_integrative_driver_assistance_system.
- [130] Y. Forster, F. Naujoks, und A. Neukum, "Your Turn or My Turn?," in *Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - Automotive'UI 16*, New York, New York, USA: ACM Press, 2016, S. 253–260.
- [131] T. Hesse *et al*, "Towards User-Centred Development of Integrated Information, Warning, and Intervention Strategies for Multiple ADAS in the EU Project interactiVe," in Bd. 6767, *Universal Access in Human-Computer Interaction. Context Diversity: UAHCI 2011. Lecture Notes in Computer Science*, C. Stephanidis, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 280–289.

- [132] F. Naujoks, C. Mai, und A. Neukum, "The effect of urgency of take-over requests during highly automated driving under distraction conditions," in *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, 2014, S. 2099–2106.
- [133] C. Ho, N. Reed, und C. Spence, "Multisensory in-car warning signals for collision avoidance," (eng), *hum factors*, Bd. 49, Rn. 6, S. 1107–1114, 2007.
- [134] S. Petermeijer *et al*, "Take-over again: Investigating multimodal and directional TORs to get the driver back into the loop," (eng), *Applied ergonomics*, Bd. 62, S. 204–215, 2017.
- [135] M. Walch *et al*, "Autonomous Driving: Investigating the Feasibility of Bimodal Take-Over Requests," *International Journal of Mobile Human Computer Interaction*, Bd. 9, Rn. 2, S. 58–74, 2017.
- [136] S. M. Belz, G. S. Robinson, und J. G. Casali, "Auditory Icons as Impending Collision System Warning Signals in Commercial Motor Vehicles," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Bd. 42, Rn. 15, S. 1127–1131, 2016.
- [137] F. Naujoks, A. Kiesel, und A. Neukum, "Cooperative warning systems: The impact of false and unnecessary alarms on drivers' compliance," (eng), *Accident; analysis and prevention*, Bd. 97, S. 162–175, 2016.
- [138] C. D. Wickens, R. S. Gutzwiller, und A. Santamaria, "Discrete task switching in overload: A meta-analysis and a model," *International Journal of Human-Computer Studies*, Bd. 79, S. 79–84, 2015.
- [139] W. J. Horrey, C. D. Wickens, und K. P. Consalus, "Modeling drivers' visual attention allocation while interacting with in-vehicle technologies," (eng), *Journal of experimental psychology. Applied*, Bd. 12, Rn. 2, S. 67–78, 2006.
- [140] V. Melcher *et al*, "Take-Over Requests for Automated Driving," *Procedia Manufacturing*, Bd. 3, S. 2867–2873, 2015.
- [141] J. Beller, M. Heesen, und M. Vollrath, "Improving the Driver–Automation Interaction," *Human factors*, Bd. 55, Rn. 6, S. 1130–1141, 2013.
- [142] T. Helldin *et al*, "Presenting system uncertainty in automotive UIs for supporting trust calibration in autonomous driving," in *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '13*, New York, New York, USA: ACM Press, 2013, S. 210–217.
- [143] F. Naujoks *et al*, "A Human-Machine Interface for Cooperative Highly Automated Driving," in *Advances in Human Aspects of Transportation (AHFE 2016)*, N. A. Stanton, S. Landry, G. Di Bucchianico, und A. Vallicelli, Hrsg, Cham: Springer, 2017, S. 585–595.
- [144] S. Hofauer, "Fahrer - Fahrzeug - Interaktion einer automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung," Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2017.
- [145] D. Miller *et al*, "Distraction Becomes Engagement in Automated Driving," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Bd. 59, Rn. 1, S. 1676–1680, 2016.
- [146] A. Miglani, C. Diels, und J. Terken, "Compatibility between Trust and Non-Driving Related Tasks in UI Design for Highly and Fully Automated Driving," in *the 8th International Conference*, S. 75–80.

- [147] M. Kyriakidis *et al*, "A human factors perspective on automated driving," *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, Bd. 53, S. 1–27, 2017.
- [148] M. Seitz, "Informationsmanagement im Nutzfahrzeug," Dissertation, Technische Universität München, München, 2013.
- [149] M. Beggiato, und J. F. Krems, "The evolution of mental model, trust and acceptance of adaptive cruise control in relation to initial information," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Bd. 18, S. 47–57, 2013.
- [150] N. Döring, und J. Bortz. *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [151] J. Block, und J. H. Block, "Venturing a 30-year longitudinal study," (eng), *The American psychologist*, Bd. 61, Rn. 4, S. 315–327, 2006.
- [152] *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*, DIN EN ISO 9241-210:2010, 2011.
- [153] *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110:2006)*, DIN EN ISO 9241-110, 2008.
- [154] J. Nielsen, "Enhancing the explanatory power of usability heuristics," in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems celebrating interdependence - CHI '94*, New York, New York, USA: ACM Press, 1994, S. 152–158.
- [155] R. Molich, und J. Nielsen, "Improving a human-computer dialogue," *Commun. ACM*, Bd. 33, Rn. 3, S. 338–348, 1990.
- [156] van den Beukel, A. P., & van der Voort, M. C., "Design considerations on user-interaction for semi-automated driving," in *Proceedings of the FISITA 2014 World Automotive Congress*, 2015, S. 1–8.
- [157] F. Naujoks *et al*, "Towards guidelines and verification methods for automated vehicle HMIs," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Bd. 60, S. 121–136, 2019.
- [158] A. Butz, und A. Krüger. *Mensch-Maschine-Interaktion*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2014.
- [159] J.C.F. D. Winter, P.M. van Leuween, und R. Happee. . *Advantages and Disadvantages of Driving Simulators: A Discussion*
- [160] N. Richardson *et al*, "Erfassung und Bewertung des Informationsbedarfs von Lkw-Fahrern während hochautomatisierter Fahrt," in *9. VDI Tagung: Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Der Mensch im Fokus technischer Innovationen*, VDI Wissensforum GmbH, Hrsg, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2017.
- [161] A. Neukum. *Kontrollierbarkeit - Systematik und Status Quo der Methodik; Teilprojekt URBAN - Bericht zum Arbeitspaket 1000: Problembereiche und methodische Zugänge - Unveröffentlichter Forschungsbericht*. Würzburg, 2013.
- [162] K. Charmaz. *Constructing grounded theory: A practical guide through qualitative analysis*. London, Thousand Oaks, Calif.: Sage Publications, 2006.
- [163] J. Nielsen. *Usability engineering*, 17. Aufl. Amsterdam: morgan Kaufmann, 2009.

