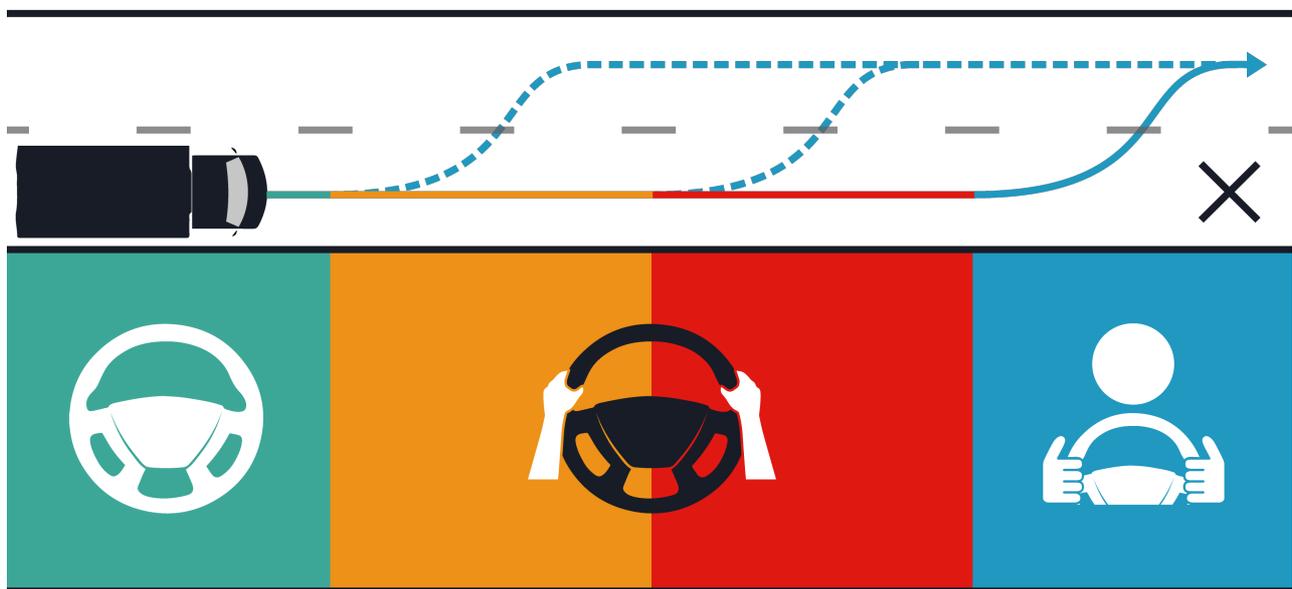


Evaluation und Optimierung einer multi-modalen Mensch-Maschine-Schnittstelle für das hochautomatisierte Fahren im Lkw

Evaluation and Optimization of a Multimodal Human-Machine Interface for Highly Automated Driving in Trucks



Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

Master of Science (M. Sc.)

an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München

Betreut von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp
Natalie Richardson, M. Sc.
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Eingereicht von Lukas Flohr, B. A.
Schleißheimer Straße 227
80809 München

Eingereicht am 08.10.2018

Aufgabenstellung

Evaluation und Optimierung einer multimodalen Mensch-Maschine-Schnittstelle für das hochautomatisierte Fahren im Lkw

Die Einführung hochautomatisierter Systeme stellt neue Anforderungen an den Fahrer. Da der Fahrer nicht mehr permanent die Fahrzeugführung überwachen muss, findet ein Tausch von ehemaliger Haupt- und Nebenaufgabe statt. Freigewordene Zeiträume können genutzt werden, um neue fahrfremde Tätigkeiten auszuführen. Da der Fahrer nach wie vor als Rückfallebene bei Systemausfällen zur Verfügung stehen muss, benötigt der Fahrer eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle, die ihn während Übernahmephasen unterstützt und diesem permanent ein akkurates Bild der Fahrsituation vermittelt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Evaluation und Optimierung einer bestehenden multimodalen Mensch-Maschine-Schnittstelle für das hochautomatisierte Fahren im Lkw mithilfe einer Probandenstudie am dynamischen Lkw Fahrsimulator.

Folgende Punkte sind durch Herrn Lukas Flohr zu bearbeiten:

- Literaturrecherche zu den Themen hochautomatisiertes Fahren, Automationseffekte, Normen und Richtlinien zur Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen sowie aktuellen Konzeptstudien zum hochautomatisierten Fahren
- Vorbereitung und Durchführung der Probandenstudie am dynamischen Lkw Fahrsimulator
- Auswertung, Darstellung und Interpretation der Ergebnisse in geeigneter Form
- Erarbeiten von Optimierungsvorschlägen auf Basis der gefundenen Ergebnisse
- Dokumentation der Ergebnisse

Die Ausarbeitung soll die einzelnen Arbeitsschritte in übersichtlicher Form dokumentieren. Der Kandidat/Die Kandidatin verpflichtet sich, die Semesterarbeit selbstständig durchzuführen und die von ihm verwendeten wissenschaftlichen Hilfsmittel anzugeben.

Die eingereichte Arbeit verbleibt als Prüfungsunterlage im Eigentum des Lehrstuhls und darf Dritten nur unter Zustimmung des Lehrstuhlinhabers zugänglich gemacht werden.

Ausgabe: 08.04.2018

Abgabe: 08.10.2018

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

Betreuerin: Natalie Richardson, M. Sc.

Geheimhaltungsverpflichtung

Herr **Flohr, Lukas**

Gegenstand der Geheimhaltungsverpflichtung sind alle mündlichen, schriftlichen und digitalen Informationen und Materialien die der Unterzeichner vom Lehrstuhl oder von Dritten im Rahmen seiner Tätigkeit am Lehrstuhl erhält. Dazu zählen vor allem Daten, Simulationswerkzeuge und Programmcode sowie Informationen zu Projekten, Prototypen und Produkten.

Der Unterzeichner verpflichtet sich, alle derartigen Informationen und Unterlagen, die ihm während seiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik zugänglich werden, strikt vertraulich zu behandeln.

Er verpflichtet sich insbesondere:

- derartige Informationen betriebsintern zum Zwecke der Diskussion nur dann zu verwenden, wenn ein ihm erteilter Auftrag dies erfordert,
- keine derartigen Informationen ohne die vorherige schriftliche Zustimmung des Betreuers an Dritte weiterzuleiten,
- ohne Zustimmung eines Mitarbeiters keine Fotografien, Zeichnungen oder sonstige Darstellungen von Prototypen oder technischen Unterlagen hierzu anzufertigen,
- auf Anforderung des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik oder unaufgefordert spätestens bei seinem Ausscheiden aus dem Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik alle Dokumente und Datenträger, die derartige Informationen enthalten, an den Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik zurückzugeben.

Besondere Sorgfalt gilt im Umgang mit digitalen Daten:

- Für den Dateiaustausch dürfen keine Dienste verwendet werden, bei denen die Daten über einen Server im Ausland geleitet oder gespeichert werden (Es dürfen nur Dienste des LRZ genutzt werden (Lehrstuhlaufwerke, Sync&Share, GigaMove).
- Vertrauliche Informationen dürfen nur in verschlüsselter Form per E-Mail versendet werden.
- Nachrichten des geschäftlichen E-Mail Kontos, die vertrauliche Informationen enthalten, dürfen nicht an einen externen E-Mail Anbieter weitergeleitet werden.
- Die Kommunikation sollte nach Möglichkeit über die (my)TUM-Mailadresse erfolgen.

Die Verpflichtung zur Geheimhaltung endet nicht mit dem Ausscheiden aus dem Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, sondern bleibt 5 Jahre nach dem Zeitpunkt des Ausscheidens in vollem Umfang bestehen. Die eingereichte schriftliche Ausarbeitung darf der Unterzeichner nach Bekanntgabe der Note frei veröffentlichen.

Der Unterzeichner willigt ein, dass die Inhalte seiner Studienarbeit in darauf aufbauenden Studienarbeiten und Dissertationen mit der nötigen Kennzeichnung verwendet werden dürfen.

Datum: 08.04.2018

Unterschrift: _____

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Garching, den 08.10.2018

Lukas Flohr, B. A.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Forschungsvorhaben	2
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Stand von Wissenschaft und Technik	5
2.1 Hochautomatisiertes Fahren	5
2.1.1 Definition und Abgrenzung.....	6
2.1.2 Probleme und Phänomene.....	7
2.1.3 Herausforderungen.....	11
2.2 Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug	15
2.2.1 Fahraufgaben, Fahrerassistenzsysteme und Automatisierung.....	16
2.2.2 Anzeigen und Bedienelemente.....	17
2.2.3 Gestaltung und Bewertung von Mensch-Maschine-Schnittstellen.....	18
2.2.4 Konzeptstudien.....	21
2.2.5 Entwickelte Mensch-Maschine-Schnittstelle.....	27
3 Fragestellungen und Hypothesen	33
4 Fahrsimulatorstudie	35
4.1 Versuchsaufbau	35
4.2 Versuchsdesign	36
4.2.1 Szenarien und Streckendesign.....	38
4.2.2 Versuchsfahrten und Permutation.....	39
4.2.3 Nebenaufgabe.....	39
4.3 Materialien	40
4.3.1 Demographie.....	40
4.3.2 Kontrollierbarkeit.....	40
4.3.3 Beanspruchung.....	41
4.3.4 Akzeptanz.....	41
4.3.5 User Experience.....	41

4.3.6	Informationsgehalt und Wohlbefinden	42
4.3.7	Übernahmequalität, Probleme und Auffälligkeiten	42
4.3.8	Systemverständnis, Komponenten und Informationseinheiten	42
4.3.9	Konzeptvarianten.....	43
4.3.10	Gesamtkonzept.....	44
4.3.11	Mix and Match.....	44
4.4	Versuchsablauf.....	45
5	Ergebnisse.....	47
5.1	Fahrsimulatorstudie	47
5.1.1	Demographie.....	48
5.1.2	Kontrollierbarkeit.....	49
5.1.3	Beanspruchung	51
5.1.4	Akzeptanz	53
5.1.5	User Experience	54
5.1.6	Informationsgehalt und Wohlbefinden	56
5.1.7	Übernahmequalität, Probleme und Auffälligkeiten	59
5.1.8	Systemverständnis, Komponenten und Informationseinheiten	61
5.1.9	Konzeptvarianten.....	74
5.1.10	Gesamtkonzept.....	75
5.1.11	Mix and Match.....	79
5.2	Konformitätsbewertung nach ISO 15005.....	83
5.2.1	Eignung für den Gebrauch während der Fahrt.....	84
5.2.2	Eignung für TICS-Aufgaben	92
5.2.3	Eignung für den Fahrer.....	93
6	Diskussion	95
6.1	Interpretation der Ergebnisse	95
6.1.1	Angabe der HAF-Verfügbarkeit.....	96
6.1.2	Ampelkonzept.....	97
6.1.3	Übernahmezeit.....	98
6.1.4	Fahrerzustand und Rückfallebene.....	98
6.1.5	Systemverständnis	99
6.1.6	Komponenten.....	101
6.1.7	Konformität mit der ISO 15005.....	103

6.2	Optimierung von Konzept und Design	104
6.2.1	Visuelle Anzeigen	106
6.2.2	Akustische Anzeigen	108
6.3	Kritik.....	109
6.3.1	Versuchsleiterkonstellation und Befragungsmodus.....	109
6.3.2	Konsistenz, Strukturierung und Permutation.....	109
6.3.3	Szenarien und Simulator.....	110
6.3.4	Mix and Match.....	110
6.3.5	Interpretation der Ergebnisse	111
6.4	Ausblick	111
7	Zusammenfassung	113
	Abbildungsverzeichnis	i
	Tabellenverzeichnis.....	vii
	Literaturverzeichnis	xi
	Anhang.....	xix

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Varianzanalyse (en. „analysis of variance“)
arcmin	Bogenminute (= 1/60 °)
AV	Abhängige Variable(n)
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
CAN	Controller Area Network
DALI	Driving Activity Load Index
df	Freiheitsgrade (en. „degrees of freedom“)
dt.	deutsch bzw. im Deutschen
en.	englisch bzw. im Englischen
FAS	Fahrerassistenzsystem(e)
FIS	Fahrerinformationssystem(e)
FTM	Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
HAF	Hochautomatisiertes Fahren bzw. hochautomatisierte Fahrt
HAVEit	Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport
Hz	Hertz, $1 \text{ Hz} = 1 \frac{1}{\text{s}}$
k. A.	keine Angabe
LED	Leuchtdiode (en. „light-emitting diode“)
LF	Längsführung
Lkw	Lastkraftwagen
M	Mittelwert (en. „mean“)
MAR	zufälliges Fehlen (en. „missing at random“)
Max	Maximum
MCAR	völlig zufälliges Fehlen (en. „missing completely at random“)
Min	Minimum
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
MNAR	kein zufälliges Fehlen (en. „missing not at random“)
NDRTs	Fahrfremde Tätigkeiten (en. „non-driving related tasks“)
OOTLUF	out-of-the-loop unfamiliarity

Pkw	Personenkraftwagen
px	Pixel
QF	Querführung
rad	Radiant
SAE	Society of Automotive Engineers
SD	Standardabweichung (en. „standard deviation“)
SR	Schweregrad (en. „severity rating“)
t	Zeit (en. „time“)
TICS	Fahrerinformations- und Assistenzsysteme (en. „transport information and control Systems“)
TL	Technischer Leiter
TOR	Übernahmeaufforderung (en. „take-over request“)
TUM	Technische Universität München
TW	two-way imputation
UDP	User Datagram Protocol
UEQ	User Experience Questionnaire
UX	User Experience
v. l. n. r.	von links nach rechts
VDA	Verband der Automobilindustrie
VL	Versuchsleiter
VP	Versuchsperson(en)
vs.	versus
WLAN	Wireless Local Area Network

1 Einleitung

Automatisierte Systeme erhöhen Sicherheit, Effizienz und Komfort im Straßenverkehr [1, S. 6–7]. Konkrete volkswirtschaftliche Nutzeneffekte der Automatisierung liegen in der Reduzierung von Treibstoffverbrauch und Luftverschmutzung [2, S. 393] sowie von Unfall- und Staukosten [3, S. 272]. Ebenso wird die Straßeninfrastrukturkapazität durch den geringeren Platzbedarf automatisierter Fahrsysteme wesentlich erhöht [2, S. 393]. Das wird besonders vor dem Hintergrund einer zunehmenden Verkehrsleistung relevant: Bis 2025 soll sich allein der Güterverkehr auf den europäischen Straßen im Vergleich zum Jahr 2015 um 80 % erhöhen [4, S. 6].

Seit dem Beginn der Serienproduktion des Antiblockiersystems (ABS) im Jahr 1978 und der Einführung des Elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP) im Jahr 1995 finden zunehmend Fahrerassistenzsysteme den Weg in den Alltag von Pkw- und Lkw-Fahrern [1, S. 8]. Viele Pkw- und Lkw-Hersteller bieten mittlerweile Komfort- und Sicherheitssysteme, wie beispielsweise den Abstandsregeltempomat (en. „Adaptive Cruise Control“; ACC), in Serie an. Eine hohe Motivation, die Fahrzeugführung weiter zu automatisieren, resultiert aus Unfällen, die durch menschliche Fehler verursacht werden. Für das Jahr 2016 können in Deutschland knapp 66 % der gesamten Straßenverkehrsunfälle mit Personenschäden auf ein Fehlverhalten der beteiligten Fahrzeugführer zurückgeführt werden [5, S. 15]. Technische Defekte machen dagegen nur einen sehr geringen Anteil der Unfallursachen aus [6, S. 11]. Der Großteil der Unfälle, die auf ein menschliches Fehlverhalten zurückgeführt werden, könnten mittels zunehmender Automatisierung vermieden werden [6, S. 11].

Automatisierte Systeme werden anhand des Grades der Automatisierung in Stufen eingeteilt (z. B. [6, S. 31]). Übernimmt das System in einem spezifischen Anwendungsfall sowohl Längs-, als auch Querführung, ist die Rolle des menschlichen Fahrers entscheidend: Muss der Fahrer das Fahrzeug dauerhaft überwachen, handelt es sich um ein teilautomatisiertes System, wenn nicht, um ein hochautomatisiertes [6, S. 31].

Laut einer Studie des Fraunhofer Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation [3, S. 104] sollen der Einführung von hochautomatisiertem Fahren (HAF) auf deutschen Autobahnen bis zum Jahr 2020 aus technischer Sicht keine grundlegenden Hindernisse mehr im Weg stehen. Im US-Bundesstaat Nevada hat der hochautomatisierte Freightliner Inspiration Truck bereits 2015 eine amtliche Zulassung für öffentliche Straßen erhalten [7]. Schlüsseltechnologien bilden dabei eine sensorbasierte Umgebungserfassung und Machine Learning Algorithmen.

Die zunehmende Automatisierung bringt gravierende Veränderungen für die Rolle des Fahrers mit sich. HAF soll, neben der Reduzierung von Unfällen und einem besseren Verkehrsfluss, zu einer Entlastung des Fahrers beitragen [2, S. 387]. Da dieser während dem HAF nicht mehr dauerhaft überwachen muss, ergeben sich neue Nutzungsmöglichkeiten der Fahrtzeit. Die Ausführung sogenannter fahrfremder Tätigkeiten wird für den Fahrer auch während der Fahrt möglich. Berufskraftfahrer können die hochautomatisierte Fahrtzeit zur Erholung nutzen oder

während der Fahrt dispositive Tätigkeiten wie Tourenplanung oder Fuhrparkmanagement erledigen [2, S. 390]. Damit wird auch ein Zuwachs an Produktivität erwartet [8, S. 89].

Durch die zunehmende Automatisierung wird der Mensch „als physisch aktiver Entscheidungsträger im Fahrzeug“ von den technischen Systemen ersetzt [9, S. 104 – 105]. Er wandelt sich zu einem passiven Überwacher [9, S. 104 – 105]. Ein vor diesem Hintergrund sehr kritischer Aspekt des HAF ist die Übernahme (en. „take over“) der Fahrzeugkontrolle durch den Fahrer. Diese ist insbesondere beim Erreichen von Systemgrenzen oder beim Auftreten von Systemfehlern erforderlich. Systemgrenzen werden nach BAST [6, S. 31] beim HAF zwar alle vom System selbst erkannt, allerdings ist dieses nicht in der Lage, das Fahrzeug in einen risikominimalen Zustand zu überführen. Der Fahrer muss in einem solchen Fall „mit ausreichender Zeitreserve“ [6, S. 31] übernehmen.

In solchen Situationen muss der Fahrer durch das System rechtzeitig informiert werden und in die Lage versetzt werden, die Kontrolle wieder übernehmen zu können. Der Fahrer muss daher vor der Übernahme genügend Zeit zur Verfügung haben, um erforderliche Informationen zu verarbeiten. Bei der Gestaltung und Entwicklung einer dazu adäquaten Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) spielen menschliche Eigenschaften und Fähigkeiten daher eine wichtige Rolle [1, S. 12]. Eine ergonomische, menschenzentrierte Gestaltung und Entwicklung ist erforderlich, um den Anforderungen des HAF, wie beispielsweise einem verringerten Situationsbewusstsein [10, S. 196], zu begegnen.

1.1 Forschungsvorhaben

Ziel der Arbeit ist es, eine ideale MMS für das HAF im Lkw zu gestalten. Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen der Masterarbeit eine entwickelte MMS für das HAF im Lkw [11]–[13] mit einer Probandenstudie an einem dynamischen Fahrsimulator evaluiert. Mit dem nutzerzentrierten Vorgehen sollen Probleme, Verbesserungsmaßnahmen und Gestaltungsanforderungen erfasst werden. Des Weiteren wird die Schnittstelle auf Konformität mit den Anforderungen und Empfehlungen der DIN EN ISO 15005 [14] überprüft.

Die formative Evaluation dient dazu, Optimierungspotenziale der entwickelten MMS zu identifizieren. Die Erkenntnisse der Arbeit werden genutzt, die bestehende Schnittstelle konzeptionell und gestalterisch zu optimieren.

1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 1 wird die Motivation, das Forschungsvorhaben und der Aufbau der Arbeit dargestellt. Grundlage für die Masterarbeit bildet eine ausführliche Literaturrecherche zum Stand von Wissenschaft und Technik (Kapitel 2) in den Bereichen HAF und Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug.

Auf Basis dieses Wissens wird die Evaluation einer für das HAF im Lkw entwickelten MMS durchgeführt. In Kapitel 3 werden hierzu Fragestellungen und Hypothesen definiert, welche mit der Fahrsimulatorstudie (Kapitel 4, 5.1) und der Bewertung der Konformität mit der ISO 15005 (Kapitel 5.2) beantwortet werden.

In der Diskussion (Kapitel 6) werden die Ergebnisse der Simulatorstudie und der Konformitätsbewertung vor dem wissenschaftlichen Hintergrund aus Kapitel 2 und den Fragestellungen aus Kapitel 3 interpretiert, kritisch diskutiert und in Form von Optimierungsmaßnahmen gebündelt. Entsprechend dieser Maßnahmen wird die MMS konzeptionell und gestalterisch überarbeitet. Schließlich wird ein Ausblick auf zukünftige Forschung gegeben.

Abschließend wird in Kapitel 7 die Arbeit zusammengefasst. Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1.1 schematisch dargestellt.

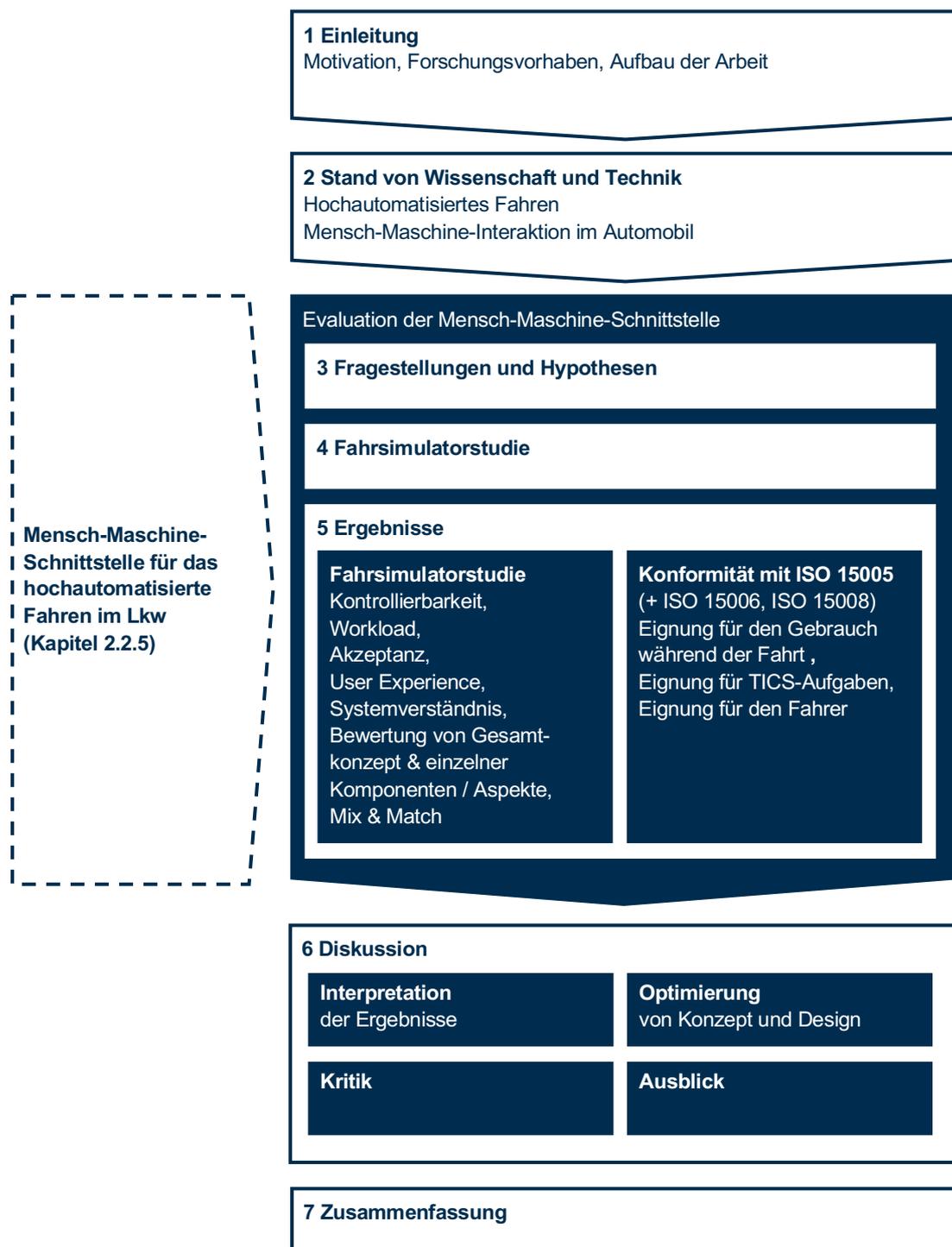


Abbildung 1.1: Schematischer Aufbau der Arbeit.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Maschinen übernehmen zunehmend Aufgaben, die zuvor von Menschen ausgeführt wurden. Dieser Vorgang wird Automatisierung genannt [15, S. 231]. In den entstehenden Systemen wird die Rolle des Menschen auch „supervisory control“ [16, S. 1025] bezeichnet. Der Mensch muss dabei die Tätigkeiten der Automation planen, der Maschine die Planung mitteilen, die Handlungen der Automation überwachen und bei nicht erwartungsgemäßer Ausführung eingreifen [17, S. 338].