- [164] P. Holleis, "Integrating Usability Models into Pervasive Application Development," Dissertation, Fakultät für Mathematik, Informatik und Statistik, Ludwig-Maximilians-Universität München, München, 2008.
- [165] J. Brown, D. Isaacs, und W. Cafe Community. *The World Café: Shaping Our Futures Through Conversations That Matter*. San Francisco: Berrett-Koehler Publishers Inc, 2005.
- [166] N. T. Richardson *et al*, "Conceptual design and evaluation of a human machine interface for highly automated truck driving," in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*: IEEE, 2018, S. 2072–2077.
- [167] F. Sarodnick, und H. Brau. *Methoden der Usability Evaluation*, 2. Aufl. s.l.: Verlag Hans Huber, 2011.
- [168] J. Nielsen. (06.07.2017). *How Many Test Users in a Usability Study?* [Online] Verfügbar: <https://www.nngroup.com/articles/how-many-test-users/>.
- [169] J. Brooke. *SUS: a "quick and dirty" usability scale*. London: Taylor and Francis, 1986.
- [170] J. Prümper und M. Anft. (02.11.2017). *ISONORM 9241/110 (Langfassung): Beurteilung von Software auf Grundlage der Internationalen Ergonomie-Norm DIN EN ISO 9241-110*. [Online] Verfügbar: people.f3.htw-berlin.de/Professoren/Pruemper/.../ISO-NORM%209241-110-L.pdf.
- [171] J. Breuer, C. von Hugo, und Mücke, Stephan, Tattersall, Simon, "Nutzerorientierte Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 183–196.
- [172] N. T. Richardson, L. Flohr, und B. Michel, "Takeover Requests in Highly Automated Truck Driving: How Do the Amount and Type of Additional Information Influence the Driver–Automation Interaction?," *MTI*, Bd. 2, Rn. 4, S. 68, 2018.
- [173] A. Neukum, und H.-P. Krüger, "Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen: Untersuchungsmethoden und Bewertungskriterien. VDI-Berichte 1791," S. 297–318, 2003.
- [174] A. Pauzié, "A method to assess the driver mental workload: The driving activity load index (DALI)," *IET Intell. Transp. Syst*, Bd. 2, Rn. 4, S. 315, 2008.
- [175] J. D. van der Laan, A. Heino, und D. d. Waard, "A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 5, Rn. 1, S. 1–10, 1997.
- [176] B. Laugwitz, T. Held, und M. Schrepp, "Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire," in Bd. 5298, *HCI and usability for education and work: 4th Symposium of the Workgroup Human-Computer Interaction and Usability Engineering of the Austrian Computer Society*, A. Holzinger, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, S. 63–76.
- [177] M. Schrepp, A. Hinderks, und J. Thomaschewski, "Design and Evaluation of a Short Version of the User Experience Questionnaire (UEQ-S)," *IJIMAI*, Bd. 4, Rn. 6, S. 103, 2017.
- [178] F. J. Neyer, J. Felber, und C. Gebhardt, "Entwicklung und Validierung einer Kurzsкала zur Erfassung von Technikbereitschaft," *Diagnostica*, Bd. 58, Rn. 2, S. 87–99, 2012.
- [179] C. Gold *et al*, "Trust in Automation – Before and After the Experience of Take-over Scenarios in a Highly Automated Vehicle," *Procedia Manufacturing*, Bd. 3, S. 3025–3032, 2015.