Im Zuge der Automatisierung von Funktionen in der Luftfahrt und in Industrieanlagen beschäftigt sich die Wissenschaft schon über vier Jahrzehnte mit dieser Thematik [18, S. 511] (z. B. [19]–[24]). Das in diesen Domänen erarbeitete Wissen dient als Basis für die wachsende Automatisierung und Implementierung von Fahrerassistenzsystemen im Automobil. Ziel ist es, Sicherheit, Effizienz und Komfort im Straßenverkehr zu erhöhen [1, S. 6–7].

In diesem Kapitel werden die wissenschaftlichen Grundlagen zum HAF sowie zur Interaktion von Mensch und Maschine im Automobil erörtert. Dazu werden Aspekte, Phänomene, Herausforderungen, Design-/Anforderungen und geeignete Herangehensweisen zur Entwicklung, Gestaltung und Evaluation diskutiert, bevor anhand aktueller Systeme und Konzeptstudien der Stand der Technik veranschaulicht wird. Abschließend wird eine entwickelte MMS für das HAF im Lkw [11]–[13] vorgestellt (Kapitel 2.2.5), worauf der weitere Teil dieser Arbeit aufbaut.

2.1 Hochautomatisiertes Fahren

HAF ermöglicht dem Fahrer für eine bestimmte Zeit, in einer bestimmten Situation, die Fahraufgabe komplett an das System abzugeben, ohne es überwachen zu müssen [6, S. 31]. Dabei wird oftmals der Begriff „Autobahnpilot“ verwendet, der ein System beschreibt, welches die Fahraufgabe zwischen Autobahnauffahrt und -abfahrt übernimmt [2, S. 386]. Der Fahrer muss nur beim Erreichen von Systemgrenzen oder beim Auftreten von Systemfehlern eingreifen und kann während der automatisierten Fahrt fahrfremden Tätigkeiten (en. „non-driving-related tasks“; NDRTs) nachgehen. Während dem HAF ist also keine dauerhafte Aufmerksamkeit bzw. Reaktionsbereitschaft des Fahrers erforderlich. Solche Vigilanz-Aufgaben, wie sie bei geringeren Automatisierungsgraden erforderlich werden, sind ressourcenintensiv und mit hoher subjektiver Belastung und Stress verbunden [25, S. 438]. Beim HAF spielt dagegen der Kontrollwechsel zwischen Mensch und Maschine eine entscheidende Rolle. Kann das Fahrzeug eine Situation nicht beherrschen, fordert es den Fahrer zur Übernahme auf [6, S. 12]. Die damit verbundenen Aspekte und Phänomene sowie die resultierenden Probleme stellen Anforderungen an die Mensch-Maschine-Interaktion und werden daher nach der folgenden Abgrenzung bzw. Definition ausführlich eruiert.

2.1.1 Definition und Abgrenzung

Um Mensch-Maschine-Systeme anhand des Grades der Automatisierung der primären Fahraufgabe zu beschreiben, haben mehrere Institutionen Definitionen erarbeitet. Diese unterscheiden sich in wesentlichen Punkten. Die im Automobilbereich am häufigsten verwendeten Nomenklaturen stammen von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), dem Verband der Automobilindustrie (VDA) und von der Society of Automotive Engineers (SAE). Während BASt [6, S. 31] in Anlehnung an FLEMISCH ET AL. [26, S. 2] die fünf Automatisierungsgrade Driver only, Assiiert, Teilautomatisiert, Hochautomatisiert und Vollautomatisiert definiert, wird diese vom VDA [4, S. 15] um die Stufe Fahrerlos erweitert. Die im englischsprachigen Raum vorherrschende Nomenklatur nach der SAE [27, S. 17] differenziert die sechs Level No Driving Automation, Driver Assistance, Partial Driving Automation, Conditional Driving Automation, High Driving Automation und Full Driving Automation.

Tabelle 2.1: Automatisierungsgrade der BASt (Stufen 0 bis 4) [6, S. 31] mit Erweiterung um Stufe 5 nach dem VDA [4, S. 15]; LF = Längsführung, QF = Querführung.

Stufe	Fahraufgabe	Überwachung nötig?	Rückfallebene	Einschränkungen
5 Fahrerlos	System: LF + QF	Nein	System	–
4 Vollautomatisiert	System: LF + QF	Nein	System	In definiertem Anwendungsfall
3 Hochautomatisiert	System: LF + QF	Nein, aber Bereitschaft zur Übernahme bei Aufforderung	Fahrer (mit ausreichender Zeitreserve)	Bestimmte Zeit in spezifischer Situation
2 Teilautomatisiert	System: LF + QF	Ja	Fahrer (dauerhaft)	Für bestimmte Zeit und / oder Situation
1 Assiiert	System: LF / QF Fahrer: QF / LF	Ja	Fahrer (dauerhaft)	In gewissen Grenzen
0 Driver Only	Fahrer: LF + QF	Ja	Fahrer (dauerhaft)	(kein System aktiv)

Im Gegensatz zur Nomenklatur der SAE ist bei der BASt in hochautomatisierten Systemen der Mensch mit „ausreichender Zeitreserve“ als Rückfallebene vorgesehen [6, S. 31]. Bei Bedarf wird diesem die Kontrolle über das Fahrzeug übergeben.

SAE hingegen definiert in Level 4 (High Driving Automation) das System als Rückfallebene, wohingegen der Mensch diese lediglich in Level 3 (Conditional Driving Automation) darstellt [27, S. 17]. Bei vollautomatisierter Fahrt nach BAST [6, S. 31] ist das System für einen definierten Anwendungsfall in der Lage, alle Funktionen zu übernehmen und bei Bedarf einen risikominimalen Zustand herbeizuführen, während der Fahrer nur außerhalb des Anwendungsfalls übernehmen muss. In SAE Level 5 (Full Driving Automation) wird in keiner Situation mehr ein Fahrer benötigt [27, S. 17], was bei der Definition des VDA ebenfalls Stufe 5 (Fahrerlos) entspricht.

Im Folgenden, wird im Rahmen dieser Arbeit die Nomenklatur nach der BAST [6, S. 31] mit Erweiterung um die Stufe Fahrerlos nach dem VDA [4, S. 15] verwendet (Tabelle 2.1). Diese wird im deutschsprachigen Raum primär verwendet, während die Einteilung der SAE vorrangig im amerikanischen Raum Anwendung findet. Die Masterarbeit beschäftigt sich mit Stufe 3 (Hochautomatisiert), die in Tabelle 2.1 visuell hervorgehoben ist.

2.1.2 Probleme und Phänomene

BIBBY ET AL. [24, S. 664] bezeichnen eine vollständige Automation als utopisch und folgern, dass auch automatisierte Systeme Mensch-Maschine-Systeme sind, weshalb immer menschliche und technische Aspekte relevant bleiben. Auf dieser Basis schließt BAINBRIDGE [23, S. 775] auf eine Ironie der Automatisierung: Je fortschrittlicher ein System ist, desto entscheidender wird der Beitrag des menschlichen Operateurs. Dieser muss das automatisierte System entsprechend dem Automatisierungsgrad überwachen und wenn nötig eingreifen [28]. Nach MANZEY [17, S. 338] können drei Problemfelder klassifiziert werden: Unangemessenes Vertrauen des Menschen in die Automation, unzureichendes Situationsbewusstsein und Fertigkeitenverluste. Im Folgenden werden diese drei Problemfelder, deren Aspekte und Phänomene genauer betrachtet.

2.1.2.1 Vertrauen

Vertrauen bezeichnet ein „festes Überzeugtsein von der Verlässlichkeit, Zuverlässigkeit einer Person [oder] Sache“ [29] und hat in Bezug auf das HAF einen entscheidenden Einfluss darauf, ob und wie Automation genutzt wird [28]. Generell wird das Vertrauen, neben der Zuverlässigkeit, von der wahrgenommenen Nützlichkeit und der Nachvollziehbarkeit des Systems beeinflusst [9, S. 105]. LEE & SEE [30, S. 55] unterscheiden zwei Extreme: Übermäßiges Vertrauen (en. „overtrust“) und mangelndes Vertrauen bzw. Misstrauen (en. „distrust“). Bei beiden Ausprägungen handelt es sich, im Gegensatz zum angemessenen Vertrauen, um ein den Systemfähigkeiten nicht angebrachtes Vertrauenslevel, was sich auf die Nutzung auswirkt [30, S. 55]: Übermäßiges Vertrauen, also ein nicht angebrachtes hohes Level an Vertrauen, führt zu Missbrauch (en. „misuse“) des Systems, was z. B. in Vernachlässigung der Überwachungsaufgabe oder im Nichterkennen von Automationsfehlern resultieren kann [31, S. 291]. Misstrauen führt hingegen zu mangelnder Nutzung (en. „disuse“), z. B. aufgrund von häufigen Fehlalarmen [15, S. 230]. Ein angemessenes Vertrauenslevel kann dagegen zu einer Zusammenarbeit von Mensch und Maschine führen, die einer alleinigen Ausführung durch Mensch oder Maschine hinsichtlich Effizienz und Verlässlichkeit überlegen ist [30, S. 74].

Mit zunehmender Nutzungserfahrung lernen Nutzer ihr Vertrauen gegenüber dem System zu kalibrieren [28, S. 1919]. Es ist essentiell, dass dieses Vertrauenslevel mit der objektiv bewertbaren Vertrauenswürdigkeit der Automation übereinstimmt und der Nutzer sich nicht auf einem unangemessenen Level bewegt [28, S. 1920]. Das System muss dafür so gestaltet werden, dass der Nutzer dessen Leistungsfähigkeit und Grenzen versteht und ihm darauf basierend ein angemessenes Vertrauen entgegenbringt [30, S. 74]. Damit soll vermieden werden, dass der Nutzer dem System zu sehr vertraut [15, S. 230], [31, S. 291] und deshalb mögliche Fehlermeldungen, Moduswechsel oder Übernahmeaufforderungen nicht bemerkt oder fälschlicherweise als unkritisch bewertet.

Vertrauen wird als entscheidender Faktor für die Akzeptanz eines Systems betrachtet, da Nutzer keine Systeme nutzen oder erwerben, denen sie nicht vertrauen [32, S. 5]. Neben Vertrauen können auch die Erwartungshaltung des Fahrers an die Performanz des Systems sowie Zuverlässigkeit, Privatsphäre und Sicherheit als wesentliche Einflussfaktoren für die Akzeptanz betrachtet werden [8, S. 93]. Hierbei wird die Nutzerakzeptanz als direkte Evaluation und die soziale Akzeptanz als indirekte Evaluation eines Systems differenziert [33, S. 1]. DAVIS ET AL. [34, S. 985] postulieren in ihrem Technologieakzeptanzmodell die wahrgenommene Nützlichkeit (en. „perceived usefulness“) sowie die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (en. „perceived ease of use“) des Produkts als primäre Einflussfaktoren für die Nutzerakzeptanz.

2.1.2.2 Situationsbewusstsein

Situationsbewusstsein beschreibt das Wissen einer Person über eine bestimmte dynamische Situation bzw. Umgebung [35, S. 60]. Dieses Konstrukt kann in drei Level unterteilt werden [35, S. 35, 60]:

1. Wahrnehmung (en. „perception“) der aktuellen Situation
2. Verständnis (en. „comprehension“) deren Bedeutung
3. Projektion (en. „projection“) zukünftiger Zustände

Abbildung 2.1 zeigt am Modell von ENDSLEY [35, S. 35], wie Situationsbewusstsein in Bezug auf den menschlichen Entscheidungsprozess und der individuellen, system- und aufgabenbezogenen Einflussfaktoren einzuordnen ist.

ENDSLEY [35, S. 60–61] folgert, dass ein gutes Situationsbewusstsein dazu beiträgt, angemessene Entscheidungen zu treffen und auszuführen. Automatisierung als systembezogener Einflussfaktor vermindert hingegen durch den Wechsel von aktiver zu passiver Informationsverarbeitung das Situationsbewusstsein [36, S. 381]. Dies liegt mitunter darin begründet, dass Menschen dazu tendieren, Veränderungen im System oder in der Umwelt weniger wahrzunehmen, wenn diese von einer anderen Instanz gesteuert werden, unabhängig davon, ob es sich dabei um Mensch oder Maschine handelt [31, S. 291]. Das automatisierte System muss den Nutzer während der hochautomatisierten und spätestens bei einer nötigen Übernahme der Fahrzeugführung in die Lage versetzen, das Situationsbewusstsein innerhalb eines verfügbaren Zeitfensters zu erlangen. Effektive Kommunikation zwischen Mensch und Maschine ist daher besonders bei zunehmender Automatisierung von Bedeutung [37, S. 149].

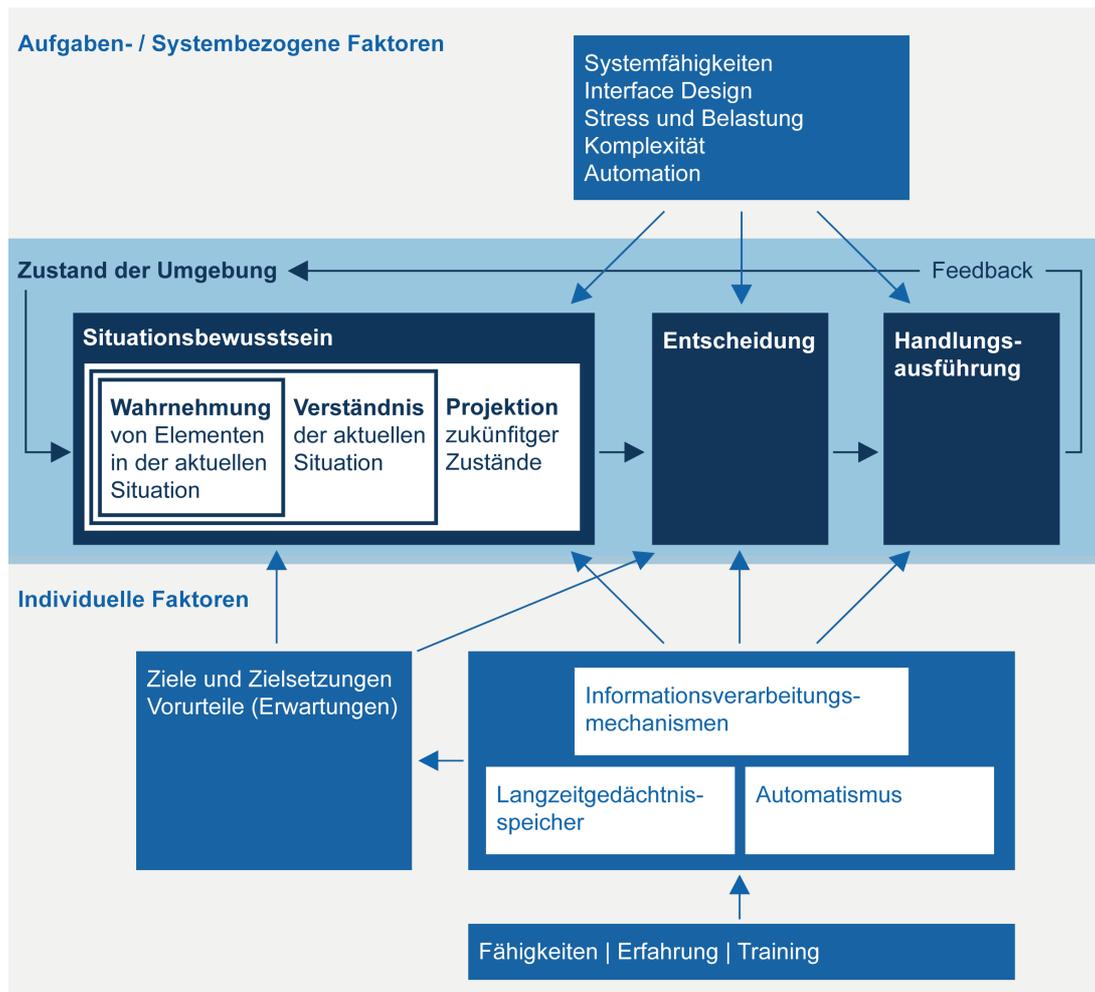


Abbildung 2.1: Situationsbewusstsein nach ENDSLEY [35, S. 35] in einem dynamischen Entscheidungsprozess mit Darstellung beeinflussender Faktoren (eigene Darstellung in Anlehnung an [35, S. 35]).

Modusbewusstsein und mentale Modelle

Dem Situationsbewusstsein untergeordnet wird in der Literatur der Begriff Modusbewusstsein (en. „mode awareness“) verwendet. Modusbewusstsein beschreibt das Wissen und das Verständnis eines Operators über den aktuellen und zukünftigen Zustand eines Systems und dessen Verhalten in einem bestimmten Modus [38, S. 19]. Automatisierte Systeme stellen mittels diverser Modi Vorteile bezüglich der Flexibilität in der Nutzung bereit. Gleichzeitig erhöhen sie die Notwendigkeit des Modusbewusstseins des Nutzers, der nachvollziehen muss, was das System aus welchem Grund tut bzw. tun wird [20, S. 17]. Ein mangelndes Modusbewusstsein wird als eines der kritischsten Probleme bei der Nutzung von Automatisierung benannt [38, S. 19].

Damit einhergehende Probleme und Fehler werden als modusbezogene Probleme oder Modus-Fehler bezeichnet (z. B. [20], [38]). Um diesen entgegenzuwirken, muss das System eine geeignete MMS besitzen, die adäquates Feedback zu Zuständen und Verhalten bereitstellt [20, S. 12], [38, S. 7]. Andererseits muss sich der Nutzer ein mentales Modell des Systems aneignen, um zu wissen, wie dieses funktioniert [20, S. 18]. Mit mentalen Modellen können die Nutzer erkennen, wie sie einzelne Informationen kombinieren und die wichtigen Informationen interpretieren müssen [39, S. 39]. Unvollständige oder fehlerhafte Modelle

können Verständnis und Projektion (Level 2 und 3 des Situationsbewusstseins) negativ beeinflussen [39, S. 39]. Um dem entgegenzuwirken, können in hochautomatisierten Systemen Erklärungen bzw. die Angabe des Grundes für Übernahmeaufforderungen dazu beitragen, das Systemverständnis der Nutzer zu erhöhen und so deren mentales Modell zu verbessern [40, S. 305].

Im alltäglichen Fahrzeugkontext kann vom Endnutzer nicht erwartet werden, dass er anhand des Automatisierungsgrads (Kapitel 2.1.1) die damit einhergehenden Funktionen, Fähigkeiten und Grenzen des Systems abschätzen kann [32, S. 3]. Dem Fahrer muss klar kommuniziert werden, welche Funktionen das System in der aktuellen Situation übernehmen kann [32, S. 3]. Das Fehlen einer solchen geeigneten Kommunikation kann auch im Fahrzeug zu Problemen hinsichtlich Verständnis, Modus-Verwirrung und Modus-Fehlern führen [32, S. 3].

CARSTEN & MARTENS [32, S. 3] geben an, dass auch Marketing-Maßnahmen von Herstellern zu solchen Problemen führen können und verweisen beispielhaft auf Tesla. Der amerikanische Hersteller hat in seinen Serienfahrzeugen ein teilautomatisiertes Fahrerassistenzsystem mit „Autopilot“ betitelt und so möglicherweise zu dem fatalen Unfall eines Tesla-Fahrers im Mai 2017 beigetragen. Ebenso tragen auch die Kommunikationsmaßnahmen anderer Hersteller oder die öffentliche Berichterstattung durch unklare Abgrenzung oder gar Synonymverwendung von Begrifflichkeiten wie autonom, hochautomatisiert, selbstfahrend oder vollautomatisiert zu Missverständnissen bei. Dem Nutzer des Systems ist dadurch nicht klar, welche Situationen die Systeme kontrollieren können. Das verringerte Modusbewusstsein und ggf. fehlerhafte mentale Modell kann zu übermäßigem Vertrauen führen und letztlich in einem Missbrauch des Systems enden ([15], [30]). Um Modusverwirrung zu vermeiden, sollte der aktuelle Zustand eines Systems oder einer Funktion mit einem Blick erfasst werden können [32, S. 4].

„Out-of-the-loop unfamiliarity“

Das Nichtvorhandensein des Situations- bzw. Modusbewusstseins führt in Situationen, in denen plötzlich ein manueller Eingriff des Nutzers erforderlich wird, zur „out-of-the-loop unfamiliarity“ (OOTLUF), einem Zustand in welchem der Nutzer unnötig lange benötigt, um adäquat in die Kontrollschleife („loop“) zurückzukehren [21, S. 368]. Nach HÖRWICK [41, S. 77] befindet sich ein Fahrer „in-the-loop“, wenn er ein ausreichendes Situationsbewusstsein und „eine ausreichende motorische Reaktionsfähigkeit aufweist“. OOTLUF wird als einer der größten negativen Aspekte der Automatisierung bezeichnet und geht neben dem Verlust des Bewusstseins für den Zustand und die Prozesse des Systems mit dem Verlust manueller Fertigkeiten einher [36, S. 381].

Bei der Übergabe der Kontrolle ist daher eine effektive Strategie notwendig, um dem Fahrer, der sich potentiell „out-of-the-loop“ befindet, das nötige Situationsbewusstsein zu vermitteln [42, S. 190] Solange solch eine Strategie fehlt, schlagen LOUW, MERAT & JAMSON [42, S. 190] vor, dass der Fahrer auch bei hochautomatisierter Fahrt nach Möglichkeit in-the-loop gehalten werden sollte.

2.1.2.3 Fertigkeitsverlust

Mit dem Wandel vom aktiven Operator zum passiv Beobachtenden geht mit zunehmender Automatisierung ein Verlust des stetigen Trainings und den damit verbundenen motorischen sowie kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten des Nutzers einher [17, S. 345].

Die von BAINBRIDGE [23, S. 775] beschriebene Ironie der Automatisierung wird beim HAF insbesondere in Übernahmesituationen kritisch: Der Fahrer muss trotz geringem Situationsbewusstsein, mangelnder Übung und dadurch potentiell verminderten manuellen Fähigkeiten in einer schwierigen Situation, die von der Automation nicht gehandhabt werden kann, die Kontrolle übernehmen. Der „Regelfall“ wird also automatisiert, während der Fahrer in kritischen Situationen die Fahrzeugführung übernehmen muss.

Manzey [17, S. 345 – 346] vermutet, dass Fertigkeitsverluste vor allem bei der Automatisierung kognitiver Funktionen, z. B. bei Entscheidungs- und Planungsprozessen, ein großes Risiko darstellen. Motorische Fertigkeiten können hingegen deutlich besser erhalten bleiben [17, S. 346]. Adaptive Systeme, die nach einer bestimmten Zeit zur manuellen Ausführung auffordern, oder Simulator-Trainings können geeignete Maßnahmen darstellen, um dem Fertigkeitsverlust entgegenzuwirken [17, S. 346].

2.1.3 Herausforderungen

Um den Problemen und Phänomenen des HAF entgegenzutreten, kommt der MMS und dessen Komponenten eine bedeutende Rolle zu. Beispielsweise um den Fahrer effektiv über den aktuellen Systemzustand zu informieren oder ihn in Übernahmesituationen wieder „in-the-loop“ zu bekommen [43, S. 7].

2.1.3.1 Fahrfremde Tätigkeiten

Da der Fahrer während dem HAF weder die primäre Fahraufgabe ausführen, noch das automatisierte System überwachen muss, wird Arbeitszeit frei [2, S. 387]. Es wird dem Fahrer möglich, während der Fahrt NDRTs auszuführen, also sich mit Aktivitäten oder Aufgaben beschäftigen, die nicht dem Fahren zuzuordnen sind [44, S. 19]. Für Berufskraftfahrer ergibt sich die Möglichkeit dispositive Tätigkeiten wie Tourenplanung oder Fuhrparkmanagement dezentralisiert während der Fahrt zu erledigen oder die Fahrtzeit zur Erholung zu nutzen [2, S. 390]. Da der Fahrer nicht ständig selbst fährt, ergeben sich zudem Vorteile hinsichtlich der Einhaltung von Lenk- und Ruhezeiten [2, S. 390].

Laut einer Studie des Fraunhofer IAO [45, S. 18 – 19] mit 1500 befragten Pkw-Fahrern sind vor allem Tätigkeiten bezüglich Kommunikation (Soziale Netzwerke, Beratungsgespräche, Privatkommunikation), Produktivität (Arbeiten, Weiterbildung, Organisation, Einkäufe) sowie der Erledigung von Grundbedürfnissen (Waschen/Reinigen, Essen/Trinken, Schlafen, Kleidung wechseln) für die Befragten von Interesse. Die Autoren leiten aus den Ergebnissen ab, dass die Nutzer die durch die automatisierte Fahrt gewonnene Zeit vor allem für verpflichtende und wertschöpfende Tätigkeiten nutzen wollen [45, S. 19]. Beispielsweise können mit dem Ziel, am Abend mehr Freizeit zu haben, auf dem Nachhauseweg letzte berufliche Aufgaben oder Alltagstätigkeiten erledigt werden [45, S. 18].

Nach Huemer & Vollrath [44, S. 19] entsteht durch die Ausführung von NDRTs eine Ablenkung, „indem der Fahrer seine Aufmerksamkeit von der Fahraufgabe abwendet und zeitlich begrenzt auf ein Objekt, ein Ereignis oder eine Person richtet“. Es stellt sich die Frage, inwiefern diese Ablenkung zu negativen Auswirkungen führt [44, S. 19]. Bezüglich des HAF beziehen sich diese negativen Auswirkungen insbesondere auf die Übernahmebereitschaft des Fahrers. Es gilt daher zu klären, welche NDRTs den Fahrer wie stark ablenken und welche Tätigkeiten während dem HAF erlaubt sein sollten. Es könnten z. B. nur NDRTs auf

systemeigenen Geräten erlaubt werden, die bei einer Übernahme-situation den Fahrer warnen. Der Fahrer muss trotz Ablenkung und der Beschäftigung mit NDRTs beim HAF immer in der Lage sein, die Fahrzeugführung wieder zu übernehmen.

2.1.3.2 Übernahme der Fahrzeugführung

Die Übernahme (en. „take over“) der Fahrzeugführung durch den Fahrer und die dafür „ausreichend[e] Zeitreserve“ [6, S. 31] sind kritische Faktoren beim HAF. Abbildung 2.2 veranschaulicht schematisch die chronologische Abfolge eines Übernahmeprozesses von hochautomatisierter zu manueller Fahrt. Wie bereits erwähnt, erkennt das hochautomatisierte System, wenn es an eine Systemgrenze stößt bzw. wenn es eine Situation nicht bewältigen kann [6, S. 31]. Es fordert den Fahrer mittels einer Übernahmeanforderung (en. „take over request“) zur Übernahme der Fahrzeugführung auf. Die dafür benötigte Zeit kann, je nach Fahrerzustand und der zu bewältigenden Situation, variieren [46, S. 1], [47, S. 1938]. Aktuelle Studien weisen darauf hin, dass weniger die Ausführung fahrfremder Tätigkeiten oder das Alter der Fahrer die Übernahme-Performanz beeinflusst, als vielmehr die Verkehrsdichte, die Wiederholung der Nutzung und die zur Verfügung stehende Zeit [48, S. 3]. Daraus resultiert die Frage, wann der Fahrer spätestens zur einer Übernahme aufgefordert werden muss, um diese komfortabel bewältigen zu können [46, S. 1], [47, S. 1938]. DAMBÖCK ET AL. [46, S. 12] postulieren einen Grenzwert von mindestens sechs Sekunden einzuhalten. Generell wird für eine erfolgreiche und komfortable Übernahme derzeit, auf Basis diverser Studien, ein Zeitfenster von zehn Sekunden vorgeschlagen [3, S. 77], [49, S. 2872]. GOLD ET AL. [47, S. 1942] folgern, dass Fahrer bei kleineren Zeitfenstern zwar schneller reagieren, allerdings auf Kosten der Übernahmequalität. Dies deckt sich mit der Schlussfolgerung von BAINBRIDGE [23, S. 778], dass Menschen unter Zeitdruck ineffektiver sind.

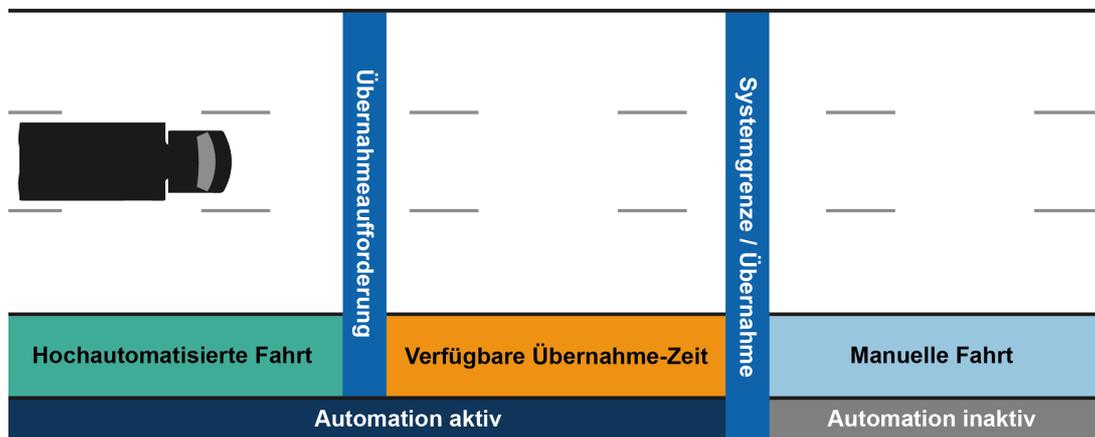


Abbildung 2.2: Schematische Illustration eines Übernahmeprozesses (eigene Darstellung in Anlehnung an DAMBÖCK ET AL. [46]).

MELCHER ET AL. [49, S. 2872] geben zu bedenken, dass eine verfügbare Übernahmezeit von weniger als zehn Sekunden auch von den Nutzern nicht gut akzeptiert wird, da Komfort ein wichtiger Faktor für die Akzeptanz ist. Während alle auf dem Markt verfügbaren Fahrzeuge Standards hinsichtlich Sicherheit, Funktionalität, Robustheit und Effizienz gewährleisten müssen, sind es Merkmale wie Komfort, Design und Qualität, die ein Produkt wettbewerbsfähig machen [50, S. 2].

Die tatsächlich verfügbare Zeit ist jedoch durch Sensorleistung und Vorhersage von Systemgrenzen bedingt [47, S. 1938]. Daraus resultieren wiederum Anforderungen bzw. Einschränkungen bezüglich der maximal zulässigen Geschwindigkeit hochautomatisierter Systeme [47, S. 1938].

2.1.3.3 Information und Warnung

Um den Fahrer bei der hochautomatisierten Fahrt und bei Übernahmen zu unterstützen, muss das System geeignete Informationen und Warnungen bereitstellen. Nach NORMAN [19, S. 1] sollte ein adäquat gestaltetes automatisiertes System kontinuierlich Feedback zum Systemzustand bereitstellen und mit Fehlern von Seiten des Systems und des Bedieners sowie mit dem Eintreten der schlimmstmöglichen Situation rechnen. Die Kommunikation des aktuellen Systemzustands, potentieller Systemgrenzen und geplanter Manöver ist daher eine entscheidende Funktion der MMS [3, S. 73]. Nach ENDLSEY & JONES [39, S. 156] ist die Leistung des Menschen abhängig vom Grad der Arbeitsbeanspruchung. Während Fehlalarme zu einer Senkung des Vertrauens in die Automation führen können [15, S. 230], sind verpasste Warnungen, insbesondere bei Unter- und Überforderung, als sehr gefährlich zu bewerten [39, S. 156]. Eine solche verpasste Warnung könnte beim HAF zu einer ausbleibenden, zu späten oder fehlerhaften Reaktion führen und schließlich in einen Unfall resultieren. In Übernahmesituationen muss daher mit der Warnung die Aufmerksamkeit des Fahrers gezielt auf relevante Informationen gelenkt werden [3, S. 76].

Denkbar ist hierfür die Anwendung einer Warnkaskade (z. B. [51], [52]), also einer nach Kritikalität der Situation gestaffelten Warnung bzw. Übernahmeaufforderung. Neben der Anzeige des Systemstatus werden die Warnungen in der Warnkaskade je nach Zeitpunkt der Auslösung zwischen Frühwarnung, Warnung und Akutwarnung unterschieden [51, S. 59 – 63]:

0. Systemstatus:
Fahrer kann sich über Systemzustand/-verfügbarkeit informieren.
1. Frühwarnung:
Fahrer wird frühzeitig auf die potentiell gefährliche Situation hingewiesen.
2. Warnung:
Fahrer sollte reagieren.
3. Akutwarnung:
Fahrer muss unverzüglich reagieren.

Bei der Auswahl der zu verwendenden Modalitäten kann die Matrix von MÜLLER & LERMER [53, S. 54] (Abbildung 2.3) herangezogen werden. Die Verwendung von Sprache wird nur bei einem Zeitbudget von mehr als zehn Sekunden empfohlen. Bei einem Zeitbudget kleiner als zehn Sekunden und geringem Schadensausmaß bei Nichtreaktion sollten akustische Hinweisstöne und/oder visuelles Leuchten verwendet werden [53, S. 54]. Bei einem größeren potentiellen Schadensausmaß sollten Warntöne und Blinken sowie in den letzten drei Sekunden auch haptische Anzeigen Anwendung finden [53, S. 54]. MELCHER ET AL. [49, S. 2873] halten, unabhängig vom Zeitbudget, beim HAF eine multimodale Übernahmeaufforderung für unabdingbar.

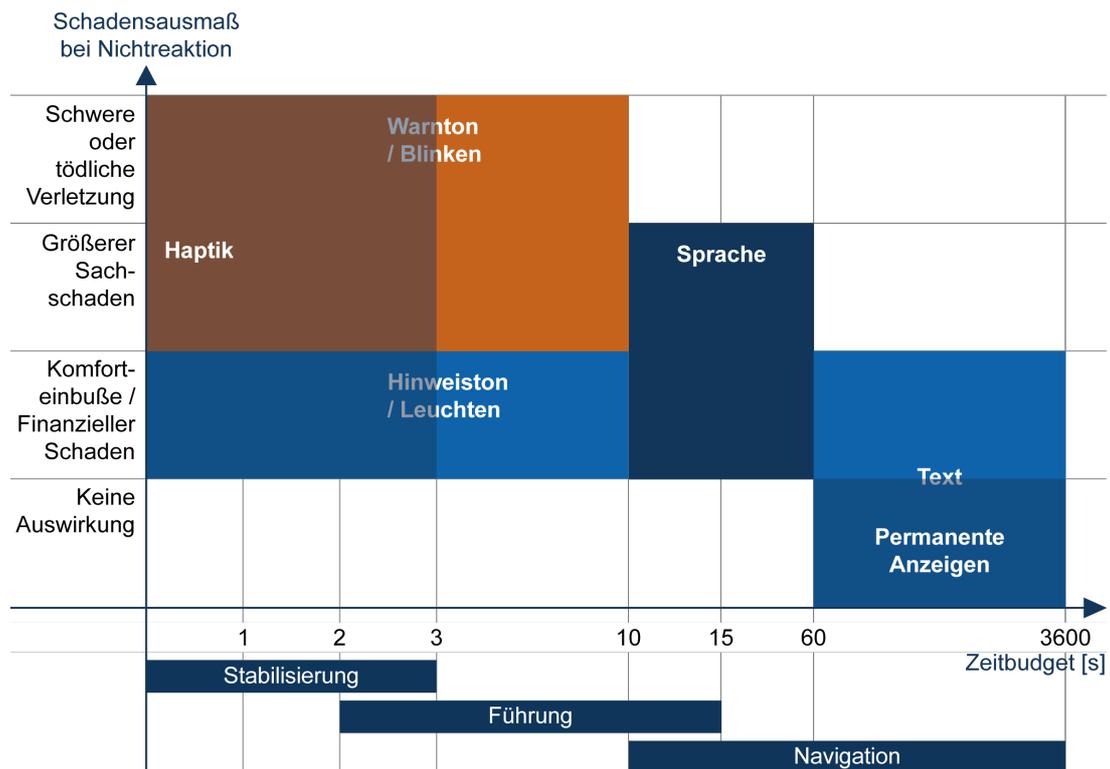


Abbildung 2.3: Zu verwendende Anzeigemodalitäten entsprechend Schadensausmaß und Zeitbudget nach MÜLLER & LERMER (eigene Darstellung in Anlehnung an [53, S. 54]).

2.1.3.4 Fahrerzustandserkennung

Der Fahrerzustand ist essentiell für eine sichere und komfortable Übernahme [54, S. 16]. Neben der Bereitstellung von Informationen und Funktionen muss das System kontinuierlich den Zustand des Nutzers sowie dessen Intentionen und Aktivitäten erfassen [3, S. 74]. Systemübergänge, bei denen sich die Automation lediglich abschaltet, ohne sicherzustellen, dass der Fahrer bereit zur Übernahme ist, sollten nach FLEMISCH ET AL. [55, S. 274] vermieden werden. Bei der hochautomatisierten Fahrt muss das System erkennen, welche Aktivitäten der Fahrer ausübt und ob er in der Lage ist, seiner Aufgabe als Rückfallebene nachzukommen. Das System muss abschätzen können, ob der Fahrer sich „in-the-loop“ befindet [41, S. 77]. Um diese Informationen zu erhalten beziehungsweise den Fahrer zu überwachen gibt es mehrere Möglichkeiten. HÖRWICK [41, S. 36] unterscheidet zwischen Methoden zur Fahrerbeobachtung und der Erzwingung von Bedienhandlungen.

Eine einfache Umsetzung der zweiten Gruppe bieten „Watchdogs“. Diese Systemkomponenten müssen regelmäßig betätigt werden, damit das System nicht in einen definierten Zustand übergeht beziehungsweise zurückgesetzt wird [56, S. 210]. Eine in Schienenfahrzeugen gängige Ausprägung von Watchdogs findet sich in Form von „Totmanntastern“, die von Lokomotivführern regelmäßig gedrückt werden müssen, um zu signalisieren, dass sie noch in der Lage sind, das Fahrzeug zu führen [56, S. 210].

Beobachtet werden kann der Fahrer direkt, beispielsweise mittels Messungen bzw. (sensorbasierter) Erkennung von Kopfposition und -orientierung sowie Augenblickrichtung und -öffnung oder durch die Messung von Vitalwerten [41, S. 37]. Alternativ kann der Fahrerzustand indirekt

über Bedienhandlungen und Tätigkeiten des Fahrers, beispielsweise anhand der Nutzung von fahrzeugeigenen Infotainmentsystemen, erfasst werden [3, S. 75], [41, S. 37].

Während sich die Erzwingung von Bedienhandlungen negativ auf den Komfort auswirken kann, könnte „der Einsatz von Innenraumkameras eine zuverlässige Lösung“ für die Fahrerzustandserkennung und die Ableitung einer potentiellen Übernahmebereitschaft sein [3, S. 75]. Demgegenüber stehen aber Bedenken hinsichtlich Datenschutz und Verletzung von Persönlichkeitsrechten, die für die Kundenakzeptanz durch den aus dem hochautomatisierte System resultierenden Zusatznutzen ausgeräumt werden müssen [3, S. 76].

2.2 Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug

Die Interaktion von Mensch und Maschine wird in der Ergonomie mit dem allgemeinen Strukturschema eines Mensch-Maschine-Systems veranschaulicht (Abbildung 2.4). Der Mensch interagiert mit einer Maschine, um eine Aufgabe zu erfüllen. Sowohl Mensch, als auch Maschine sind Bestandteile des Systems [57, S. 35]. In Abbildung 2.4 ist das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept veranschaulicht. Unter dem Aspekt Belastung werden alle objektiv bewertbaren Faktoren zusammengefasst, die aus physischer und mentaler Aufgabe, physikalischer und sozialer Umwelt sowie von der Maschine resultieren und auf den Menschen und dessen Arbeitsprozess einwirken [58, S. 18]. Beanspruchung beschreibt die Auseinandersetzung des Menschen mit dieser Belastung bzw. dessen Reaktion darauf, welche in Abhängigkeit der individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten des Menschen subjektiv unterschiedlich ist [58, S. 18]. Das Konzept ist bei der Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen im Fahrzeug besonders relevant, da nur die Belastung direkt beeinflusst werden kann [58, S. 18]. Dementsprechend müssen bei der Gestaltung von MMS alle potentiellen Belastungen von Umwelt, Aufgabe, Maschine und Mensch-Maschine-Interaktion berücksichtigt werden.

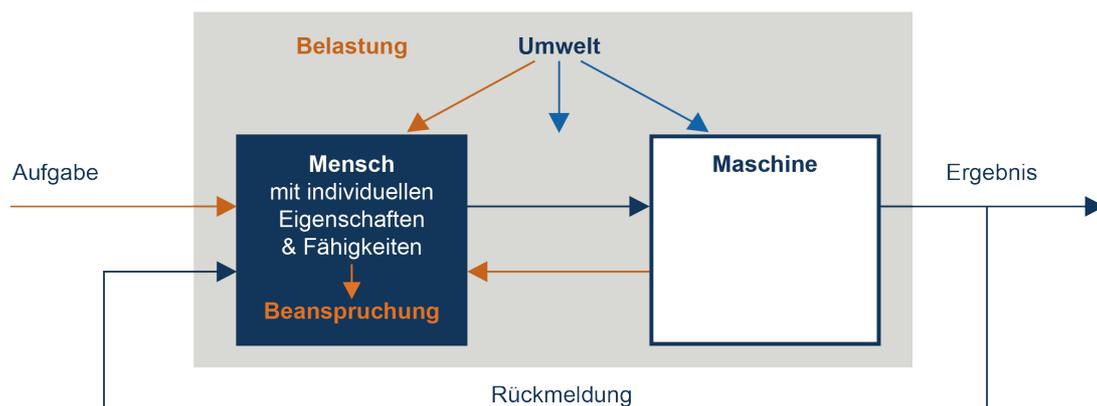


Abbildung 2.4: Allgemeines Strukturschema eines Mensch-Maschine-Systems (eigene Darstellung in Anlehnung an [58, S. 18]).

2.2.1 Fahraufgaben, Fahrerassistenzsysteme und Automatisierung

Die Aufgaben des Fahrers lassen sich in Primäraufgabe (Fahrzeugführung), Sekundäraufgaben (aus Fahranforderungen resultierende Aufgaben wie Lichtsteuerung oder Blinker setzen) und Tertiäraufgaben (NDRTs wie Steuerung der Klimaanlage oder Telefonieren) einteilen [58, S. 21]. Nach dem Fahrerhaltensmodell von DONGES [59, S. 15], [60] kann die Primäraufgabe in die drei Ebenen Navigation, Führung und Stabilisierung unterteilt werden.

Fahrerassistenzsysteme (FAS; en. „Driver Assistance Systems“) oder auch Fahrerinformations- und Assistenzsysteme (en. „Transport Information and Control Systems“; TICS) unterstützen den Fahrer auf diesen Ebenen. Nach GASSER, SEECK UND SMITH [61, S. 29] können FAS anhand ihrer Wirkweise in drei Kategorien eingeteilt werden:

- Kategorie A – Informierende und warnende Funktionen:
Funktionen mit indirektem Einfluss auf die Fahrzeugführung (z. B. Verkehrszeichenassistent, Spurverlassenswarnung).
- Kategorie B – Kontinuierlich automatisierende Funktionen:
Funktionen mit unmittelbarem Einfluss auf die Fahrzeugführung, die vom Fahrer jedoch jederzeit übersteuert werden können (z. B. ACC, Spurhalteassistent).
- Kategorie C – Eingreifende Notfallfunktionen:
Funktionen mit unmittelbarem Einfluss auf Fahrzeugführung in „unfallgeneigten Situationen“ (z. B. Automatische Notbremsung, Nothaltesystem).

Nach dieser Einteilung sind Systeme wie ABS oder ESP, die dem Fahrer bei der Stabilisierung des Fahrzeugs helfen, Kategorie C zuzuordnen. Heutige FAS übernehmen im Zuge der Automatisierung auch zunehmend Funktionen auf den Ebenen Navigation und Fahrzeugführung. Diese automatisierten Systeme sind Kategorie B zuzuordnen und können wiederum mit der in Kapitel 2.1.1 erläuterten Einteilung der BAST [6, S. 31] anhand ihres Automatisierungsgrades differenziert werden (Tabelle 2.1). Funktionen der Kategorie B werden auch Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) genannt. ADAS zeichnen sich dadurch aus, dass sie auf Basis von mittels Sensoren erfassten Umgebungsinformationen den Fahrer aktiv unterstützen, um Komfort und Sicherheit beim Fahren zu erhöhen [62, S. 2].