- [180] S. Hergeth, L. Lorenz, J. Krems, und L. Tönert. . *Effects of Take-Over Requests and Cultural Background on Automation Trust in Highly Automated Driving*
- [181] M. Kienle *et al*, "Concept and development of a unified ontology for generating test and use-case catalogues for assisted and automated vehicle guidance," *IET Intell. Transp. Syst*, Bd. 8, Rn. 3, S. 183–189, 2014.
- [182] A. Knapp, M. Neumann, M. Brockmann, R. Walz, und T. Winkle. . *RESPONSE 3: Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS*. [Online] Verfügbar: https://www.acea.be/uploads/publications/20090831_Code_of_Practice_ADAS.pdf.
- [183] H. Winner *u.a.* , Hrsg. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [184] F. Naujoks, S. Hergeth, A. Keinath, K. Wiedemann, und N. Schömig. (19.09.2018). *Use Cases for Assessing, Testing, and Validating the Human Machine Interface of Automated Driving Systems*. [Online] Verfügbar: https://www.researchgate.net/publication/326548503_Use_Cases_for_Assessing_Testing_and_Validating_the_Human_Machine_Interface_of_Automated_Driving_Systems?_iepl%5BviewId%5D=hc2NhwdVZODd-gEwnkXNFwwl&_iepl%5Bcontexts%5D%5B0%5D=projectUpdatesLog&_iepl%5BtargetEntityId%5D=PB%3A326548503&_iepl%5BinteractionType%5D=publicationTitle.
- [185] C. Gold *et al*, "Testing Scenarios for Human Factors Research in Level 3 Automated Vehicles," in *Advances in Human Aspects of Transportation. AHFE 2017.: Advances in Intelligent Systems and Computing*, Cham: Springer, 2018, S. 551–559.
- [186] B. Rammstedt *et al*, "A Short Scale for Assessing the Big Five Dimensions of Personality: 10 Item Big Five Inventory (BFI-10)," 2017.
- [187] G. Pöhler, T. Heine, und B. Deml, "Itemanalyse und Faktorstruktur eines Fragebogens zur Messung von Vertrauen im Umgang mit automatischen Systemen," *Z. Arb. Wiss*, Bd. 70, Rn. 3, S. 151–160, 2016.
- [188] R. D. Brown, und S. M. Galster, "Effects of Reliable and Unreliable Automation on Subjective Measures of Mental Workload, Situation Awareness, Trust and Confidence in a Dynamic Flight Task," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Bd. 48, Rn. 1, S. 147–151, 2004.
- [189] S. Hergeth *et al*, "Keep Your Scanners Peeled: Gaze Behavior as a Measure of Automation Trust During Highly Automated Driving," (eng), *Human factors*, Bd. 58, Rn. 3, S. 509–519, 2016.
- [190] S. Hergeth, "Automation Trust in Conditional Automated Driving Systems: Approaches to Operationalization and Design," Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2016.
- [191] N. T. Richardson, A. J. Sprung, und B. Michel, "Entwicklung und Validierung eines Fragebogens zur Erfassung des mentalen Modells für das hochautomatisierte Fahren," *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, Bd. 73, Rn. 2, S. 1–12, 2019.
- [192] Bundesamt für Güterverkehr. (01.05.2019). *Marktbeobachtung Güterverkehr: Sonderbericht über die aktuelle Fahrpersonalsituation im deutschen Güterkraftverkehrsgewerbe*. [Online] Verfügbar: https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Marktbeobachtung/Sonderberichte/Sonderber_Fahrpersonal.pdf?__blob=publicationFile.

- [193] B. Rammstedt *et al*, "Eine kurze Skala zur Messung der fünf Dimensionen der Persönlichkeit: Big-Five-Inventory-10 (BFI-10)," *GESIS-Working Papers 2012|22*, Rn. 22, S. 1–32, https://www.gesis.org/fileadmin/kurzskalen/working_papers/BFI10_Workingpaper.pdf, 2012.
- [194] S. N. Wood. *Generalized Additive Models: An Introduction with R, Second Edition*. Portland: CRC Press, 2017.
- [195] S. Ferrari, und F. Cribari-Neto, "Beta Regression for Modelling Rates and Proportions," *Journal of Applied Statistics*, Bd. 31, Rn. 7, S. 799–815, 2004.
- [196] J. Cohen, "A power primer," *Psychological Bulletin*, Bd. 112, Rn. 1, S. 155–159, 1992.
- [197] T. Vogelpohl, M. Vollrath, und M. Kühn. (27.07.17). *Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung: Teil 2: Müdigkeit und lange Fahrtdauer als Einflussfaktoren auf die Sicherheit nach einer Übernahmeaufforderung*. Forschungsbericht Nr. 47. [Online] Verfügbar: <https://udv.de/download/file/fid/10237>.
- [198] K. L. Campbell, "SHRP2 Naturalistic Driving Study: Addressing Driver Performance and Behavior in Traffic Safety," *TR News 282*, S. 30–36, https://insight.shrp2nds.us/documents/shrp2_background.pdf, 2012.
- [199] H. v. Benda. *Die Häufigkeit von Verkehrssituationen: Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung*, 116. Bergisch-Gladbach, 1985.
- [200] H.-P. Schöner, und B. Morys, "Dynamische Fahrassistenten," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 139–154.
- [201] J. Breuer, "Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen," in *Praxis, Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, H. Winner, S. Hakuli, und G. Wolf, Hrsg, 2nd Aufl, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012, S. 55–68.
- [202] M. Burmester *et al*, "Usability- Der Mensch im Fahrzeug," in *Vieweg Praxiswissen, Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug: Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen*, A. Meroth und B. Tolg, Hrsg, 1st Aufl.: Vieweg, 2008, S. 321–355.
- [203] S. Hakuli, und M. Krug, "Virtuelle Integration," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 125–138.
- [204] P. Seining, und A. Weitzel, "Testverfahren für Verbraucherschutz und Gesetzgebung," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 167–182.
- [205] Y. Forster *et al*, "User Education in Automated Driving: Owner's Manual and Interactive Tutorial Support Mental Model Formation and Human-Automation Interaction," *Information*, Bd. 10, Rn. 4, S. 143, 2019.
- [206] C. D. Wickens und X. Xu. (27.04.2019). *Automation Trust, Reliability and Attention HMI 02-03: Technical Report AHFD-02-14/MAAD-02-2*. [Online] Verfügbar: <https://pdfs.semanticscholar.org/99e3/a8dd2a8bf1b7eccf850e63e014da22b5b6d5.pdf>.
- [207] P. Reilhac *et al*, "Cockpitkonzept für das teilautomatisierte Fahren," *ATZ Automobiltech Z*, Bd. 118, Rn. 3, S. 44–49, 2016.

- [208] A. Miglani, "User Interface Design for Highly and Fully Automated Driving: Designing for system trust and comfort in non-driving related tasks," Masterarbeit, University of Technology Eindhoven, Eindhoven, 2017.

Anhang

Anhang A	Gestaltungsrichtlinien.....	xxiv
Anhang B	Prüfszenarien formative Fahrsimulatorstudie	xxvii
Anhang C	Prüfszenarien und Streckenrandomisierung	xxviii
Anhang D	Items zur Erfassung der Nutzungsintention	xxxii
Anhang E	Modellformeln	xxxiii
Anhang F	Statistische Berechnungen	xxxv

Anhang A **Gestaltungsrichtlinien**

A.1 Zehn Usability Heuristiken nach NIELSEN & MOLICH [155]

1. Sichtbarkeit des Systemzustandes

Visibility of system status

The system should always keep users informed about what is going on, through appropriate feedback within reasonable time.

2. Übereinstimmung zwischen System und der Realwelt

Match between system and the real world

The system should speak the users' language, with words, phrases and concepts familiar to the user, rather than system-oriented terms. Follow real-world conventions, making information appear in a natural and logical order

3. Benutzerkontrolle und Zufriedenheit

User control and freedom

Users often choose system functions by mistake and will need a clearly marked "emergency exit" to leave the unwanted state without having to go through an extended dialogue. Support undo and redo.

4. Konsistenz und Standards

Consistency and standards

Users should not have to wonder whether different words, situations, or actions mean the same thing. Follow platform conventions

5. Fehlerprävention

Error prevention

Even better than good error messages is a careful design which prevents a problem from occurring in the first place. Either eliminate error-prone conditions or check for them and present users with a confirmation option before they commit to the action.

6. Erkennen anstatt Erinnern

Recognition rather than recall

Minimize the user's memory load by making objects, actions, and options visible. The user should not have to remember information from one part of the dialogue to another. Instructions for use of the system should be visible or easily retrievable whenever appropriate.

7. Flexibilität und Effizienz

Flexibility and efficiency of use

Accelerators -- unseen by the novice user -- may often speed up the interaction for the expert user such that the system can cater to both inexperienced and experienced users. Allow users to tailor frequent actions.

8. Ästhetik und minimalistisches Design

Aesthetic and minimalist design

Dialogues should not contain information which is irrelevant or rarely needed. Every extra unit of information in a dialogue competes with the relevant units of information and diminishes their relative visibility.

9. Hilfe beim Erkennen, Diagnostizieren und Beheben von Fehlern

Help users recognize, diagnose, and recover from errors

Error messages should be expressed in plain language (no codes), precisely indicate the problem, and constructively suggest a solution.

10. Hilfe und Dokumentation

Help and documentation

Even though it is better if the system can be used without documentation, it may be necessary to provide help and documentation. Any such information should be easy to search, focused on the user's task, list concrete steps to be carried out, and not be too large.

A.2 MMS Kriterien nach VAN DEN BEUKEL& VAN DEN VOORT [156, S. 4]

- Providing appropriate Trust
- Avoiding behavioural adaption
- Avoiding mode confusion
- Avoiding confusion about the driver's role
- Avoiding erroneous counter-reactions
- Influence mental model to be at a moderate level
- Directing attention to vital information
- Sharing authority
- Avoid mode confusion by informing the driver appropriately about system state. In addition, an interface needs to enable drivers to check the automation state any moment
- Provide instructions with respect to the required role of the driver, especially at moments of mode-changes in order to avoid confusion about the required driver's role
- Promote driver readiness and keep the driver at a reasonable level in the loop.
- Support the driver to return in the control-loop fast and easily. For example, force feedback and interruption of secondary tasks might be considered to actively direct attention away from the secondary task back to the driving task
- Support awareness of the systems operational envelope; helping drivers understand the boundary limits within which the automation is able to operate
- Avoid counter-reactions from automation after mode-changes

A.3 MMS Richtlinien für das HAF nach NAUJOKS ET AL. [157]

#	Richtlinie
1	Unintentional activation and deactivation should be prevented
2	The system mode should be displayed continuously
3	System state changes should be effectively communicated
4	Visual interfaces used to communicate system states should be mounted to a suitable position and distance. High-priority information should be presented close to the driver's expected line of sight
5	HMI elements should be grouped together according to their function to support the perception of mode indicators
6	Time-critical interactions with the system should not afford continuous attention
7	The visual interface should have a sufficient contrast in luminance and/or colour between foreground and background
8	Texts (e.g., font types and size of characters) and symbols should be easily readable from the permitted seating position
9	Accepted or standardized symbols should be used to communicate the automation mode. Use of non-standard symbols should be supplemented by additional text explanations or vocal phrase/s
10	The semantic of a message should be in accordance with its urgency
11	Messages should be conveyed using the language of the users (e.g., national language, avoidance of technical language, use of common syntax)
12	Text messages should be as short as possible
13	Not more than five colours should be consistently used to code system states (excluding white and black)
14	The colours used to communicate system states should be in accordance with common conventions and stereotypes
15	Design for colour-blindness by redundant coding and avoidance of red/green and blue/yellow combinations
16	Auditory output should raise the attention of the driver without startling her/him or causing pain
17	Auditory and vibrotactile output should be adapted to the urgency of the message
18	High-priority messages should be multimodal
19	Warning messages should orient the user towards the source of danger
20	In case of sensor failures, their consequences and required operator steps should be displayed

Anhang B Prüfszenarien formative Fahrstudie

B.1 Szenarien und Streckendesign

Jede der drei Versuchsfahrten enthält sechs Verkehrssituationen (), die auf einem Expertenworkshop zur Identifikation Lkw-spezifischer Autobahnszenarien basieren. Bei der freien Fahrt, Folgefahrt (S1) und dem Überholvorgang (S2) handelt es sich um Szenarien, die das hochautomatisierte System bewältigen kann. Bei der Baustelle (S3), den fehlenden Fahrbahnmarkierungen (S4), der freien Fahrt mit Sensorausfall (S5) und der Autobahnabfahrt (S6) handelt es sich um Szenarien, die das hochautomatisierte System nicht bewältigen kann.