Serielle Verschaltung | Aktives System



Parallele Verschaltung | Monitives System

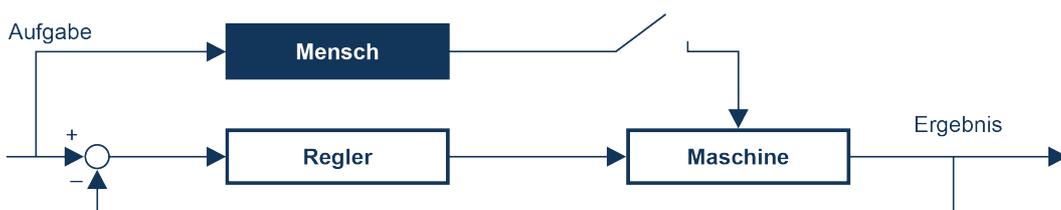


Abbildung 2.5: Strukturen von Mensch-Maschine-Systemen: Serielle Verschaltung (oben), Parallele Verschaltung (unten) (eigene Darstellung in Anlehnung an [57, S. 35]).

Dem Mensch wird bei der Nutzung von Automation verstärkt die Ausführung überwachender Tätigkeiten zuteil [57, S. 35]. Aus einer systemstrukturellen Betrachtungsweise ändert sich die Verschaltung von Mensch und Maschine von einer Seriellen zu einer Parallelen (Abbildung 2.5). Bei der seriellen Verschaltung verarbeitet der Fahrer bezüglich der Aufgabe relevante Informationen und gibt diese über Bedienelemente an die Maschine weiter, welche die Informationen in das gewünschte Ergebnis umwandelt [57, S. 35]. Das Ergebnis kann vom Mensch beobachtet und verarbeitet werden. Beim Autofahren entspricht die Fahrzeugführung der Aufgabe und die Position auf der Straße dem Ergebnis, wobei der Mensch steuert und/oder regelt [57, S. 35 – 36]. Eine serielle Verschaltung wird auch als aktives System bezeichnet.

Automatisierte Fahrzeugfunktionen verarbeiten selbstständig die aufgabenrelevanten Informationen und wandeln sie in das Ergebnis um [57, S. 36]. Beispielsweise hält der Abstandsregeltempomat auf Basis von Sensorinformationen selbstständig einen Mindestabstand zum Vorderfahrzeug ein. Dadurch nimmt der Mensch eine monitive Rolle ein und greift nur bei Abweichungen oder Unregelmäßigkeiten ein [57, S. 36]. Mensch und Maschine sind parallel verschaltet. FAS, die den Fahrer bei der Ausübung von Primär- und Sekundäraufgabe unterstützen, sind mit dem Fahrer parallel geschaltet [63, S. 528]. Sowohl Mensch als auch Maschine bzw. Automation können im Prozess der Regelung bzw. Steuerung durch Einflüsse von persönlichen Eigenschaften und Fähigkeiten des Menschen, der Umwelt, Eigenschaften der Maschine oder der Interaktion zwischen Mensch und Maschine gestört werden [57, S. 36] (Abbildung 2.4). Das Mensch-Maschine-System und dessen Komponenten müssen daher robust gegenüber Störungen gestaltet werden.

2.2.2 Anzeigen und Bedienelemente

Mensch und Fahrzeug kommunizieren und interagieren über Schnittstellen, also „physische Einrichtungen“ [14, S. 8], die es dem Mensch ermöglichen sollen sicher, effektiv und effizient die Fahraufgabe auszuführen [64, S. 634]. Grundlegend wird bei den Bestandteilen einer Schnittstelle zwischen Anzeigen und Bedienelementen unterschieden. Das Arbeitsmodell der Mensch-Maschine-Interaktion nach BRUDER UND DIDIER [64, S. 635] (Abbildung 2.6) zeigt, wie diese im Fahrzeug mit dem Menschen und dessen Informationsverarbeitungsprozess (bestehend aus Informationswahrnehmung, -verarbeitung und Handlung) in Beziehung stehen.

Als Anzeigen gelten alle technischen Elemente, über die der Mensch mittels seiner Sinne gezielt Informationen aufnehmen kann [65, S. 273]. Im Fahrzeugkontext kommen dazu in erster Linie visuelle, akustische und haptische Anzeigen in Frage [65, S. 273]. Die damit dargestellten Informationen dienen dem Mensch als Input für dessen Informations-Verarbeitungsprozess [64, S. 637]. Im Automobil sind visuelle Anzeigen in Form von Kombi-display oder Infotainmentdisplays, welche meist in der Mittelkonsole verortet sind, sowie akustische Anzeigen zur Ausgabe von Signaltönen oder Ansagen gängig. Ebenso finden zunehmend Head-up-Displays (HUD) Verwendung in Serienfahrzeugen [66]. Durch die Projektion der Informationen ins Sichtfeld des Fahrers reduzieren HUD die Zeit, in der die Augen nicht auf der Straße sind [32, S. 4]. Seit einigen Jahren wird auch die Eignung von LED-Leisten als Anzeige im Fahrzeugcockpit erforscht [67].

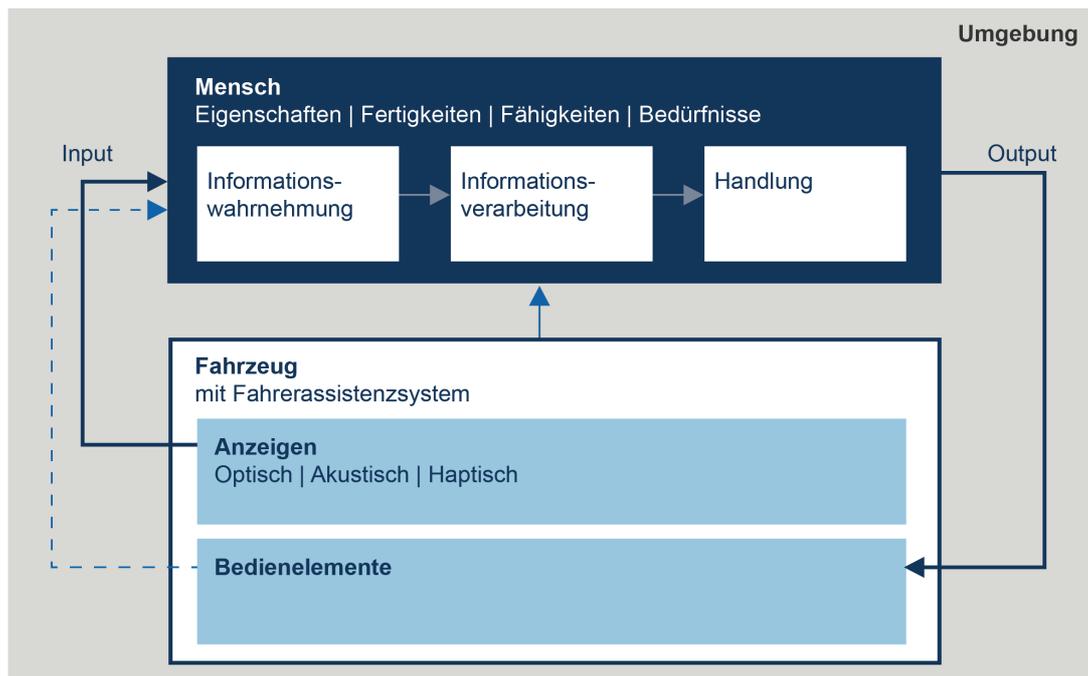


Abbildung 2.6: Arbeitsmodell der Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug (eigene Darstellung in Anlehnung an [64, S. 635]).

Über Bedienelemente kann der Fahrer Informationen an das Fahrzeug übergeben [65, S. 273]. Die ISO 15005 [14, S. 6, 7] beschreibt ein Bedienelement als „Teil einer Einrichtung, [der] von einer Bedienperson betätigt wird, um dadurch eine Leistungsänderung der Einrichtung hervorzurufen“. Dabei wird zwischen primären und sekundären Bedienelementen unterschieden. Primäre Bedienelemente werden vom Fahrer „zur Kontrolle der Längs- und Querverführung“, sekundäre „zur Steuerung vorgeschriebener Funktionen“ wie z. B. Licht, Feststellbremse oder Scheibenwischer verwendet [14, S. 6, 7]. Neben „traditionellen“ Bedienelementen, über die mittels Extremitäten Informationen eingegeben werden, kommen zunehmend auch sensorbasierte Bedienelemente wie z. B. Mikrophon oder (Infrarot-)Kamera zur Anwendung, die mittels Sprach-, Mimik- oder Gestenerkennung Nutzereingaben erfassen [65, S. 273].

2.2.3 Gestaltung und Bewertung von Mensch-Maschine-Schnittstellen

Durch die Gestaltung von MMS kann nur die Belastung beeinflusst werden [58, S. 18]. Ziel ist es, diese durch die Gestaltung effizienter Dialoge gering zu halten. Der Aufwand für den Fahrer soll somit hinsichtlich Informationsverarbeitung und erforderlicher Eingaben minimiert werden [14, S. 7]. Dazu müssen mittels Dialogmanagement geeignete „Regelung[en] zum Austausch dynamischer Informationen zwischen Fahrer [...] und TICS“ definiert werden [14, S. 7].

2.2.3.1 Menschzentrierter Gestaltungsprozess

Der menschenzentrierte Gestaltungsansatz der ISO 9241-210 [68] ermöglicht es, die Eigenschaften und Fähigkeiten der Nutzer bei der Gestaltung zu berücksichtigen. Die Anwendung „erhöht die Effektivität und Effizienz, die Zugänglichkeit und Nachhaltigkeit, und verbessert das menschliche Wohlbefinden [sowie] die Zufriedenstellung der Benutzer“ [68, S. 4].

„[N]achteiligen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, Sicherheit und Leistung die bei der Nutzung des Systems entstehen, wird entgegen gewirkt“ [68, S. 4]. Vorrangiges Ziel ist es, ein gebrauchstaugliches System zu schaffen [68, S. 5]. Also ein System, das „durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um festgelegte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ [68, S. 7]. Hier sei explizit auf die Bestimmtheit von Nutzer, Kontext und Zielen hingewiesen. Die ISO 9241-210 [68, S. 14 – 24] sieht für den menschenzentrierten Gestaltungsprozess, nach der initialen Planung, vier iterative Gestaltungsaktivitäten vor (Abbildung 2.7):

1. Nutzungskontext verstehen, beschreiben und festlegen.
Dieser umfasst Benutzer, Arbeitsaufgaben, Ziele und Systemumgebung.
2. Nutzungsanforderungen spezifizieren, die aus dem Nutzungskontext und den Erfordernissen der Benutzer vor dem Hintergrund ergonomischer Erkenntnisse abgeleitet werden.
3. Gestaltungslösungen zur Erfüllung der Nutzungsanforderungen erarbeiten.
4. Evaluieren der Gestaltungslösungen anhand der Nutzungsanforderungen.

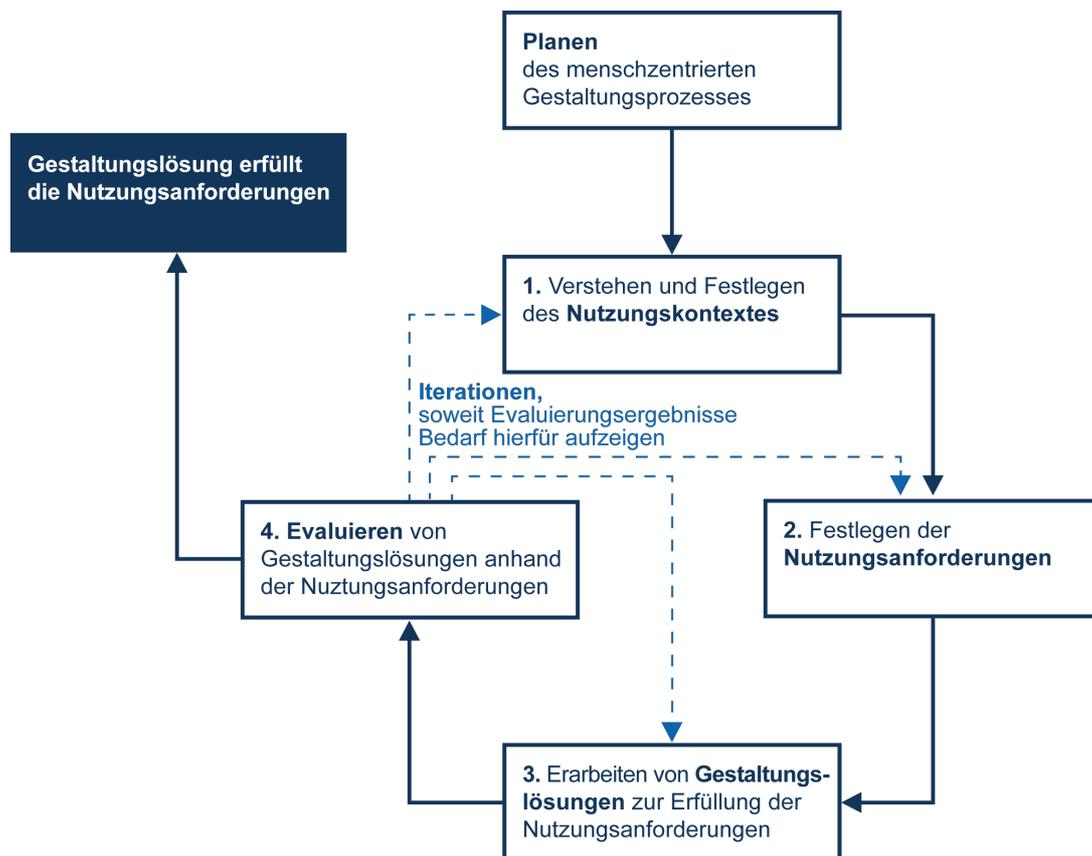


Abbildung 2.7: Menschenzentrierter Gestaltungsprozess nach der ISO 9241-210 [68, S. 15] (eigene Darstellung in Anlehnung an [68, S. 15]).

Wird in der Evaluation der Gestaltungslösungen Optimierungsbedarf ersichtlich, werden einzelne Aktivitäten in Form von Iterationen erneut durchlaufen. Der Prozess wird solange iteriert bis die Gestaltungslösung die Nutzungsanforderungen erfüllt (Abbildung 2.7).

2.2.3.2 Evaluationsmethoden

Die Evaluation der Gestaltungslösungen kann mit einer Prüfung durch die Benutzer oder mittels „inspektionsbasierter Bewertung unter Verwendung von Richtlinien oder Anforderungen“ erfolgen [68, S. 23].

Prüfung durch Benutzer

Generell können und sollten Benutzer gemäß dem Grundansatz der menschenzentrierten Gestaltung in jeder Phase frühzeitig miteinbezogen werden, um Gestaltungslösungen, spezifizierte Anforderungen oder den definierten Kontext zu prüfen [68, S. 23]. Für die Evaluation der Bedienbarkeit werden in der Regel Usability Tests durchgeführt. Die entwickelte Gestaltungslösung bzw. die MMS wird dabei von den Nutzern getestet, wobei mittels Beobachtung, Messung und Befragung Daten zur Bewertung erfasst werden. Dazu können im Fahrzeugkontext Versuche in Realfahrzeugen oder in (Fahr-)Simulatoren durchgeführt werden.

Die Evaluation von ADAS in Realfahrzeugen ist in frühen Stadien aufgrund ethischer Aspekte, insbesondere aufgrund der potentiellen Gefährdung von Fahrer, anderen Verkehrs- und Studienteilnehmern oder Infrastruktur nahezu ausgeschlossen [69, S. 598]. Die Nutzung von Fahrsimulatoren hingegen ermöglicht, insbesondere in frühen Stadien, eine gefahrenlose Erprobung und Evaluation der Systeme in kritischen Situationen [70, S. 140]. Zudem erlauben Simulatoren eine hohe Kontrollierbarkeit und Standardisierung der Versuche, einfache Variationen von Fahrzeug- und Umgebungsparametern, Flexibilität und Einfachheit in der Datenerhebung sowie eine hohe Reproduzierbarkeit [70, S. 140], [71, S. 47 – 48]. Zusammen mit der Systemerprobung im Realfahrzeug ermöglichen Fahrsimulatoren eine „effiziente und umfassende Absicherung von Assistenzsystemen“ [70, S. 140]. Die Herausforderung bei der Nutzung von Simulatoren liegt in der korrekten Abstimmung zeitlicher und räumlicher Faktoren, um die Immersion beziehungsweise das Präsenzerleben des Nutzers in der Simulation zu erreichen [69, S. 599]. Dazu ist eine hohe Wiedergabequalität der simulierten Reize, die von Gesichts-, Gehör-, Gleichgewichts- und Tastsinn wahrgenommen werden, essentiell [69, S. 599]. Aktuell gibt es noch Forschungsbedarf bezüglich der Validität von Simulationen [71, S. 47], zumal diese hinsichtlich der verwendeten technischen Komponenten und der genutzten Simulationssoftware sehr stark variieren.

Um qualitative Insights zu erhalten, reichen nach NIELSEN [72] bereits fünf Versuchspersonen (VP) zur Erzielung des maximalen Kosten-Nutzen-Verhältnisses. Sollen die Daten quantitativ und auf Signifikanz hin ausgewertet werden, sollten es nach NIELSEN [72] mindestens 20 Teilnehmer sein. Der Code of Practice für die Gestaltung und Evaluation von ADAS [62, S. 15] empfiehlt ebenso die Verwendung von mindestens 20 validen Datensätzen, um die Beherrschbarkeit von ADAS nachzuweisen.

Inspektionsbasierte Bewertung

Bei inspektionsbasierten Bewertungsverfahren wird die Gestaltungslösung in der Regel von einem oder mehreren Experten, ggf. unter Einbeziehung von Nutzern, Entwicklern, Designern oder anderen Stakeholdern, untersucht [73, S. 413]. Hierzu zählen Methoden, wie Heuristische Evaluationen, Cognitive Walkthroughs oder die Untersuchung hinsichtlich der Einhaltung von Normen oder Standards [73, S. 413].

Eine Überprüfung kann beispielsweise mit den Dialogprinzipien der ISO 9241-110 [74, S. 7] erfolgen. Die sieben Prinzipien Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Lernförderlichkeit, Steuerbarkeit, Erwartungskonformität, Individualisierbarkeit und Fehlertoleranz

spezifizieren Ziele für die Gestaltung eines Dialogs. Sie finden neben den etwas konkreteren Heuristiken von NIELSEN [75, S. 30] häufig Anwendung bei der Gestaltung, Bewertung und Optimierung von Systemen.

Für die inspektionsbasierte Bewertung von TICS empfiehlt sich die Verwendung der ISO 15005 [14]. Diese kann als eine für den Automobilkontext angepasste Variante der ISO 9241-110 betrachtet werden. Die Norm behandelt die „ergonomische Gestaltung von Fahrerinformations- und -assistenzsystemen“ [76, S. 5]. Sie beschreibt Dialogprinzipien sowie Anforderungen und Empfehlungen, auf deren Basis TICS beziehungsweise deren Dialoge gestaltet und entwickelt werden sollen, um eine effektive, effiziente und sichere Nutzung zu ermöglichen [76, S. 5]. Als TICS werden darin einzelne Funktionen eines Fahrzeugs oder ein Zusammenwirken mehrerer Funktionen als System bezeichnet [76, S. 9]. Zur Überprüfung, ob eine Schnittstelle die von der ISO 15005 spezifizierten Anforderungen und Empfehlungen erfüllt, kann eine Konformitätsprüfung durchgeführt werden.

Nach der ISO 15005 ist der Fahrer eines Fahrzeugs mit TICS verantwortlich für die Sicherheit von Fahrzeug, Insassen und anderen Verkehrsteilnehmern [76, S. 5]. Das ist während dem HAF nach der Einteilung der BSt [6, S. 31] nicht der Fall. Der Fahrer muss aber wieder rechtzeitig, innerhalb einer „ausreichender Zeitreserve“ [6, S. 31], die Fahrzeugkontrolle übernehmen können. Bei hochautomatisierten Systemen verändern sich dadurch die Anforderungen an die Gestaltung des TICS. Eine dafür angepasste Variante der ISO 15005 existiert derzeit nicht. Bei der Verwendung der Norm zur Gestaltung und Evaluation von hochautomatisierten Systemen muss dieser Umstand berücksichtigt werden.

2.2.4 Konzeptstudien

Diverse Hersteller, Forschungseinrichtungen und Verbundprojekte befassen sich seit einigen Jahren mit der Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion für das HAF in Pkw und Lkw. Im Folgenden werden sechs der entstandenen Konzepte vorgestellt und analysiert. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick zu diversen Aspekten der einzelnen Konzepte. Die Recherche der Studien dient im Rahmen dieser Arbeit dazu, den Überblick zum Stand der Technik und Wissenschaft mit aktuellen Konzepten und Ansätzen zu komplettieren. Es dient des Weiteren als Orientierung und Inspiration für die in dieser Arbeit angestrebte Optimierung der am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik entwickelten MMS für das HAF im Lkw (Kapitel 2.2.5).

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Tabelle 2.2: Aspekte der jeweiligen Konzeptstudien. („–“ = nicht vorhanden oder keine Angabe)

	HAVEit [55]	Fraunhofer IAO [49]	Volvo [77]	Bosch [78]	BMW i [79], [80]	Scania [81], [82]	Daimler [83], [84]
Modi-Anzeige	Symbole: HAF ACC Manuell	Symbole: HAF ACC Manuell	Symbole: HAF	Schriftzeichen: A = HAF, M = Manuell	Text: AUTO, ASSISTED PURE	Symbole + Text: AUTOMATIC DYNAMIC STATIC	Text: bei HAF- Verfüg- barkeit
Anzeige HAF- Verfügbarkeit	–	–	Zeit + visueller Timer	Zeit + visueller Timer	Zeit	Zeit + visueller Timer	Zeit + visueller Timer
Farbschema							
HAF	Blau	Blau	Türkis	Türkis	Blau	Blau Weiß	Blau
Übernahme	Orange	Orange	Türkis (+ Orange)	Orange Rot	Rot	Weiß Orange	Orange Rot
Manuell	Weiß	Blau	Weiß	Blau	Weiß Blau	Weiß Blau	Weiß Blau
Verfügbarkeit HAF-Modus	Grau	Schwarz (auf Blau)	Weiß Türkis	Weiß	Weiß Blau	Weiß Blau	Weiß Blau
Komponenten							
Kombidisplay	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Infotainment- display	Ja	–	Ja	Ja	Ja	Ja (Tablet)	Ja (Tablet)
HUD	–	–	–	–	Ja	–	–
LED	–	–	–	Ja (Lenkrad)	Ja (Lenkrad)	–	–
Sound	Ja	Ja	–	Ja	Ja	Ja	–
Haptik	Gaspe- dal	–	–	–	Lenkrad- verschieb- ung	–	Sitzdre- hung
Integration Smartphone / Tablet / PC	Ja	Ja	–	–	–	Ja	Ja
Informations- einheiten							
Umgebungs- verkehr	Ja	–	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Manöver- anzeige	Ja	–	Ja	Ja	Ja	–	Ja (Tablet)
Karte	–	–	Ja	Ja	Ja	–	Ja (Tablet)
Bedienelemente zur HAF-(De-) Aktivierung	–	– (Deaktivierung über Pedale)	Wippschalter hinter Lenkrad	Buttons am Lenkrad	Lenkrad- Schiebe- Schalter	Lenkrad- taste	Lenkrad- taste
Übernahmezeit	–	10 s	60 s	3 min 2 min	5 – 7 s	5 – 10 s	20 s

2.2.4.1 EU-Projekt HAVEit (2011)

Im EU-Projekt HAVEit (Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport) [55], [85] werden vier Interaktions- und Anzeigeconzepte für hochautomatisierte Pkw und Lkw erarbeitet, implementiert und getestet [55, S. 270]. Den visuellen Anzeigen liegt in allen vier Varianten (Abbildung 2.8) ein generisches Konzept mit den drei Hauptkomponenten „Automation Scale“ (Statusindikator), „Automation Monitor“ (Umgebungs- und Manöveranzeige), „Message Field“ (Anzeige von textbasierten Systemnachrichten) zugrunde [55, S. 274]. Übernahmeaufforderungen basieren auf visuellen und akustischen Signalen, die bei ausbleibender Reaktion des Fahrers eskaliert werden [55, S. 274]. Wenn der Fahrer die Kontrolle nicht übernimmt, startet das Fahrzeug ein „Minimum Risk Manoeuvre“ [55, S. 274], versucht also in einen risikominimalen Zustand überzugehen (z. B. durch Anhalten) [55, S. 274]. Je nach Variante bzw. Anwendungsfall wird das Anzeige- und Bedienkonzept um Komponenten, wie haptisches Feedback über das Gaspedal oder Informationseinheiten, wie eine umfangreiche Umgebungsverkehrsanzeige, erweitert [55, S. 274 – 277].