Abbildung 9.1: Überblick zu den sechs Szenarien in der Fahrsimulation v. l. n. r.: Freie Fahrt mit anschließender Folgefahrt (S1), Überholmanöver (S2), Baustelle (S3), fehlende Fahrbahnmarkierungen (S4), Freie Fahrt mit Sensorausfall (S5), Autobahnabfahrt (S6)

Anhang C Prüfzenarien und Streckenrandomisierung

C.1 Ableitung der relevanten Testszenarien

Die Ableitung der Prüfzenarien für den zugrundeliegenden Langzeitversuch erfolgt mithilfe eines Expertenworkshops [160]. Fünf Experten aus dem Bereich Funktionsentwicklung schätzen die zukünftigen Systemfähigkeiten und -limitationen eines hochautomatisierten Systems für Lkw ein. Die Ergebnisse werden mit den vorherrschenden Definitionen (Kapitel 2.2.2) für hochautomatisierte Systeme abgeglichen und erweitert. Das Ergebnis ergibt einen Katalog mit zwölf Prüfzenarien (Tabelle 9.1).

Tabelle 9.1: Darstellung der im Workshop erfassten Prüfzenarien, mit Beschreibung und Einteilung in Kategorien (systemseitig handhabbare Situation = SH; Langfristige Übernahme = LÜ; Kurzfristige Übernahme = KÜ)

Verkehrssituation	Beschreibung	Kategorie
1. Freie Fahrt auf der Autobahn	Fahren ohne Geschwindigkeitsbegrenzung	SH
2. Folgefahrt auf der Autobahn	Folgen eines vorausfahrenden Fahrzeugs	SH
3. Überholmanöver	Überholen langsamerer Fahrzeuge auf Ego-Spur	SH
4. Geschwindigkeitsbegrenzung	Fahren auf Streckenabschnitten mit Geschwindigkeitsbegrenzung	SH
5. Stau	Geschwindigkeitsreduktion aufgrund hohen Verkehrsaufkommens	SH
6. Notbremsung	Durchführung einer Notbremsung durch Auffahren auf ein plötzliches entstandenes Stauende	SH
7. Baustelle (gelbe Ersatzfahrbahnmarkierung)	Verengung der Fahrbahn	SH
8. Baustelle (Reißverschlussverfahren)	Reduktion der Fahrspuren bedingt durch eine Baustelle	LÜ
9. Autobahnauf-/abfahrt	Auffahren / Abfahren von der Autobahn	LÜ
10. Regen	Sensorausfall durch Witterung	KÜ
11. Fehlende Fahrbahnmarkierung	Schlecht sichtbare oder fehlende Fahrbahnmarkierungen	KÜ
12. Sensorausfall	Sensorausfall ohne ersichtlichen Grund	KÜ

C.2 Erfassung der Auftretenshäufigkeit im realen Straßenverkehr

Mithilfe einer Onlineumfrage wird in Anlehnung an BREUER ET AL. [171] die relative Auftretenshäufigkeit der Szenarios im Straßenverkehr erfasst. Insgesamt nehmen 49 männliche Lkw-

Fahrer (Alter MW:48,84 Jahre; SD: 9,52 Jahre; Fahrleistung MW: 57.592 km) an der Umfrage teil. Die Lkw-Fahrer sollen angeben, wie häufig die in Tabelle 9.1 aufgelisteten Szenarien auftreten. Die Fahrer werden gebeten 100% die Prüfscenarien bezüglich der Auftretenshäufigkeit zu verteilen. Die Szenarios Autobahnauffahrt, Autobahnabfahrt und Sensorausfall werden nicht in die Beurteilung mit einbezogen. Für das Szenario Sensorausfall kann durch die Lkw-Fahrer keine Einschätzung stattfinden, weil es beim manuellen Fahren nicht auftritt. Die Szenarien Autobahnauffahrt respektive Abfahrt werden in der simulierten Strecke jeweils einmalig zu Beginn und Ende realisiert. Die Schätzung der Auftretenshäufigkeit ist nicht notwendig.

Tabelle 9.2 stellt die erfassten mittleren Auftretenshäufigkeiten der relevanten Prüfscenarien in der Realität dar und zeigt, dass die Szenarien Notbremsung (2,27%) und Fehlende Fahrbahnmarkierung im Mittel am seltensten und die Szenarien Folgefahrt (15,02%) und Freie Fahrt (11,46%) im Mittel am häufigsten auftreten.

Ein Abgleich der erhaltenen Prüfscenarien mit den Prämissen aus der Literatur zeigt, dass die Anforderungen erfüllt werden. So enthält die Liste der Prüfscenarien Situationen die Systemfähigkeiten (Verfügbarkeit/ Aktivierung) und Systemlimitationen darstellen. Ein Vergleich der Anforderungen von [185] mit den ausgewählten Szenarien zeigt, dass Szenarien mit allen Schwierigkeitsstufen hinsichtlich Dringlichkeit, Vorhersagbarkeit, Kritikalität und Fahrerreaktion vorhanden sind. Die Forderungen des Response CoP sind nicht vollständig erfüllt, weil der Fehlerfall False-Negative entfällt. Diese Tatsache ist auf die BaSt-Definition für hochautomatisierte System (Level 3) zurückzuführen. Nach dieser ist das System in der Lage alle Systemgrenzen zu erkennen. Das Ausbleiben einer erwarteten Systemreaktion (False negative) tritt somit nicht auf.