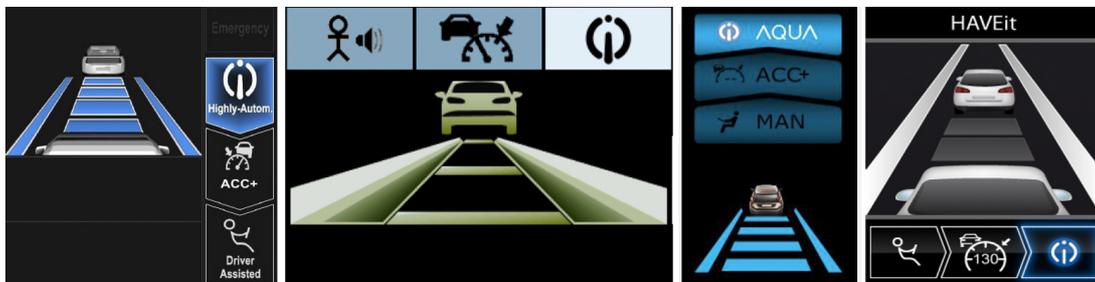


Abbildung 2.8: Anzeigevarianten des Statusindikators im EU-Projekt HAVEit [85, S. 149]

2.2.4.2 Fraunhofer IAO Studie (2015)

MELCHER ET AL. [49] stellen 2015 ein auf Basis einer Benchmark-Analyse erstelltes Konzept für die MMS in hochautomatisierten Fahrzeugen vor. Die Wissenschaftler orientieren sich vor allem am EU-Projekt HAVEit [85] und verwenden darauf basierend drei mögliche Systemmodi (Manuell, ACC, Autobahnpilot), welche im Kombidisplay in Form eines Statusindikators angezeigt werden (Abbildung 2.9, links). Im Fall einer notwendigen Übernahme erfolgt eine visuelle Aufforderung im Kombidisplay (Abbildung 2.9, rechts) zusammen mit einem akustischen Signal.

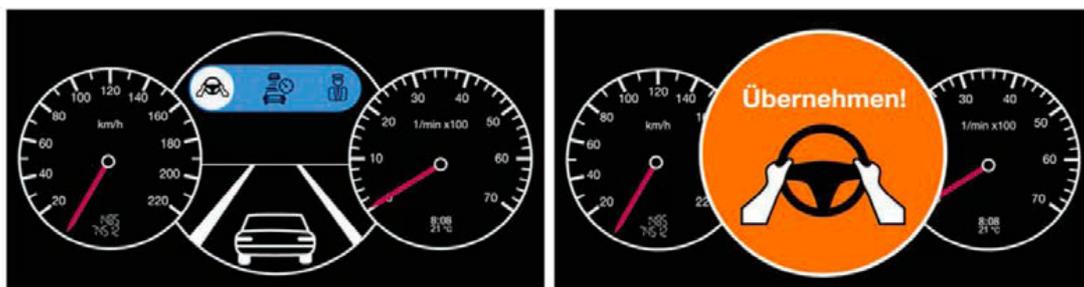


Abbildung 2.9: Anzeigeconzept von MELCHER ET AL. [49, S. 2871] am Fraunhofer IAO: Statusindikator (links) und Übernahmeaufforderung (rechts) im Kombidisplay.

Als „erweiterte“ Übernahmeaufforderung wird die visuelle Übernahmeaufforderung auf einem in das Gesamtsystem integrierten Smartphone angezeigt und ein Bremsruck ausgelöst. In der von MELCHER ET AL. [49] durchgeführten Fahrsimulatorstudie werden die einzelnen Anzeigekomponenten variiert. Die Autoren folgern aus den Ergebnissen, dass eine multimodale Anzeige der Übernahmeaufforderung (hier visuell und akustisch) zwingend erforderlich ist [49, S. 2873].

2.2.4.3 Volvo Konzept (2015)

Das Konzept von Volvo [77] verwendet ein Kombi- und Infotainmentdisplay als visuelle Anzeigen sowie Wippschalter hinter dem Lenkrad für die Steuerung des Automationsmodus. Im Kombidisplay wird zwischen den Rundinstrumenten Tachometer und Drehzahlanzeige eine Karte angezeigt, auf der Streckenabschnitte hervorgehoben sind, bei denen HAF möglich ist.

Wenn der HAF-Modus verfügbar wird, blinken die beiden hinter dem Lenkrad angebrachten Wippschalter türkis (Abbildung 2.10 links). Werden beide Wippen gleichzeitig gehalten, wird der HAF-Modus aktiviert, wobei sich in der Anzeige im Kombidisplay die Rundinstrumente verkleinern und im rechten Rundinstrument statt der Drehzahlanzeige die verbleibende HAF-Verfügbarkeit in Form eines Timers angezeigt wird. Gleichzeitig wird die Kartendarstellung größer und die Ansicht zoomt heraus, um einen größeren Bereich anzuzeigen (Abbildung 2.10 rechts). Durch die Veränderungen in der Anzeige wird der Moduswechsel visuell verdeutlicht. Im HAF-Modus werden auf dem Infotainmentdisplay, das fest in der Mittelkonsole integriert ist, zusätzliche Funktionen verfügbar, wie z. B. das Abspielen von Videos. Im Kombidisplay wird die Karte angezeigt. Bei System-Manövern, wie z. B. einem Überholvorgang, wird statt der Karte der erfasste Umgebungsverkehr dargestellt.

Eine Übernahmeaufforderung erfolgt 60 s vor dem Ende der HAF-Verfügbarkeit und wird visuell über das Kombidisplay sowie über ein türkises Blinken der Wippschalter angezeigt. Die Nutzung weiterer Modalitäten wird nicht erwähnt. Wird die Kontrolle nicht vom Fahrer durch Halten der Wippschalter übernommen, soll das Auto in einen risikominimalen Zustand übergehen und sicher anhalten.



Abbildung 2.10: Konzept für das HAF von Volvo [77]: De-/Aktivierung des HAF-Modus erfolgt über Wippschalter (links), im Kombidisplay wird während der hochautomatisierten Fahrt und bei Übernahmeaufforderungen eine Karte sowie ein Timer zur verbleibenden HAF-Verfügbarkeit angezeigt (rechts).

Volvo plant im Rahmen des Projekts „Drive Me“ 100 Pkw mit der hochautomatisierten Technologie in und um Göteborg bis 2017 in den Verkehr zu bringen [77]. Ende 2017 kündigt der Hersteller, aufgrund größerer Probleme, eine Verschiebung des Vorhabens um vier Jahre an [86].

2.2.4.4 Bosch Mobility Solutions Vision (2015)

Wie auch Volvo [77], verwendet Bosch [78], [87] (Abbildung 2.11) vorrangig die „klassischen“ Anzeigekomponenten Kombi- und Infotainmentdisplay, wobei letzteres bei Bosch als sehr großzügiger Touchscreen gestaltet ist. Ergänzt wird die visuelle Anzeige von einem auf dem Lenkrad angebrachten LED-Streifen. Signaltöne und Sounds werden bei Moduswechseln verwendet.

In der Navigationskarte von Bosch [78] werden Streckenabschnitte mit HAF-Verfügbarkeit grün hervorgehoben. Bei der Zieleingabe kann der Fahrer wählen, welcher Anteil der Fahrzeit hochautomatisiert gefahren werden soll. Es wird eine, ggf. auch längere, Route gewählt. Der Statusindikator zeigt die Modi mit nach ISO 2575 [88] gängigen Zeichen an: Der HAF-Modus wird mit dem Buchstaben „A“, der manuelle Modus mit „M“ dargestellt. In beiden Modi wird ein visueller Timer eingeblendet, wobei im manuellen Modus die Zeit in blau abläuft, bis HAF verfügbar ist. Im HAF-Modus läuft diese in grün ab, bis HAF nicht mehr verfügbar ist. Sobald HAF verfügbar ist, wird dies im Infotainmentdisplay angezeigt und zwei Buttons am Lenkrad blinken weiß. Werden beide Buttons für drei Sekunden lang gedrückt, wechselt das System in den HAF-Modus. Über das Infotainmentdisplay erhält der Fahrer während der hochautomatisierten Fahrt Zugriff auf Produktivitätsfunktionen, wie z. B. E-Mails verfassen, und erweiterte Entertainmentfunktionen, wie z. B. Online-Videos. Manöver werden in der Umgebungsverkehrsanzeige im Kombidisplay sowie optional im Infotainmentdisplay angezeigt.

Drei Minuten vor Ende des HAF wechselt die Farbe des Statusindikators von Grün zu Orange und je nach Dringlichkeit der Situation zu Rot (im Video 2 min vorher). Übernimmt der Fahrer nicht die Kontrolle, soll das Bosch-System ähnlich zum Konzept von Volvo [77] in einen sicheren Zustand übergehen und anhalten. Am Ende der Fahrt stellt das System Statistiken, z. B. zur Effizienz der Fahrt, zur Verfügung.



Abbildung 2.11: Konzept von Bosch Mobility Solutions [78]: Hochautomatisierte Fahrt mit Manöveranzeige im Infotainmentdisplay (links), Übernahmeaufforderung (rechts).

2.2.4.5 BMW i Vision Future Interaction (2016)

Bei der BMW i Vision Future Interaction [79], [80] kommuniziert der Fahrer sowohl im Auto, als auch außerhalb davon geräteübergreifend mittels natürlicher Sprache über ein Conversational User Interfaces mit BMW Connect, seinem digitalen Assistenten. Der Assistent erinnert an Termine, hilft bei der Tagesplanung, unterstützt den Fahrer bei der Erledigung seiner Aufgaben und gibt Vorschläge für alternative, schnellere Routen. Das Fahrzeug fährt im Konzeptvideo [79] selbständig und ohne Fahrer zu Treffpunkten. Dennoch wird das Fahrzeug als hochautomatisiertes System vorgestellt [80]. Der Fahrer fährt im Video [79] einen Großteil selbst

(„Joyride“). Das Fahrzeug übernimmt zwischenzeitlich die Fahrzeugführung, um es diesem während der Fahrt zu ermöglichen, an einer Videokonferenz teilzunehmen.



Abbildung 2.12: BMW i Vision Future Interaction [79]: Videokonferenz im HAF-Modus (links), Übernahmeaufforderung (rechts).

Neben der auditiven Sprachinteraktion verwendet das Konzept visuelle Anzeigen über Kombidisplay, Infotainmentdisplay (21 Zoll Panoramadisplay) und HUD sowie eine in das Lenkrad integrierte LED-Beleuchtung (Abbildung 2.12). Ein Wechsel zwischen den drei verfügbaren Modi Pure Drive (Manuelle Fahrt), Assist (manuelle Fahrt mit aktiven Assistenzsystemen) und Auto Mode (HAF) erfolgt über die Betätigung eines Schiebenschalters am Lenkrad [80]. Die LED am Lenkrad leuchtet im Auto Mode blau und während Übernahmephasen rot. Im Pure Drive und Assist Modus leuchtet die LED nicht. Wechselt der Fahrer von automatisierter zu assistierter bzw. manueller Fahrt, bewegt sich das Lenkrad näher zu ihm heran und färbt sich von blau zu rot. Es werden zudem Übernahmeaufforderungen im Kombi- und Infotainmentdisplay angezeigt.

2.2.4.6 Scania – Stauassistent und Active Frame Konzept (2014)



Abbildung 2.13: Scania Active Frame Konzept [81]: Kombidisplay mit dreistufigem Statusindikator (links), geteilte Ansicht auf dem Active Frame Tablet (rechts).

Das MMS-Konzept von Scania [81], [82, S. 16 – 18] umfasst visuelle Anzeigen über ein Kombidisplay und ein Infotainmentdisplay-Tablet sowie auditive Anzeigen in Form von Signaltönen. Das Konzept ermöglicht dem Fahrer in Stausituationen mit Geschwindigkeiten bis zu 50 km/h den Wechsel in den HAF-Modus. Ist der HAF-Modus aktiviert, kann der Fahrer auf dem Tablet NDRTs ausführen. Die „Active Frame App“ [82, S. 16] informiert ihn währenddessen über Fahrzeugzustand und Umgebung, wobei zwischen verschiedenen Ansichten wie Vollbild oder geteilter Bildschirm (Abbildung 2.13 rechts) gewechselt werden kann. Im Kombidisplay wird im manuellen und assistierten Modus ein dreistufiger Statusindikator angezeigt (Abbildung 2.13 links). Nach Aktivierung des HAF-Modus verändert sich die visuelle Darstellung der Geschwin-

digkeits- und Drehzahlanzeige. Statt des Statusindikators wird eine Umgebungsverkehr-Ansicht und eine abstrakte Manöveranzeige eingeblendet [82, S. 17].

Übersteigt die Geschwindigkeit 50 km/h, fordert das System über Kombidisplay, Tablet und Signaltöne zur Übernahme auf. Im Konzeptvideo [81] wird auf den visuellen Anzeigen ein 5-sekündiger Timer eingeblendet und ein akustischer Signal-Countdown ertönt. Übernimmt der Fahrer nicht rechtzeitig, geht das Fahrzeug in einen risikominimalen Zustand über.

2.2.4.7 Daimler – Mercedes-Benz Future Truck 2025 (2014)

2014 stellt Daimler mit dem Mercedes-Benz Future Truck 2025 [83], [89], [90] ein Konzept für eine MMS für das HAF im Lkw vor. Wie bei den Konzepten von Volvo [77] und Bosch [78], [87] verwendet auch Daimler [83], [89], [90] in erster Linie ein Kombi- und ein Infotainmentdisplay als visuelle Anzeigen. Letzteres ist im Future Truck 2025 in Form eines herausnehmbaren Tablets umgesetzt (Abbildung 2.14).



Abbildung 2.14: Daimler – Mercedes-Benz Future Truck 2025 [90]: Fahrerkabine mit gedrehtem Fahrerstuhl (links), Anzeige im Tablet (rechts).

Während der hochautomatisierten Fahrt steuert der „Highway Pilot“ das Fahrzeug. Der Fahrer kann während dem HAF das Tablet aus der Halterung nehmen und den Fahrerstuhl um 45° nach rechts in den Raum drehen. Das Tablet spiegelt die Informationen des Kombidisplays und stellt Infotainment-Funktionen wie Navigation, Klimasteuerung, Telefonie oder Musik bereit (Abbildung 2.14 rechts). Mittels Push-Nachrichten informiert das Tablet über Gefahren oder geplante Fahrmanöver. Eine Übernahmeaufforderung wird 20 s vor dem Ende der Automation in Form eines Vollbild-Timers über das Tablet angezeigt.

2015 hat die Daimler-Tochter Freightliner für den hochautomatisierten Inspiration Truck, der dem Future Truck Konzept sehr ähnlich ist, eine amtliche Straßenzulassung im US-Bundesstaat Nevada erhalten [7].

2.2.5 Entwickelte Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die entwickelte MMS für das HAF im Lkw wurde iterativ anhand des menschenzentrierten Entwicklungsprozesses (Kapitel 2.2.3.1) von LEHMER [11] und RICHARDSON ET AL. [12] konzipiert und evaluiert sowie von CZAPLARSKI [13] weiterentwickelt und prototypisch umgesetzt.

Das Konzept sieht die drei Modi Manuell, Assist (ACC und LKA sind aktiv) und Auto (HAF-Modus ist aktiv) vor. Deren Zustand und Verfügbarkeit wird mittels eines dreistufigen Statusindikators permanent im Kombidisplay angezeigt (Abbildung 2.15). Fokus bei der Konzeption

und Entwicklung, sowie bei der im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Evaluation liegt auf den Modi Manuell und Auto sowie auf dem Übergang zwischen den beiden Modi.

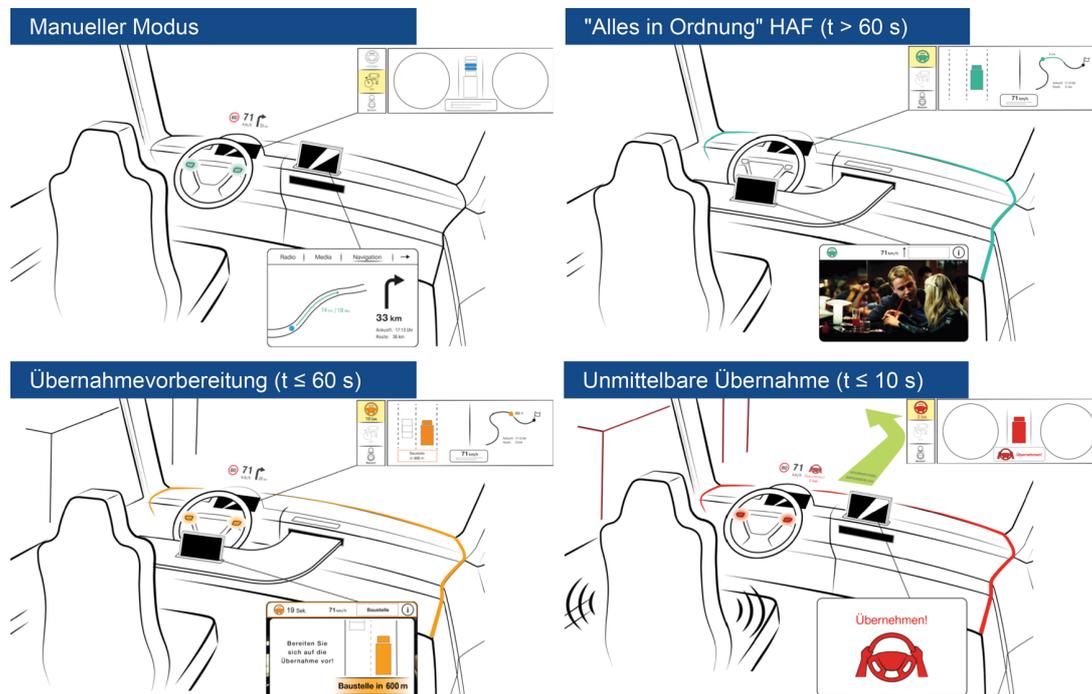


Abbildung 2.15: Übersicht zu den Modi und Anzeigen im MMS-Konzept von LEHMER [11, S. xxx – xxxvii] (v. l. n. r.): Manueller Modus mit verfügbarem HAF-Modus, „Alles in Ordnung“ HAF-Modus mit HAF-Verfügbarkeit $t > 60$ s, Übernahmevorbereitung (HAF-Verfügbarkeit $t \leq 60$ s), Unmittelbare Übernahme (HAF-Verfügbarkeit $t \leq 10$ s).

Zur Statusanzeige und zur Darstellung von Übernahmeaufforderungen werden die vier visuellen Anzeige-Komponenten Kombidisplay, Tablet, HUD und LED-Leiste verwendet (Abbildung 2.15). Akustische Informationen werden in Form von verbalen Ansagen und Signaltönen bei Moduswechsel und Übernahmeaufforderungen ausgegeben. LEHMER [11, S. 99] plant zudem die Nutzung einer Sitzvibration zur Eskalation der Übernahmeaufforderung. Diese ist, wie die von LEHMER [11] angedachte Sitzverschiebung und das Ausfahren einer Schreibtisch-Arbeitsplatte, nicht umgesetzt.

Die multimodale und eskalierende Warnstrategie soll dem Übersehen von wichtigen Informationen bzw. Warnungen vorbeugen und dem Fahrer die Kritikalität der Situation kommunizieren. Je nach Modus verwenden die visuellen Anzeigen eine andere Akzentfarbe. Für die drei Zustände des HAF-Modus („Alles in Ordnung“, Übernahmevorbereitung, unmittelbare Übernahmephase) wird ein dreistufiges „Ampelkonzept“ (Türkis, Orange, Rot) verwendet (Abbildung 2.15).

2.2.5.1 HAF-Modus

Während der hochautomatisierten Fahrt werden im Kombidisplay, neben dem permanent sichtbaren Statusindikator, wesentliche Informationen zu Umgebungsverkehr, geplanten Manövern und Navigation angezeigt (Abbildung 2.16). Die „klassischen“ Rundelemente Tachometer und Drehzahlmesser sowie die HUD-Anzeige sind im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus ausgeblendet, wodurch das Modusbewusstsein des Fahrers gestärkt werden soll. Das Tablet

kann während der hochautomatisierten Fahrt für fahrfremde Tätigkeiten genutzt werden. Es stellt dem Fahrer dauerhaft die wichtigsten Informationen über eine Statusleiste und einen Infobutton zur Verfügung (Abbildung 2.17).

2.2.5.2 Warnkaskade und Ampelkonzept

Mit Beginn der Übernahmepvorbereitung (60 s vor dem Ende der Automation) erfolgt eine Frühwarnung. Entsprechend dem Ampelkonzept findet ein Farbwechsel von Türkis zu Orange statt, die Status Elemente des HUD werden eingeblendet und es ertönt eine verbale Aufforderung zur Übernahmepvorbereitung. Die Eskalation über die Modalität Sprache wird auch von MÜLLER & LERMER [53, S. 54] ab einem Zeitbudget von weniger als 60 Sekunden empfohlen. Zudem leuchten die beiden Lenkradtasten auf, über die der Fahrer per Doppeltastendruck den HAF-Modus beenden kann.

10 s vor dem Ende der Automation geht die Anzeige in die unmittelbare Übernahmephase über (Abbildung 4.2). Das Farbschema wechselt zu Rot und eine Akutwarnung wird ausgelöst. Erneut ertönt eine verbale Übernahmeaufforderung in Kombination mit einem Warnton-Countdown. Auch hier entspricht die Eskalation mit Warntönen den Empfehlungen von MÜLLER & LERMER [53, S. 54]. Die Bedienung des Tablets wird gesperrt. Stattdessen wird eine Aufforderung zur Übernahme angezeigt (Abbildung 2.17). Im Kombidisplay werden die Runderlemente wieder eingeblendet, um das Bewusstsein für die Fahraufgabe zu stärken (Abbildung 2.16). Über das kontaktanaloge HUD werden potentiell gefährliche Objekte bzw. Fahrzeuge mit einer roten Umrandung hervorgehoben. Von LEHMER [11] wird angedacht, 3 s vor Ende der Automation eine weitere Eskalation mittels einer Sitzvibration durchzuführen. Diese ist (noch) nicht umgesetzt. In Übernahmesituationen, die nicht geplant sind, findet keine Übernahmepvorbereitung statt. Die Übernahmzeit beträgt dann 10 s und die Anzeige wechselt sofort vom „Alles in Ordnung“-HAF-Modus zur unmittelbaren Übernahmephase.