C.3 Ableitung der Situationshäufigkeit

Für die Erstellung der repräsentativen Versuchsfahrten, erfolgt in einem nächsten Schritt die Bestimmung der Häufigkeit der einzelnen Szenarien. Es wird eine Rangreihenfolge gebildet, beginnend mit der Häufigkeit 1 für das seltenste Szenario Notbremsung. Das Szenario Folgefahrt bildet mit 10 Wiederholungen das häufigste Szenario innerhalb der Gesamtstrecke (Tabelle 9.2). Da für Testsituation 12 (Sensorausfall) keine subjektive Einschätzung erhoben werden kann, wird die Situationshäufigkeit durch Experten geschätzt. Bei einer geschätzten Ausfallrate von 12-mal pro 100.000 km, wird die Situation Sensorausfall nur einmalig in der Simulation umgesetzt.

C.4 Ableitung der Situationsdauer

Die Berechnung der Dauer des jeweiligen Szenarios erfolgt mithilfe der erfassten mittleren prozentualen Häufigkeitsanteile. Für eine Versuchsfahrtgesamtdauer von 225 Minuten (5 Fahrten á 45 Minuten) ergibt sich bspw. für das Szenario Folgefahrt eine Dauer von 33,8 Minuten insgesamt. Dividiert durch die Auftretenshäufigkeit des Szenarios Folgefahrt, ergibt sich eine Dauer von 3,38 Minute für die Situation Folgefahrt. Das Szenario Folgefahrt muss über alle fünf Versuchsfahrten folglich 10x dargeboten werden. Der Zeitanteil einer Folgefahrt liegt bei 3,8 Minuten. Das beschriebene Vorgehen wird für alle Szenarien für die Berechnung der Häufigkeit und der Dauer der Szenarien angewendet. Die erhaltenen Zeiten und Häufigkeiten zeigt Tabelle 9.2.

Tabelle 9.2: Finale Auftretenshäufigkeit und Situationsdauer

Situation	Anteil in %	Anteil in Minuten	Auftretenshäufigkeit
Folgefahrt	15,02	33,8	10x
Freie Fahrt	11,46	25,8	9x
Baustelle	11	24,8	8x
Geschwindigkeits- begrenzung	10,37	23,3	7x
Stau	10,31	23,2	6x
Baustelle (Reißverschluss)	10	22,5	5x
Überholen	8,8	19,8	4x
Regen	6,27	14,1	3x
Fehlende Fahr- bahnmarkierung	2,38	5,4	2x
Notbremsung	2,27	5,1	1x
Sensorfehler	2,27	5,1	1x

C.5 Randomisierung der Situationsreihenfolge

Um Reihenfolgeeffekten innerhalb und zwischen den Fahrten zu vermeiden, werden die Prüfzenarien mit ihren jeweiligen Anteilen und Auftretenshäufigkeiten vollständig randomisiert und in einer Kette aufgereiht. Das Ergebnis stellt eine Kette von insgesamt 56 randomisierten Szenarien dar. In einem zweiten Schritt erfolgt eine Aufteilung in fünf Abschnitte, mit 12 respektive 13 Szenarien.

Die Durchführung einer retrospektiven Plausibilitätsprüfung ergibt, dass jede der fünf Strecken zwischen 43 und 45 Minuten dauert und somit den aufgestellten Anforderungen an das experimentelle Design entspricht. Das Ergebnis stellt fünf Testfahrten dar, die 12 respektive 13 verschiedene Testsituationen in unterschiedlichen Häufigkeitsanteilen enthalten (Abbildung 9.2).

- ⋯ Ungeplante manuelle Fahrt
- Geplante manuelle Fahrt
- HAF
- Geplante Übernahme
- ⋯ Ungeplante Übernahme

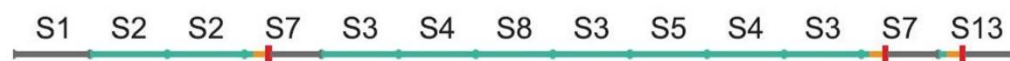
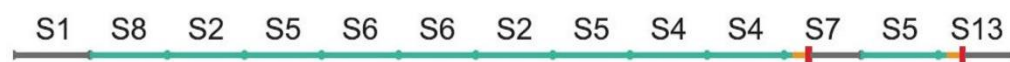
Strecke 1**Strecke 2****Strecke 3****Strecke 4****Strecke 5**

Abbildung 9.2: Finale Situationsrandomisierung und Aufteilung der Versuchsstrecken (S1=Autobahnaufahrt, S2=Followfahrt, S3=Freie Fahrt, S4=Baustelle- Ersatzfahrbahnmarkierungen, S5=Geschwindigkeitsbegrenzung, S6=Stau, S7=Baustelle-Reißverschluss, S8=Überholmanöver, S9=Regen, S10=Fehlende Fahrbahnmarkierung, S11=Notbremsung, S12=Sensorausfall, S13=Autobahnabfahrt)

Anhang D Items zur Erfassung der Nutzungsintention

D.1 Nutzungsintention: Technologie / Automations- Akzeptanz Modell (TAM/AAM)

Wahrgenommene Nützlichkeit (6 Items; [87]) [-2 trifft gar nicht zu; +2 trifft voll zu]

- Die Nutzung hochautomatisierter Systeme erlaubt es mir, andere Aufgaben schneller zu erledigen.
- Die Nutzung hochautomatisierter Systeme verbessert meine Arbeitsleistung.
- Die Nutzung hochautomatisierter Systeme steigert die Produktivität bei meiner Arbeit.
- Die Nutzung hochautomatisierter Systeme erhöht meine Effektivität bei der Arbeit.
- Die Nutzung hochautomatisierter Systeme erleichtert meine Arbeit.
- Ich empfinde hochautomatisierte Systeme bei meiner Arbeit als nützlich.