Abbildung 2.18 gibt einen Überblick zu den Modi und Anzeigen des umgesetzten Gesamtkonzepts. Die Darstellung der Warnkaskade in Kombidisplay und Tablet kann Abbildung 2.16 und Abbildung 2.17 entnommen werden.

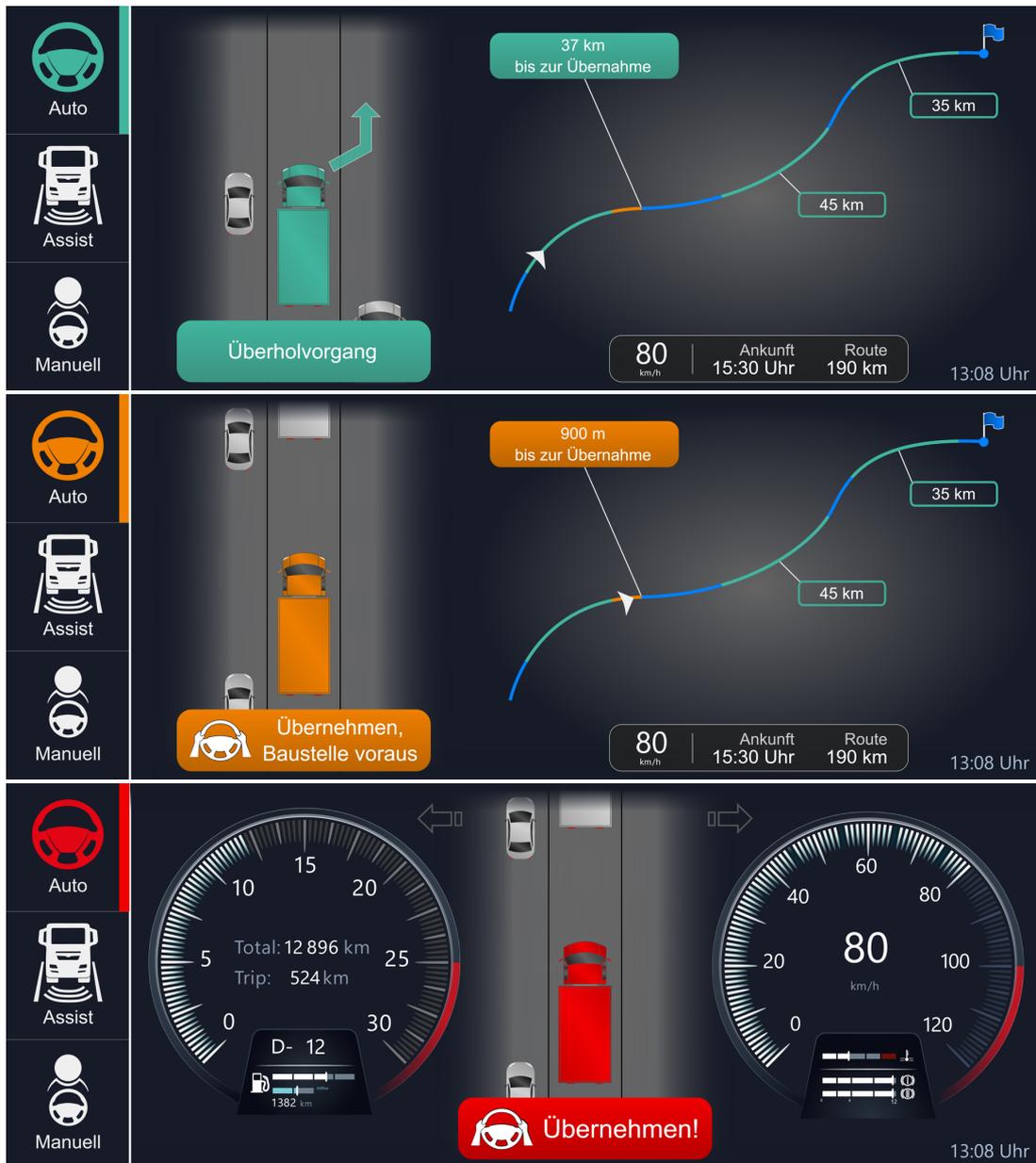


Abbildung 2.16: Kombidisplay-Design der entwickelten MMS [13, S. 65, xiii] : „Alles in Ordnung“-HAF-Modus mit Manöveranzeige (oben), Übernahmepvorbereitung (mittig), unmittelbare Übernahmephase (unten).

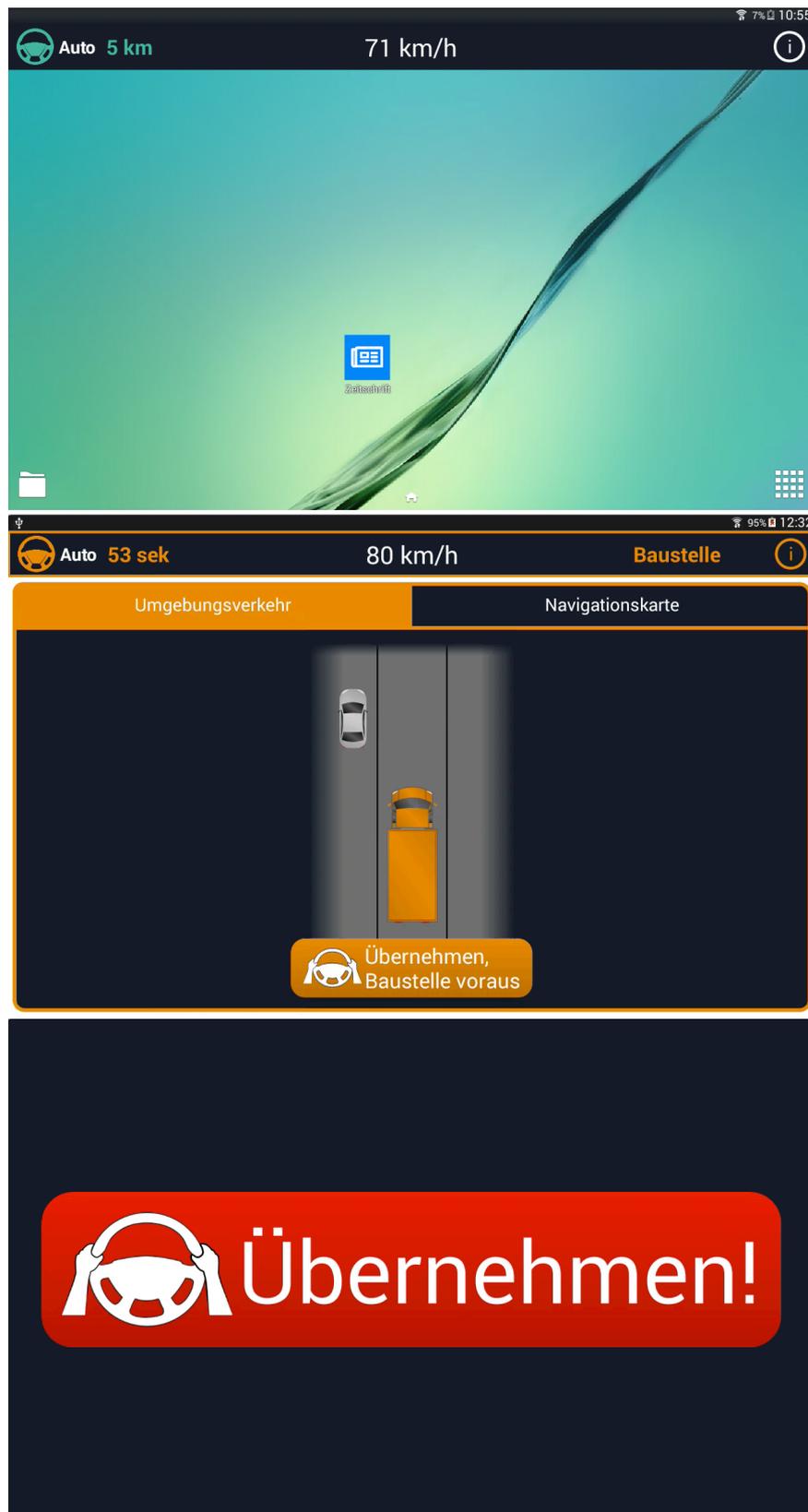


Abbildung 2.17: Tablet-Design der entwickelten MMS [13, S. xv]: „Alles in Ordnung“-HAF-Modus (oben), geöffnete Infobox während der Übernahmepreparation (mittig), unmittelbare Übernahmephase (unten).

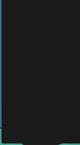
	t in s	Kombidisplay & Tablet	Head-up- Display	LED-Leiste & Lenkradtasten	Signaltöne & Ansagen	Sitzvibration
 Manueller Modus Blau: #1C79B5	0	–	–	–	–	–
		Informationen zu HAF-Verfügbarkeit über Statusindikator und Karte verfügbar		–	–	–
 "Alles in Ordnung" HAF-Modus Türkis: #42B59D	> 60	–	–	–	–	–
		Variante B / C: "[Zeit / Entfernung] bis zur Übernahme"	–	Türkises Leuchten (nur LED-Leiste über gesamte Breite; Lenkradtasten leuchten nicht)	Bei HAF-Aktivierung: Signalton + "Autopilot aktiviert"	–
 Übernahmevorbereitung Orange: #F29100	≤ 60	–	–	–	–	–
		"Übernehmen" + Grund + Übernahme-Symbol Variante B / C: + "[Zeit / Entfernung] bis zur Übernahme" Tablet-Sperrung ab $t = 20$	Übernahme-Symbol	Oranges Leuchten	Ansage (Variante A / B / C)	–
 Unmittelbare Übernahmephase Rot: #E20514	≤ 10	–	–	–	–	–
		"Übernehmen!" + Grund + Übernahme-Symbol	Übernahme-Symbol	Rotes Leuchten	Ansage (Variante A / B / C) + 10 s eskalierender Signal-Countdown	Sitzvibration ab $t = 3$ (nicht umgesetzt)
 Manueller Modus Blau: #1C79B5	0	–	–	–	–	–
					Signalton + "Autopilot deaktiviert!"	–

Abbildung 2.18: Zusammenfassung der für die Modiwechsel relevanten Informationen der MMS auf Basis von LEHMER [11] und CZAPLARSKI [13] (eigene Darstellung). t = HAF-Verfügbarkeit in Sekunden. Die Varianten A, B, C beziehen sich auf die unabhängige Variable „Informationsanzeige“ der Fahrsimulatorstudie (Kapitel 4.2).

3 Fragestellungen und Hypothesen

Der Großteil der bisherigen Forschung im Bereich HAF fokussiert sich auf Systeme für Pkw. Die Erkenntnisse bieten eine Grundlage, können aber nicht eins zu eins für die Anwendung im Lkw übertragen werden [12, S. 2072]. Das Forschungsziel dieser Arbeit ist die formative Evaluation und Optimierung einer entwickelten MMS für das HAF im Lkw (Kapitel 2.2.5). In einer Fahrsimulatorstudie wird untersucht, wie gut die MMS aus Nutzersicht geeignet ist. Mit einer Konformitätsbewertung wird die MMS auf die Erfüllung der Anforderungen und Empfehlungen der ISO 15005 überprüft. Auf Basis der Ergebnisse wird die MMS konzeptionell und gestalterisch optimiert, um eine ideale Schnittstelle für das HAF im Lkw zu schaffen.

Konkret ergeben sich, unter anderem auf Basis der Arbeiten von LEHMER [11], RICHARDSON ET AL. [12] und CZAPLARSKI [13], die folgenden Forschungsfragen und Hypothesen:

1. Soll dem Fahrer die verbleibende HAF-Verfügbarkeit angezeigt werden?
 - 1.H₀ Aus Fahrersicht ist es nicht wünschenswert, die verbleibende HAF-Verfügbarkeit anzuzeigen.
 - 1.H₁ Aus Fahrersicht ist es wünschenswert, die verbleibende HAF-Verfügbarkeit anzuzeigen.
2. Bei Annahme von Hypothese 1.H₁:
Wie soll die verbleibende HAF-Verfügbarkeit angezeigt werden?
 - 2.H₀ Aus Fahrersicht ist es wünschenswert, die verbleibende HAF-Verfügbarkeit als Entfernung in Metern oder Kilometern anzugeben.
 - 2.H₁ Aus Fahrersicht ist es wünschenswert, die verbleibende HAF-Verfügbarkeit als Zeit in Sekunden, Minuten oder Stunden anzugeben.
3. Wie wird der Wechsel zwischen 3-stufigem (Türkis – Orange – Rot) und 2-stufigem (Türkis – Rot) „Ampelkonzept“ bewertet?
 - 3.H₀ Aus Fahrersicht ist es wünschenswert, keinen Wechsel zwischen verschiedenen Ampelkonzepten zu verwenden.
 - 3.H₁ Aus Fahrersicht ist es wünschenswert, je nach Situation eine der beiden Varianten zu verwenden, also einen Wechsel zwischen verschiedenen Ampelkonzepten zu verwenden.

Während für die Forschungsfragen 1 – 3 konkret untersuchbare Hypothesen abgeleitet werden, dienen die Fragen 4 – 8 als Leitlinie für die explorative Evaluation der MMS.

Die MMS soll aus Fahrersicht ideal für das HAF im Lkw geeignet sein. Es ist sicherzustellen, dass die Fahrer das Gesamtkonzept und dessen Aspekte verstehen. Bestandteile des Konzepts müssen aus Fahrersicht einen Mehrwert bieten. Andernfalls müssen die Elemente angepasst oder entfernt werden. Es ergeben sich daraus drei Fragen:

4. Wie bewerten die Fahrer einzelne Komponenten und Aspekte des Konzepts?
5. Wie wird das Gesamtkonzept aus Fahrersicht bewertet?
6. Wie kann die MMS aus Fahrersicht verbessert werden?

In der entwickelten MMS werden sechs Anzeigekomponenten verwendet. Dadurch ist es möglich Informationen redundant oder nur vereinzelt darzustellen. Es wird folgende Frage formuliert:

7. Wo präferieren die Fahrer die Anzeige der verschiedenen Informationen?

Neben der Eignung aus Fahrersicht, soll die MMS die Anforderungen gängiger Normen und Richtlinien erfüllen. Die DIN EN ISO 15005 [76] behandelt die ergonomische Gestaltung von TICS. Es resultiert die Frage:

8. Ist die entwickelte MMS konform mit den Anforderungen und Empfehlungen der ISO 15005?

4 Fahr simulator studie

Zur formativen Evaluation der entwickelten MMS für das HAF im Lkw (Kapitel 2.2.5) wird mit Hilfe einer Fahr simulator studie eine Prüfung durch Benutzer (Kapitel 2.2.3) durchgeführt. Damit werden die Forschungsfragen 1 – 7 (Kapitel 3) untersucht und Optimierungspotenziale erfasst.

4.1 Versuchsaufbau

Die Studie wird mit dem dynamischen Lkw-Fahr simulator des FTM durchgeführt (Abbildung 4.1). Der Fahr simulator besitzt ein Hexapod-Bewegungssystem mit Spindelaktuatoren, welches Bewegungen in sechs Freiheitsgraden und eine Nutzlast von 1500 kg ermöglicht [91, S. 45]. Aktuell ist auf dem Bewegungssystem eine MAN TGS Serienfahrerkabine angebracht. Das Sichtsystem besteht aus fünf Rücklichtprojektoren mit Edge-Blending und stellt eine lückenlose 210°-Sicht mit einer Bildhöhe von 2,90 m dar [91, S. 39]. Zudem sind zwei 17"-Hauptrückspiegel displays und ein 10,4"-Weitwinkelspiegeldisplay an der Fahrerkabine angebracht [91, S. 39]. Ein schematischer Überblick zum gesamten Versuchsaufbau kann Abbildung A.3 entnommen werden.

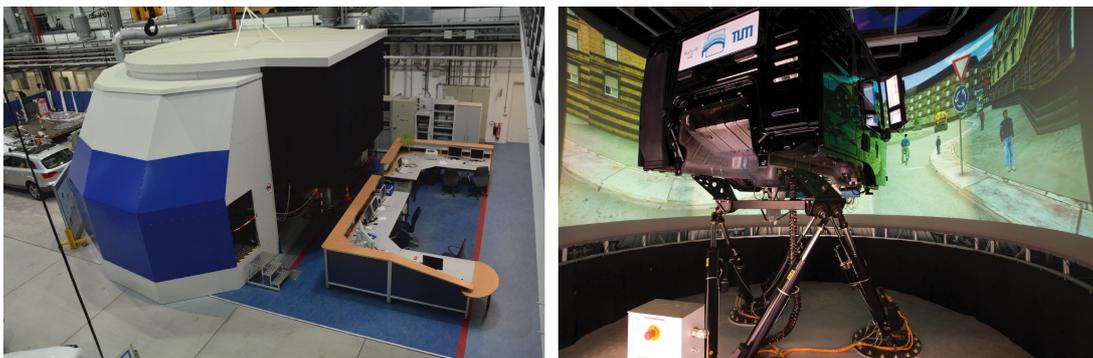


Abbildung 4.1: Dynamischer Lkw-Fahr simulator am FTM [92]: Ansicht von oben mit Blick auf Simulator- und Operatorbereich (links); Ansicht der auf dem Bewegungssystem angebrachten Fahrerkabine und der Sichtsimulation (rechts).

Für die Fahr simulation wird die Software SILAB (Version 5.1) des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaft genutzt. Entsprechend wird darin die hochautomatisierte Fahrfunktion umgesetzt, welche bei Aktivierung die Längsführung des Lkw auf eine Zielgeschwindigkeit bzw. auf ein vorausfahrendes Fahrzeug sowie die Querführung auf die Fahrbahnmitte regelt. Der Fahrer kann die Funktion über gleichzeitiges Drücken der beiden Lenkradtasten aktivieren. Eine Deaktivierung der Automation ist über Pedal- und Lenkeingriff sowie durch das

Drücken der Lenkradtasten möglich. Zusätzlich wird, entsprechend der definierten Szenarien (Kapitel 4.2.1), eine automatisierte Überholfunktion umgesetzt.

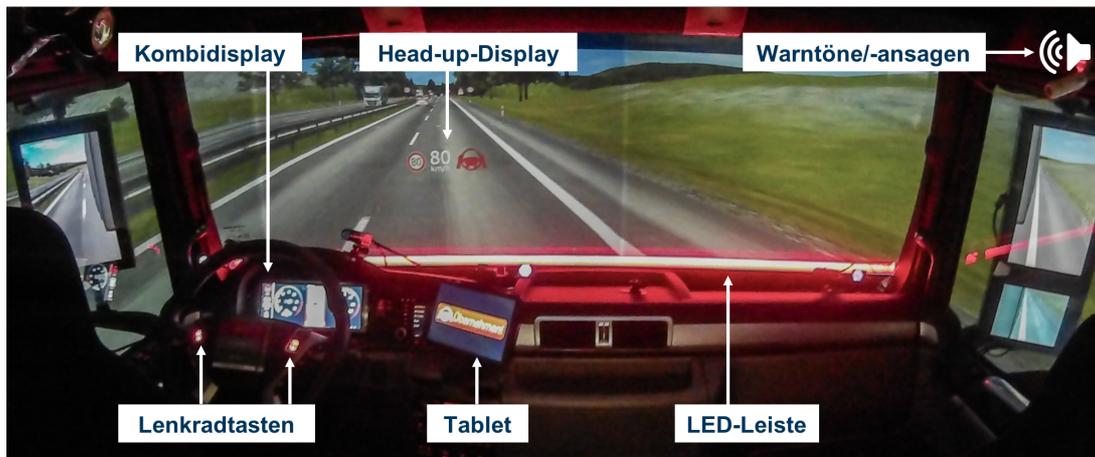


Abbildung 4.2: Fahrerkabine des Simulators mit den Komponenten der entwickelten MMS.

Die entwickelte MMS (Kapitel 2.2.5) und deren Komponenten werden in die Fahrerkabine des FTM-Fahrersimulators integriert (Abbildung 4.2). Die Kommunikation zwischen SILAB und dem Kombidisplay, den Lenkradtasten und dem Soundsystem erfolgt über ein Controller Area Network (CAN). Ein User Datagram Protocol (UDP) wird zur Kommunikation mit dem Raspberry Pi genutzt, welches die LED-Leiste ansteuert. Zur kabellosen Kommunikation mit dem Tablet wird ein Wireless Local Area Network (WLAN) verwendet. Das HUD wird virtuell über die Sichtsimulation angezeigt.

4.2 Versuchsdesign

Entsprechend Forschungsfrage 1 und 2 (Kapitel 3) wird die unabhängige Variable (UV) „Informationsangabe“ gewählt, die dreistufig variiert wird:

- Variante A:
Keine Angabe der verbleibenden HAF-Verfügbarkeit
- Variante B:
Angabe der verbleibenden HAF-Verfügbarkeit als Zeit in Sekunden oder Minuten
- Variante C:
Angabe der verbleibenden HAF-Verfügbarkeit als Entfernung in Metern oder Kilometern

Anhand den drei Ausprägungen der UV wird jeweils eine Variante der MMS erstellt. Konkrete Umsetzungen der Varianten in den visuellen und akustischen Anzeigen können Tabelle 4.1 entnommen werden. Die Stufenzahl des Ampelkonzepts (Forschungsfrage 3) wird innerhalb des Versuchs nicht systematisch variiert. In den Versuchsfahrten treten aber beide Varianten des Ampelkonzepts entsprechend der geplanten bzw. ungeplanten Übernahmen (Kapitel 4.2.1) auf.

Für die Durchführung der Studie werden 30 VP geplant und ein Within-Subject-Design gewählt. Alle VP fahren in einem Versuch drei Fahrten hintereinander mit jeweils einer anderen Displayvariante. Um Transfer- und Reihenfolgeeffekte zu vermeiden, wird die Reihenfolge der Varianten und Situationen permutiert (Kapitel 4.2.2).

Tabelle 4.1: Varianten der unabhängigen Variable Informationsangabe.

	Variante A (keine Angabe)	Variante B (Zeitangabe)	Variante C (Entfernungsangabe)
„Alles in Ordnung“-HAF-Modus (verbleibende HAF-Verfügbarkeit $t > 60$ s)			
Visuell	–	„[x min] bis zur Übernahme“	„[x km] bis zur Übernahme“
Akustisch	–	–	–
Übernahmevorbereitung (verbleibende HAF-Verfügbarkeit $t \leq 60$ s)			
Visuell	„Übernehmen, Baustelle voraus“	„[x sek] bis zur Übernahme“ + „Übernehmen, Baustelle voraus“	„[x m] bis zur Übernahme“ + „Übernehmen, Baustelle voraus“
Akustisch bei $t = 60$ s	„Bitte bereiten Sie sich auf die Übernahme vor.“	„Automation endet in 60 Sekunden.“	„Automation endet in 1300 Metern.“
Unmittelbare Übernahmephase (verbleibende HAF-Verfügbarkeit $t \leq 10$ s)			
Visuell	„Übernehmen!“	„[x sek] bis zur Übernahme“ + „Übernehmen, Baustelle voraus“	„[x m] bis zur Übernahme“ + „Übernehmen, Baustelle voraus“
Akustisch bei $t = 13$ s	„Jetzt übernehmen!“	„Automation endet in 10 Sekunden.“	„Automation endet in 220 Metern.“
bei $t = 10$ s	+ Signal-Countdown (10 s, $f = 1$ Hz)	+ Signal-Countdown (10 s, $f = 1$ Hz)	+ Signal-Countdown (10 s, $f = 1$ Hz)

Die abhängigen Variablen (AV) und deren Operationalisierungen, welche für die einzelnen Fahrten während und nach der Fahrt erfasst werden, sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

Tabelle 4.2: Abhängige Variablen und deren Operationalisierung.