Nutzerfreundlichkeit (6 Items, [87]) [-2 trifft gar nicht zu; +2 trifft voll zu]

- Es ist einfach, die Nutzung hochautomatisierter Systeme zu erlernen.
- Es ist einfach zu erreichen, dass das hochautomatisierte System so reagiert, wie ich möchte.
- Meine Interaktion mit hochautomatisierten Systemen ist klar und verständlich.
- Mit hochautomatisierten Systemen kann man flexibel interagieren.
- Es ist einfach, Erfahrung mit dem hochautomatisierten System zu sammeln.
- Das hochautomatisierte System ist einfach zu bedienen.

Anhang E Modellformeln

E.1 Mentales Modell - Mittelwert als Zielgröße

$$y_{it} = \eta_{it} + \varepsilon_{it} = \beta_0 + f(t, z_{it}) + b_{0,i} + b_{1,i}t + b_{2,it}z_{it} + \varepsilon_{it}$$

wobei

- y_{it} die mittlere Zustimmung des Probanden $i = 1, \dots, 21$ zur Fahrt $t = 0, \dots, 6$
- η_{it} der gesamte lineare Prädiktor exklusive
- Fehlerterm ε_{it}
- t die t -te Fahrt
- β_0 Intercept
- z_{it} die Anzahl Primings des i -ten Probanden bei der t -ten Fahrt
- $f(t, z_{it})$ der nicht-lineare Priming-Fahrten-Effekt
- $b_{0,i}$ ein probandenspezifischer Intercept des Probanden i
- $b_{1,i}$ ein probandenspezifischer Fahrteneffekt und
- $b_{2,it}$ ein probandenspezifischer Primingeffekt

ist.

Im weiteren wurde zu η_{it} noch $x_i\beta_1$, der Einfluss der Technikbereitschaft x_i mit Effekt β_1 hinzugefügt.

E.2 Beta-Regression

Modelliert wird der Erwartungswert μ_{it} von y_{it} :

$$g(\mu_{it}) = \eta_{it}$$

mit

$$g(\mu_{it}) = \log(\mu_{it}/(1 - \mu_{it})).$$

E.3 Situationsspezifisches Vertrauen

Es wird wieder eine Beta-Regression für den Erwartungswert des Vertrauens μ_{it} des Probanden $i = 1, \dots, 21$ zur Fahrt $t = 1, \dots, 5$ berechnet:

$$g(\mu_{it}) = \eta_{it}$$

mit linearem Prädiktor η_{it} als

$$\begin{aligned} & \beta_0 + \gamma \cdot t + f(s_{it}) + I(u_{it} = 1)\delta_1 + I(u_{it} = 2)\delta_2 + t \cdot I(u_{it} = 1)\beta_1 + t \cdot I(u_{it} \\ & = 2)\beta_2 + b_{0,i} + b_{1,i}t + s_{it}b_{2,i} \end{aligned}$$

wobei

- γ der Fahrteneffekt
- $f(s_{it})$ der nicht-lineare Effekt des Szenarios
- u_{it} die Art der Übernahme ist (0 = keine, 1 = langfr., 2 = kurzfr.)
- δ_1 bzw. δ_2 der Effekt der langfr. oder kurzfr. Übernahme
- β_1 bzw. β_2 der sich mit den Fahrten verändernde Effekt der langfr. oder kurzfr. Übernahme
- $b_{0,i}, b_{1,i}$ wie oben
- $b_{2,i}$ der probandenspezifische Szenarioeffekt

ist. Alle weiteren Größen entsprechen der Definition im mentalen Modell.

Im weiteren wurden ein Effekt ν für die Persönlichkeit p_i des Probanden i als $p_i\nu$ mit in den linearen Prädiktor aufgenommen.

Anhang F Statistische Berechnungen

F.1. Auswertung der Persönlichkeit und Referenzwerte nach Rammstedt et al. [193]

Tabelle 9.3: Deskriptive Statistik (MW) der Persönlichkeitsdimensionen mit Referenzwerten [193]

Dimension	Stichprobe summative Evaluation [n=21]	Referenzwert
Extraversion	3,76	3,50
Neurotizismus	2,29	2,47
Offenheit	3,55	3,45
Gewissenhaftigkeit	4,21	4,21
Verträglichkeit	3,45	3,44

F.2 MM Bewertung auf Itemebene nach BZP 6

Tabelle 9.4: Deskriptive Statistik des Mentalen Modells auf Itemebene nach Befragungszeitpunkt 6

#	Item	Korrektheit (MW)
23	das hochautomatisierte System funktioniert in komplexen Baustellen	2,71
13	Im Fall eines Fehlers kann das hochautomatisierte System an Straßenrand stehen bleiben	3,37
11	der Fahrer muss immer aufpassen, dass sich das hochautomatisierte System richtig verhält	3,41
2	das hochautomatisierte System funktioniert bei Regen	3,59
3	das hochautomatisierte System kann die Fahraufgabe von Anfang bis Ende übernehmen	3,84
4	das hochautomatisierte System funktioniert nur auf der Autobahn	4,13
8	das hochautomatisierte System funktioniert ohne Straßenmarkierungen	4,18
25	Der Fahrer muss das Fahrzeug innerhalb von Sekunden übernehmen	4,22
17	das hochautomatisierte System funktioniert bei Geschwindigkeiten zwischen 0 bis 80 km/h	4,66
5	das hochautomatisierte System erkennt, wenn es eine Situation nicht meistern kann	4,74
24	das hochautomatisierte System funktioniert bei gelben, aufgeklebten Fahrspurmarkierungen	4,76
12	das hochautomatisierte System kann eine Notbremsung durchführen	5,08
14	das hochautomatisierte System kann langsamere Fahrzeug überholen	5,36

22	das hochautomatisierte System beachtet alle Verkehrszeichen auf der Autobahn	5,45
21	das hochautomatisierte System kann mit einem Stau umgehen	5,47
20	das hochautomatisierte System lenkt automatisch	5,63
18	das hochautomatisierte System passt die Geschwindigkeit an die des vorausfahrenden Fahrzeugs an	5,71
26	das hochautomatisierte System hält sich an die vorgegebene Geschwindigkeit	5,72
2	der Fahrer muss das hochautomatisierte System bewusst aktivieren	5,76

F.3 Deskriptive Auswertung des situationsspezifischen Vertrauens

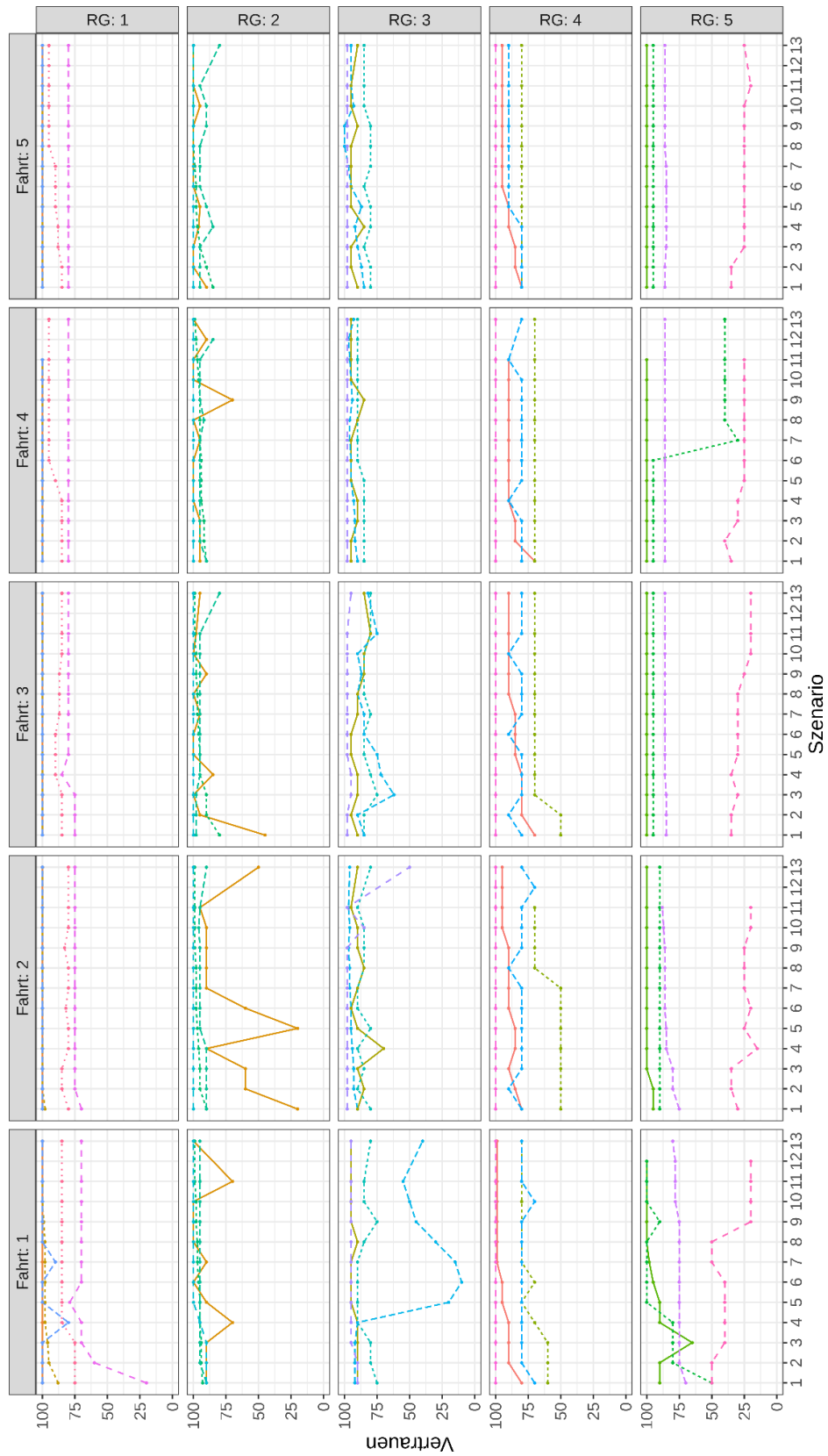


Abbildung 9.3: Deskriptive Auswertung des situationsspezifischen Vertrauens nach Randomisierungsgruppe 1-5, Fahrt 1-5 und Szenario 1-13