Abhängige Variable	Operationalisierung
Kontrollierbarkeit	Kritikalität-Skala von NEUKUM & KRÜGER [93, S. 303]
Beanspruchung	Driving Activity Load Index (DALI) von PAUZIE [94]
Akzeptanz	Akzeptanz-Skala von VAN DER LAAN, HEINO & DE WAARD [33]
User Experience	User Experience Questionnaire (UEQ) von LAUGWITZ, HELD & SCHREPP [95]
Übernahmequalität	Beurteilung mittels Versuchsprotokollen und Videoaufnahmen

Des Weiteren werden das Gesamtkonzept und die Varianten, über die genannten AV hinaus, explorativ untersucht. Dazu werden die VP zwischen den Versuchsfahrten zu einzelnen Aspekten der MMS sowie mit einer ausführlichen Abschlussbefragung befragt. Ergänzt wird dies durch einen qualitativen „Mix and Match“-Designworkshop am Ende des Versuchs (Kapitel 4.3.11).

4.2.1 Szenarien und Streckendesign

Jede der drei Versuchsfahrten enthält sechs Verkehrssituationen bzw. Szenarien (Abbildung 4.3), die auf einem Expertenworkshop zur Identifikation Lkw-spezifischer Autobahnszenarien basieren [96, S. 4 – 5]. Bei der freien Fahrt mit anschließender Folgefahrt (S1) und dem Überholvorgang (S2) handelt es sich um Szenarien, die das hochautomatisierte System bewältigen kann [96, S. 4 – 5]. 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 [96, S. 4 – 5]. Bei der letzteren Gruppe wird eine Übernahme durch den Fahrer erforderlich.



Abbildung 4.3: 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).

4.2.2 Versuchsfahrten und Permutation

In jedem Versuch fährt die VP drei Fahrten im Simulator, jeweils mit einer anderen Displayvariante (Tabelle 4.1). Die Reihenfolge der Displayvarianten wird für die 30 geplanten Versuche mit einem Zufallsgenerator permutiert [97], wobei jede Permutation gleich oft auftritt (Tabelle A.21). Die Szenarien-Abfolge ist für jede der drei Fahrten ebenfalls zufällig festgelegt. In jeder Fahrt startet der Fahrer auf einem Autobahnrastplatz und fährt auf eine Autobahn auf. Anschließend durchfährt der Proband die Szenarien entsprechend Abbildung 4.4. Jede Fahrt endet mit der Autobahnabfahrt (S6). Nach dieser wird der Fahrer gebeten, am Straßenrand anzuhalten. Geplante, also vom System vorhersehbare Übernahmen (S3 und S6) bestehen aus einer Übernahmephase und einer unmittelbaren Übernahmephase. Geplante Übernahmen sind für den Fahrer bereits vor dem Eintreten der Situation in die Navigationskarte ersichtlich. Ungeplante Übernahmen (S4 und S5) werden in der Karte nicht angezeigt und bestehen nur aus einer unmittelbaren Übernahmephase mit einer Übernahmezeit von 10 s. Situationen ohne nötige Übernahme (S1 und S2) werden dem Fahrer ebenfalls nicht vorher angezeigt.

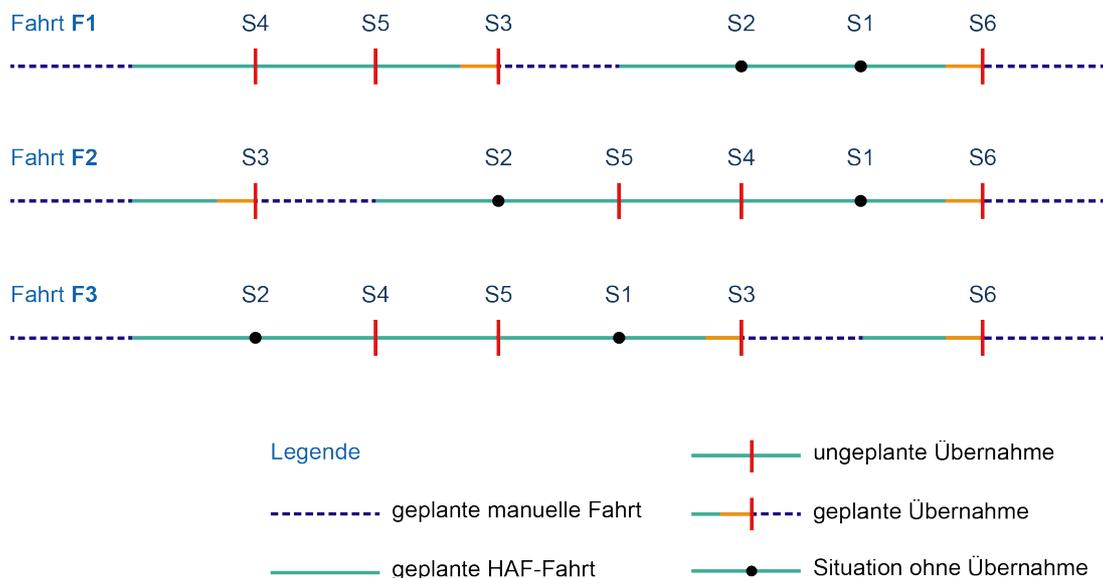


Abbildung 4.4: Schematischer Überblick zu Streckendesign und Szenarien-Abfolge in den drei Versuchsfahrten F1, F2, F3 (eigene Darstellung).

4.2.3 Nebenaufgabe

Die VP werden vor der Durchführung der Versuchsfahrten dazu instruiert, wenn möglich, den HAF-Modus zu nutzen und währenddessen einen Zeitschriftenartikel in einer Tablet-App zu lesen (Datenträger: 04_Fahrsimulatorstudie/02_Versuchsunterlagen/Nebenaufgabe). Die Artikel werden so ausgewählt, dass sie für die VP von Interesse sind, damit diese durch das Lesen vollständig abgelenkt werden.

4.3 Materialien

Zur Datenerhebung werden, neben einem 20-minütigen Design-Workshop am Ende des Versuchs (Kapitel 4.3.11), primär Befragungen in Form von Interviews vor, während, zwischen und nach den Versuchsfahrten durchgeführt. Entsprechend dem von PÖTSCHKE [98, S. 47] beschriebenen Vorgehen bei Interviews, trägt der Versuchsleiter die in einem Gespräch mit dem Befragten erhaltenen Informationen in eine vorbereitete Datenmaske ein. Durch diese Methode werden Unklarheiten bei den Befragten direkt im Gespräch ausgeräumt, während ein korrekter Verlauf der Befragung eingehalten wird und der Befragte durch die direkte Kommunikation mit dem Interviewer motiviert wird [98, S. 48].

Die Datenmaske wird mit der Online-Umfrage-Anwendung LimeSurvey (Version 2.05) erstellt. Darin sind alle Fragen in einer festgelegten Reihenfolge enthalten. Im Folgenden werden anhand der zu erfassenden Aspekte die standardisierten und nichtstandardisierten Erhebungsinstrumente vorgestellt. Die vollständige Fragebogenstruktur kann Tabelle A.1 entnommen werden.

4.3.1 Demographie

Allgemeine demographische Daten sowie Daten zur Lkw-Nutzung (Führerscheinbesitz, Fahrleistung pro Woche und Jahr, Art der Erwerbstätigkeit in Verbindung mit Lkw-Nutzung, Art der gefahrenen Strecken) werden mit geschlossenen und offenen Fragen abgefragt.

Mit dem aus zwölf Items bestehenden Fragebogen von NEYER ET AL. [99] wird die Technikbereitschaft der Stichprobe anhand einer fünfstufigen Likert-Skala (1 = stimmt gar nicht, 2 = stimmt wenig, 3 = stimmt teilweise, 4 = stimmt ziemlich, 5 = stimmt völlig) erfasst. Dem Fragebogen liegen die drei Subskalen Technikakzeptanz, Technikkompetenzüberzeugungen und Technikkontrollüberzeugungen zugrunde, die jeweils als Mittelwert aus vier Items berechnet werden. Items der Skala Technikkompetenzüberzeugungen sind negativ gepolt und werden zur Auswertung umcodiert. Die übergeordnete Technikbereitschaft ergibt sich aus dem Mittelwert der drei Subskalen.

4.3.2 Kontrollierbarkeit

Die Kontrollierbarkeit bzw. die empfundene Kritikalität wird anhand der elfstufigen Skala nach NEUKUM ET AL. [100, S. 144] von der VP während der Fahrt bewertet (Abbildung 4.5). Jedes der sechs Szenarien (Abbildung 4.3) wird mit jeder Displayvariante einmal erlebt und direkt im Anschluss an dieses mit der Skala bewertet. Die Skala hat fünf Grobkategorien: nichts bemerkt (0), harmlos (1 – 3), unangenehm (4 – 6), gefährlich (7 – 9) und nicht kontrollierbar (10). Bewertungen ≥ 7 Skalenpunkte sind als nicht tolerierbar zu bewerten [100, S. 145]. Die Skala wird den VP mit den in Abbildung 4.5 aufgeführten Instruktionen in der Einweisung vorgestellt, um eine eindeutige Interpretation der Kategorien sicherzustellen.

nicht kontrollierbar	10	
gefährlich	9	Sicherheitskritische Situationen, bei denen die Anforderungen an Sie hoch sind und die Kritikalität der entstandenen Situation von Ihnen als nicht mehr tolerierbar beurteilt wird.
	8	
	7	
unangenehm	6	Situationen, die einen deutlichen, aber von Ihnen als vertretbar bewerteten Aufwand erfordern.
	5	
	4	
harmlos	3	Situationen, in denen im Wesentlichen Komfortanforderungen verletzt sind. Zur Bewältigung ist kein oder nur ein geringer Aufwand von Ihnen notwendig.
	2	
	1	
nichts bemerkt	0	

Abbildung 4.5: Skala nach NEUKUM ET AL. [100, S. 144] mit Instruktionen zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen.

4.3.3 Beanspruchung

Die empfundene Beanspruchung der VP wird mit dem Driving Activity Load Index (DALI) [94] erfasst. Der von PAUZIE [94] auf Basis des NASA-TLX [101] für den Automobilkontext optimierte Fragebogen umfasst sieben Faktoren. Diese werden in die Kategorien Wahrnehmungsbeanspruchung (Visuelle Anforderungen, Auditive Anforderungen, Taktile Anforderungen), mentale Beanspruchung (Zeitliche Anforderungen, Beeinflussung durch Nebenaufgabe, Gesamte Aufmerksamkeitsanforderungen) und Fahrerzustand (Stress) eingeteilt [102, S. 5]. Der DALI nutzt für jeden der sieben Faktoren bzw. Items eine sechsstufige Likert-Skala (0 = geringe Anforderungen; 5 = hohe Anforderungen).

Zur Verwendung in der Fahrstudie wird der Fragebogen ins Deutsche übersetzt. Die Übersetzung wird auf Basis der DALI-Anleitung [102] und einer deutschen Version des NASA-TLX [103] angefertigt. Dabei wird versucht, möglichst nah an der englischen Originalfassung zu bleiben und gleichzeitig eine gute Lesbarkeit und Verständlichkeit zu gewährleisten.

4.3.4 Akzeptanz

Zur Erfassung der Akzeptanz des Systems wird der Fragebogen von VAN DER LAAN ET AL. [33, S. 3] in der deutschen Übersetzung von KONZIOR [104] verwendet. Die neun Items bestehen aus gegensätzlichen Wortpaaren, die sich auf einer fünfstufigen Likert-Skala [-2, 2] gegenüberstehen und die direkte Einstellung des Nutzers gegenüber dem System abfragen [33, S. 3 – 9]. Die Akzeptanzskala ist in die Subskalen Nützlichkeit und Zufriedenheit unterteilt. Nützlichkeit beschreibt die praktischen Aspekte des Systems und Zufriedenheit die Annehmlichkeit der Nutzung des Systems [33, S. 9].

4.3.5 User Experience

User Experience (UX; dt. „Benutzererlebnis“) umfasst sämtliche „Wahrnehmungen und Reaktionen einer Person, die aus der tatsächlichen und/oder der erwarteten Benutzung eines Produkts, eines Systems oder einer Dienstleistung resultieren“ [68, S. 7].

Zur Erfassung des komplexen Konstrukts wird der User Experience Questionnaire (UEQ) von LAUGWITZ, HELD & SCHREPP [95], [105] verwendet. Die 26 Items des UEQ werden auf einer

siebenstufigen Likert-Skala bewertet. Sie umfassen die sechs Subskalen Attraktivität, Durchschaubarkeit, Effizienz, Steuerbarkeit, Stimulation und Originalität, womit die Displayvariante hinsichtlich Attraktivität, pragmatischer und hedonischer Qualität bewertet wird [95].

4.3.6 Informationsgehalt und Wohlbefinden

Neben den standardisierten Fragebögen, wird die jeweilige Fahrt mit zwei teiloffenen Fragen bezüglich des Informationsgehalts und zwei geschlossenen Fragen bezüglich des Wohlbefindens beim HAF und in Übernahme-situation bewertet. Zudem steht ein freies Textfeld für Kommentare und Anmerkungen zur Verfügung.

4.3.7 Übernahmequalität, Probleme und Auffälligkeiten

In den Szenarien S3, S4, S5 und S6 ist eine Übernahme der Kontrolle durch den Fahrer erforderlich (Kapitel 4.2.1). In S3 und S6 erhält der Fahrer 60s vor Ende der Automation eine Frühwarnung sowie 10 s vor Ende der Automation eine Akutwarnung. In S4 und S5 erhält der Fahrer lediglich 10 s vor Ende der Automation eine Akutwarnung.

Im Rahmen dieser Studie sind Mindest-Übernahmezeiten nicht von Interesse, weshalb hierfür keine quantitativen Messungen vorgenommen werden. Stattdessen werden Videoaufnahmen und Versuchsprotokolle verwendet. Auffälligkeiten, Probleme, Unfälle, Fehler und sonstige Ereignisse während der Versuchsdurchführung werden dokumentiert und analysiert, um die Übernahmen qualitativ zu bewerten. Dies liegt darin begründet, dass die VP zu einem – nach ihrer subjektiven Einschätzung – angemessenen Zeitpunkt übernimmt. Eine schnelle Übernahme wird daher nicht als Qualitätsmerkmal angesehen. Für Messung und Bewertung von Mindest-Übernahmezeiten wird auf Arbeiten wie z. B. GOLD ET AL. [47] verwiesen.

4.3.8 Systemverständnis, Komponenten und Informationseinheiten

In der Abschlussbefragung wird das Verständnis der VP von System, Gesamtkonzept und einzelner Bestandteile der MMS erfasst. Die VP werden aufgefordert die Komponenten und die damit angezeigten Informationseinheiten in eigenen Worten zu beschreiben. Die Antworten werden notiert und in der Auswertung mit den korrekten Definitionen abgeglichen. Insbesondere Abweichungen und Fehlinterpretationen sollen helfen, die Elemente hinsichtlich des Nutzerverständnisses zu optimieren. Zudem bewerten die VP die Anzeige- und Bedienkomponenten der MMS sowie einzelne Informationseinheiten, wie z. B. Statusindikator, Kartendarstellung oder Übernahmegrund. Erfasst wird insbesondere die Relevanz einzelner Informationen sowie die Sinnhaftigkeit und Nützlichkeit der Elemente aus Nutzerperspektive.

4.3.9 Konzeptvarianten

Die VP werden in der Abschlussbefragung gebeten, die Varianten direkt, mittels einer Rangreihe (1. Platz = favorisierte Variante; 3. Platz = am wenigsten favorisierte Variante), zu bewerten. Zuvor werden Unterschiede in den Varianten explizit vom Versuchsleiter erläutert.

In der Abschlussbefragung bewertet die VP zudem Gestaltungsvarianten von Informationseinheiten. Die VP entscheiden sich anhand von Gestaltungsentwürfen für eine der Varianten und begründen ihre Entscheidung. Konkret werden die folgenden Informationseinheiten untersucht:

- Statusindikator (Abbildung 4.6):
Symbole + Text (wie im Versuch) – vs. – nur Symbole – vs. – nur Text



Abbildung 4.6: Gestaltungsvarianten des Statusindikators: Symbole + Text (links), nur Symbole (mittig), nur Text (rechts).

- Spurmarkierung in der Umgebungsverkehr-Anzeige (Abbildung 4.7):
Schwarz (wie im Versuch) – vs. – farbig – vs. – keine Markierung

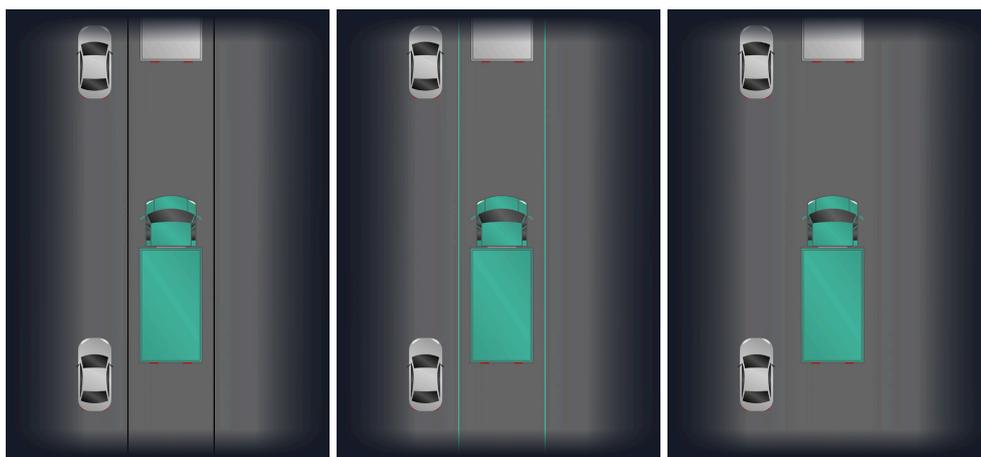


Abbildung 4.7: Gestaltungsvarianten der Spurmarkierung: Schwarz (links), farbig (mittig), keine Markierung (rechts).

- Navigationskarte (Abbildung 4.8):
Abstrakte Darstellung (wie im Versuch) – vs. – detaillierte Darstellung

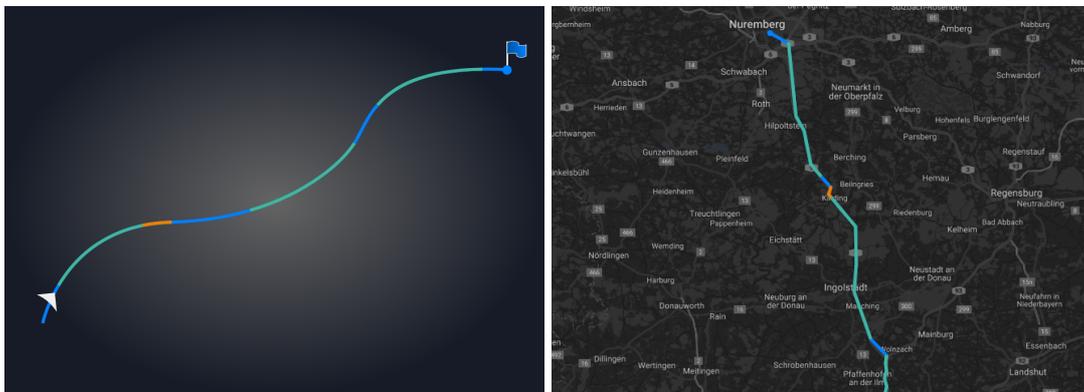


Abbildung 4.8: Gestaltungsvarianten der Navigationskarte: Abstrakte (links), detailliert (rechts).

4.3.10 Gesamtkonzept

Das Gesamtkonzept wird, neben den bereits erwähnten Messmethoden, explizit hinsichtlich der folgenden Elemente durch direkte Nutzerbefragung evaluiert:

- Statusindikator und Übernahmeanzeige:
Bewertung der angezeigten Informationen und Modi aus Nutzersicht.
- Farbwechsel und Ampelkonzept:
Welche Farbwechsel werden von den VP wahrgenommen und wie bewerten sie das Ampelkonzept?
- Übernahmezeiten:
Bewertung der Übernahmezeiten in den verschiedenen Phasen des Konzepts.
- Rückfallebene:
Soll das System nach Deaktivierung des HAF-Modus in den manuellen Modus oder in den Assist-Modus übergehen?

Die Punkte werden sowohl mittels einer fünfstufigen Likert-Skala (1 = stimme gar nicht zu; 5 = stimme voll und ganz zu) bewertet, als auch mit teil-/offenen Fragen, womit die Bewertung der VP zudem qualitativ erfasst wird.

4.3.11 Mix and Match

Nach der Abschlussbefragung wird, zusammen mit der VP, ein etwa 20-minütiger Design-Workshop durchgeführt, welcher im Folgenden als „Mix & Match“ bezeichnet wird. Den VP werden laminierte Anzeigeelemente, Screen-Templates sowie Stifte und Papier zur Verfügung gestellt, um für die Fahrerkabine, das Kombiinstrument und das Tablet nach eigenen Vorlieben und Ideen ein „Wunsch“-Anzeigekonzept zu gestalten (Abbildung 4.9).

Es steht den VP frei, die vorgefertigten Anzeigeelemente zu nutzen, miteinander zu kombinieren oder eigene Ideen zu beschreiben beziehungsweise zu skizzieren. Der Versuchsleiter steht bei Rückfragen beratend zur Seite, ist aber angehalten, den Gestaltungsprozess der VP

nicht zu beeinflussen. Der technische Leiter dokumentiert währenddessen Entscheidungen, Ideen und Anmerkungen der VP.



Abbildung 4.9: Mix and Match Elemente für Fahrerkabine, Kombiinstrument und Tablet (v. l. n. r.).

4.4 Versuchsablauf

Der Versuch startet nach Begrüßung der VP mit einer Einweisungspräsentation. Diese enthält Informationen zu Versuchsablauf, Fahrsimulator, Sicherheitsvorkehrungen, verwendeter Messtechnik und HAF sowie eine kurze Einführung in das Anzeige-Bedienkonzept der MMS. Es werden zudem demographische Daten erfasst. Eine weitere Einweisung erfolgt in der Fahrerkabine des Simulators. Im Anschluss an die Einweisung macht sich die VP in der Eingewöhnungsfahrt etwa fünf Minuten mit dem Simulator und der MMS vertraut. Dabei wird die Aktivierung und Deaktivierung des HAF-Modus geübt sowie die während der Fahrt erforderliche Bewertung der empfundenen Kritikalität (Abbildung 4.5). Nach einer kurzen Unterbrechung folgen die drei ca. 15-minütigen Versuchsfahrten (F1, F2, F3) mit den Displayvarianten in entsprechender permutierter Reihenfolge (Kapitel 4.2). Während der Versuchsfahrten wird die VP jeweils nach einem der sechs Szenarien (Kapitel 4.2.1) zur Kontrollierbarkeit bzw. Kritikalität der erlebten Situation befragt.

An jede Versuchsfahrt schließt eine Zwischenbefragung an, in welcher die jeweilige Displayvariante mittels DALI, Akzeptanzskala, UEQ sowie bezüglich Informationsgehalt und Wohlbefinden bewertet wird.

Nach der Durchführung der drei Versuchsfahrten folgt eine 45-minütige Abschlussbefragung und das 20-minütige Mix and Match. Beendet wird der Versuch mit einem Debriefing und der Verabschiedung der VP. Der gesamte Versuchsablauf ist in Abbildung 4.10 schematisch dargestellt.

Zur Strukturierung und Sicherstellung vergleichbarer Versuchsabläufe sowie zur Vermeidung von Versuchsleiterartefakten wird ein detaillierter Versuchsleitfaden (Datenträger: 04_Fahrsimulatorstudie/02_Versuchsunterlagen/Versuchsleitfaden) verwendet. Dieser umfasst Anweisungen zum Vorgehen, zur Bedienung von Simulator und Simulationssoftware sowie zur Kommunikation mit der VP. Ebenso sind Vorgehensweisen beim Auftreten von Fehlern oder Problemen dokumentiert.

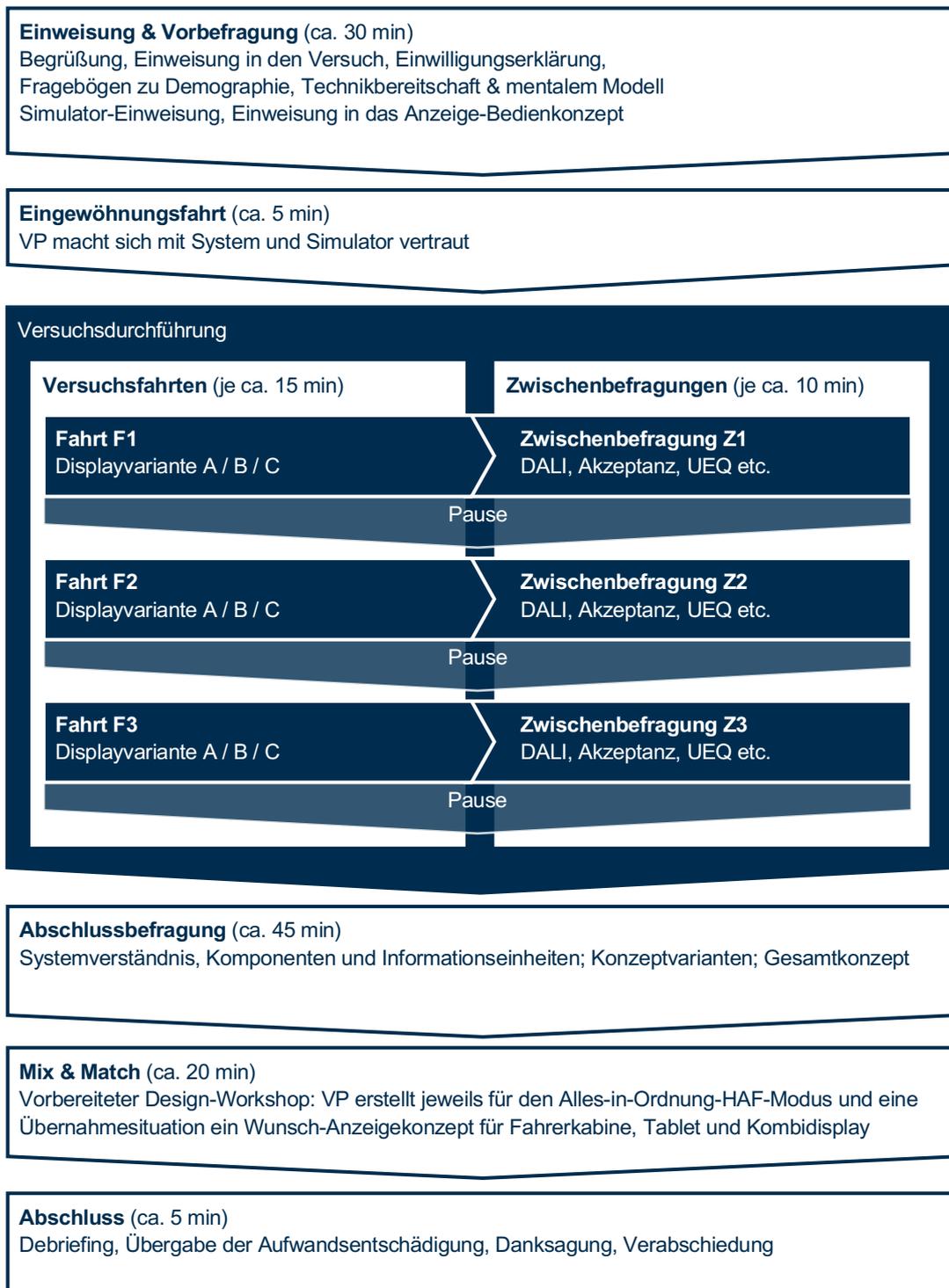


Abbildung 4.10: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs der Fahrsimulatorstudie.

5 Ergebnisse

Die Durchführung der Fahrsimulatorstudie erfolgt im Zeitraum vom 13. Juni bis 2. Juli 2018. Im Anschluss daran wird die Konformität der MMS mit der ISO 15005 [14] überprüft. Im Folgenden sind die Ergebnisse dokumentiert.

5.1 Fahrsimulatorstudie

Von den 32 durchgeführten Versuchen werden zwei Datensätze ausgeschlossen: Ein Datensatz (VP 26) ist aufgrund eines Simulator-Defekts unvollständig. Ein weiterer Datensatz (VP 6) kann aufgrund eines längeren Anzeigefehlers in Tablet und Kombidisplay nicht verwendet werden.

Trotz standardisiertem und strukturiertem Vorgehen fehlen in den 30 verwendeten Datensätzen aus der Fahrsimulatorstudie zwei Item-Werte der standardisierten Fragebögen. Basierend auf der Auswertung der Versuchsprotokolle (Datenträger: 04_Fahrsimulatorstudie/04_Ergebnisse/11_Versuchsprotokolle) und der genauen Betrachtung von Art und Zeitpunkt des Fehlens, wird vermutet, dass die Daten aufgrund von Nachlässigkeiten der Versuchsleiter und mangelnden Kontrollmechanismen fehlen. Es wird daher angenommen, dass die Daten völlig zufällig fehlen (en. „missing completely at random“; MCAR), was durch die Permutation und die zufällige Terminzuteilung der VP unterstützt wird. Bei MCAR können die meisten „einfachen“ Techniken zum Umgang mit fehlenden Daten angewendet werden [106, S. 1088]. Um die fehlenden Daten zu substituieren wird die Imputations-Methode „two-way imputation“ (TW) [107, S. 26] angewendet. Bei der von BERNAARDS & SIJTSMA [108, S. 331] zur Anwendung für Fragebögen vorgeschlagenen TW-Methode wird der fehlende Wert des Items j einer Person i mit einem entsprechend Gl. (5.1) kalkulierten Wert TW_{ij} ersetzt. In Gl. (5.1) beschreibt PM_i den Item-Mittelwert der Person i , basierend auf deren verfügbaren Item-Werten, IM_j den Mittelwert des Items j , basierend auf allen für das Item verfügbaren Werten und OM den Gesamtmittelwert aller in der Datenmatrix $N(\text{Personen}) \times J(\text{Items})$ verfügbaren Item-Werten [107, S. 26].

$$TW_{ij} = PM_i + IM_j - OM \quad (5.1)$$

TW ähnelt im Aufbau Modellen zur Varianzanalyse (ANOVA) und kalkuliert einen Wert durch Addition eines Reihen- und eines Spalten-Effekts, wovon der Gesamteffekt abgezogen wird [108, S. 333]. Durch die Verwendung von Mittelwerten, ergeben sich für die kalkulierten Daten oft Werte, die so nicht hätten beobachtet werden können [108, S. 333], z. B. Fließkommazahlen statt ganzzahligen Werten. Die Werte werden im Folgenden auf drei Nachkommastellen gerundet, da eine Rundung auf Ganzzahlen unerwünschte Fehler verursachen würde [108, S. 334]. Wird TW für einen Test angewendet, der mehrere Subskalen enthält, wird die Methode für die entsprechende Subskala angewendet [107, S. 27]. Entsprechend Gl. (5.1) wird die TW-Methode für die folgenden fehlenden Daten verwendet:

- VP 2: Technikbereitschaft, 5. Item (TB_5)
- VP 10: Akzeptanz, 3. Item, Displayvariante B (B_Akz[3])

Um in den ordinalskalierten Daten Unterschiede zwischen den Displayvarianten aufzudecken, wird der Friedman-Test (z. B. [109, S. 369ff]), eine nichtparametrische Alternative zur ANOVA mit Messwiederholung, verwendet. Anschließend werden Post-hoc-Tests nach CONOVER [109, S. 371 – 373], [110] genutzt, um paarweise Unterschiede aufzudecken. Das Signifikanzniveau wird auf $\alpha = 0.05$ festgelegt. Zur Vermeidung einer Alpha-Fehler-Kumulation werden die p-Werte bei den multiplen Tests nach der Methode von HOLM [111] adjustiert. Für die paarweisen Vergleiche werden Effektstärken in Form von Spearman's Rangkorrelationskoeffizient (*rho*) berechnet. Dieser gehört nach ELLIS [112, S. 7] zur *r*-Familie der Effektstärken und kann daher mit jeder Effektgröße in Form von *r* verglichen werden. Es werden die Konventionen von COHEN [113, S. 155 – 159] zur Einordnung der Effektgrößen in die Klassen klein ($r > 0,10$), mittel ($r > 0,30$) und groß ($r > 0,50$) genutzt.

Die inferenzstatistischen Tests und die weiteren Datenanalysen werden mit der Statistiksoftware JASP (Version 0.9) sowie mit Microsoft Excel (Version 16.15) auf einem Apple MacBook Air (13 Zoll, Mitte 2012) mit MacOS High Sierra (Version 10.13.4) durchgeführt.

5.1.1 Demographie

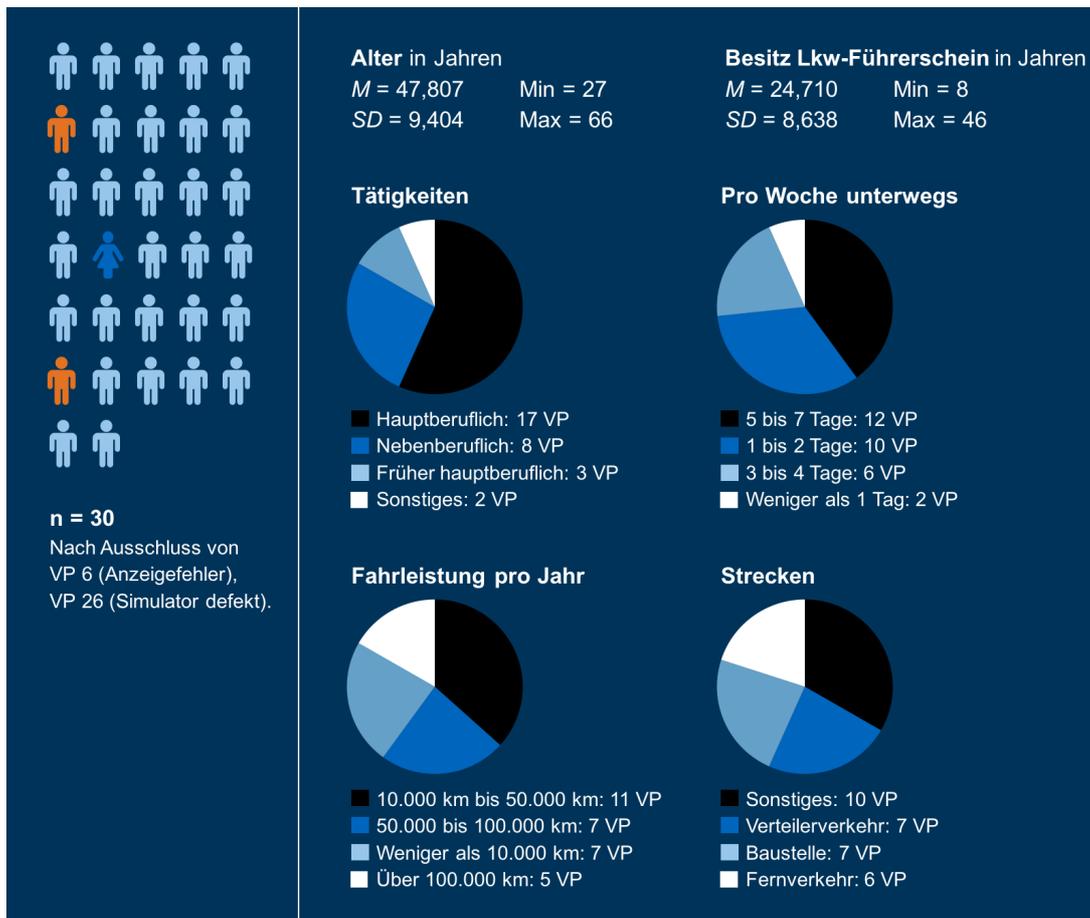


Abbildung 5.1: Stichprobenszusammensetzung (n = 30).

Die Stichprobe der verwendeten Datensätze besteht aus 30 Lkw-Fahrern mit einem Durchschnittsalter von $M = 47,807$ Jahren ($SD = 9,404$) und einer durchschnittlichen Besitzdauer der Lkw-Fahrerlaubnis von $M = 24,710$ Jahren ($SD = 8,638$). Bei den Fahrern handelt es sich größtenteils (17 VP) um hauptberufliche Berufskraftfahrer. 12 VP sind pro Woche zwischen 5 und 7 Tagen mit dem Lkw unterwegs. Die Mehrheit (11 VP) legt mit dem Lkw zwischen 10.000 km und 50.000 km pro Jahr zurück. Jeweils 7 VP 50.000 – 70.000 km und weniger als 10.000 km pro Jahr. 5 VP fahren über 100.000 km pro Jahr. Weitere Details zur Stichprobe können Abbildung 5.1 entnommen werden.

Die Befragung zur Technikbereitschaft nach NEYER ET AL. [99] weist mit einem Mittelwert von $M = 4,190$ ($SD = 0,417$; 1 = gering, 5 = hoch) auf eine Stichprobe mit hoher Technikaffinität hin. Die Boxplots in Abbildung 5.2 zeigen die Verteilung der Ergebnisse zur Technikbereitschaft und deren drei Subskalen Technikakzeptanz, Technikkompetenzüberzeugungen und Technikkontrollüberzeugungen.

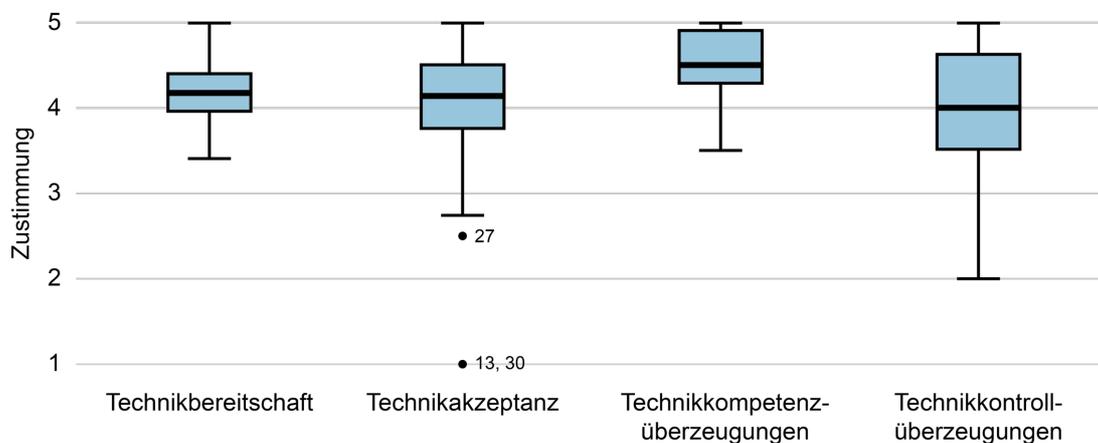


Abbildung 5.2: Ergebnisse (1 = gering, 5 = hoch) der Befragung zur Technikbereitschaft und deren drei Subskalen Technikakzeptanz, Technikkompetenzüberzeugungen und Technikkontrollüberzeugungen; $n = 30$.

5.1.2 Kontrollierbarkeit

Die grafische Darstellung der Ergebnisse (Abbildung 5.3) zeigt, dass die Kritikalität über die Varianten hinweg gering ausfällt. In Übernahme-situationen mit Früh- und Akutwarnung (S3 + S6) sowie in Situationen nur mit Akutwarnung (S4 + S5) fällt die Kritikalität bei Displayvariante A tendenziell höher also negativer aus, als bei anderen Varianten. Variante C wird in Situationen mit Früh- und Akutwarnung besser als Variante B bewertet. Die Boxplots (Abbildung 5.3) zeigen, dass Übernahme-situationen mit Frühwarnung über die Displayvarianten hinweg mit einer geringeren Kritikalität bewertet werden, als Übernahmen ohne eine solche.

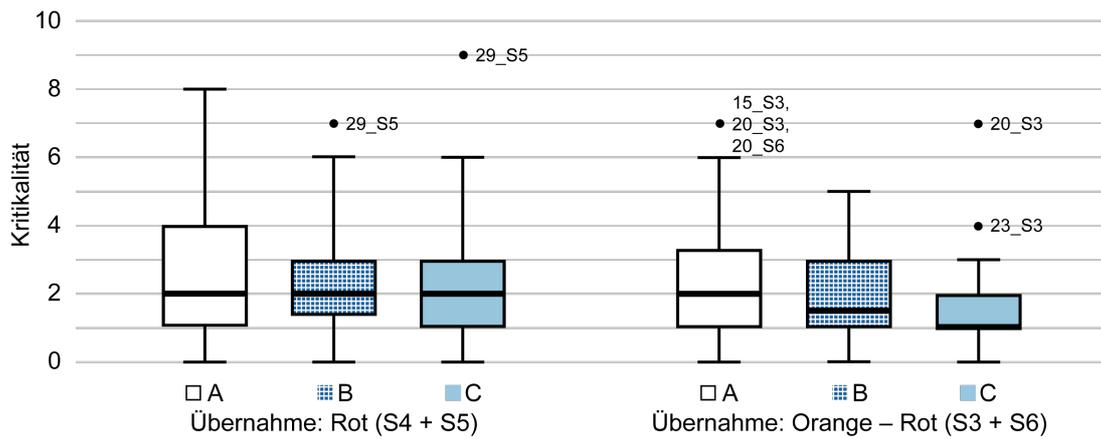


Abbildung 5.3: Bewertung der Kritikalität (0 = nichts bemerkt, 10 = nicht kontrollierbar) in Übernahme-situationen je nach Displayvariante. Die Situationen S4 und S5 sind als „Übernahme: Rot“ und die Situationen S3 + S6 als „Übernahme: Orange – Rot“ zusammengefasst; $n = 30$.

In Situationen ohne nötige Übernahme (S1, S2) werden die mit Displayvariante B erlebten Situationen eher mit einer geringeren Kritikalität und damit positiver bewertet, als Variante A und C (Abbildung 5.4). Global über alle sechs Fahrsituationen werden Variante B und C mit einer geringeren Kritikalität bewertet (Abbildung 5.4).

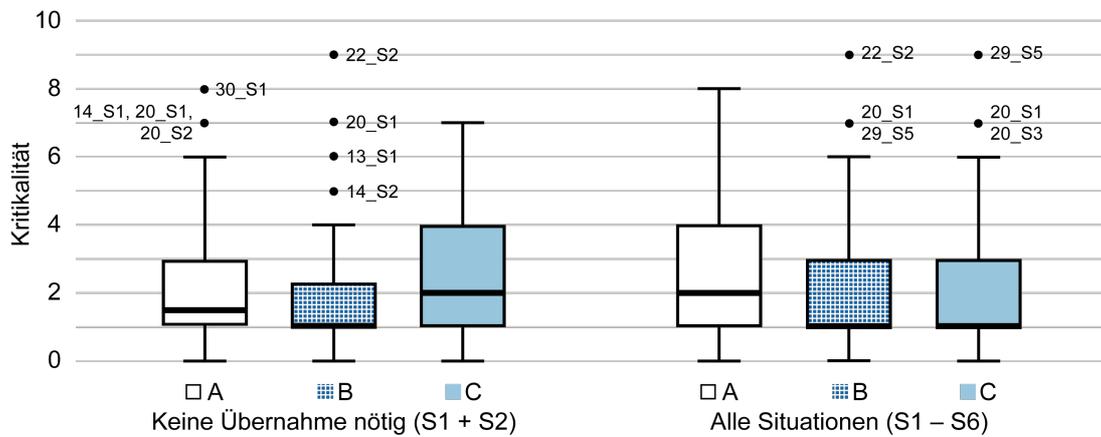


Abbildung 5.4: Bewertung der Kritikalität (0 = nichts bemerkt, 10 = nicht kontrollierbar) in Situationen ohne nötige Übernahme (S1 + S2) und global über alle sechs Situationen (S1 – S6) je nach Displayvariante; $n = 30$.

Inferenzstatistische Tests (Friedman-Test; Tabelle 5.1) zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Displayvarianten in Bezug auf die Bewertung der Kritikalität in Übernahme-situationen mit Früh- und Akutwarnung (Friedman-Test: $\chi^2(2) = 22,25, p < ,001; n = 30$) sowie global über alle sechs Situationen (Friedman-Test: $\chi^2(2) = 10,21, p = ,006; n = 30$).

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Friedman-Tests zur Kontrollierbarkeit der Situationen; $n = 30$.
* signifikant ($p \leq ,05$).

Situationen	χ^2	df	p	Kendall's W
Übernahme: Rot (S4 + S5)	0,642	2	,725	0,641
Übernahme: Orange – Rot (S3 + S6)	22,25	2	< ,001*	0,687
Keine Übernahme nötig (S1 + S2)	1,536	2	,464	0,558
Alle Situationen (S1 – S6)	10,21	2	,006*	0,625

Post-hoc-Vergleiche nach CONOVER [109, S. 371 – 373] (Tabelle 5.2) weisen bei Übernahme-situationen mit Früh- und Akutwarnung auf signifikante Unterschiede zwischen allen drei Displayvarianten hin. Es gibt große Effekte zwischen den Varianten A und B (Spearman's $\rho = 0,594$) sowie zwischen A und C (Spearman's $\rho = 0,527$) und einen mittleren Effekt zwischen den Varianten B und C (Spearman's $\rho = 0,468$).

Bezüglich aller Situationen wird in den Post-hoc-Tests das Signifikanzniveau nur zwischen den Varianten A und C ($p_{Holm} = ,005$) erreicht, wobei ein mittlerer Effekt besteht (Spearman's $\rho = 0,438$).

Tabelle 5.2: Post-hoc-Vergleiche der Displayvarianten nach CONOVER [109, S. 371 – 373] sowie Spearman's Rangkorrelationskoeffizient zur Kontrollierbarkeit der Situationen Übernahme: Orange – Rot (S3 + S6) und alle Situationen; $n = 30$.
* signifikant ($p_{holm} \leq ,05$).

Varianten	Skala	Conover T-Stat	df	p	p_{holm}	Spearman ρ	
A	B	Übernahme: Orange – Rot (S3 + S6)	2,788	118	,006	,012*	0,594
		Alle Situationen	2,218	358	,027	,054	0,474
A	C	Übernahme: Orange – Rot (S3 + S6)	5,177	118	< ,001	< ,001*	0,527
		Alle Situationen	3,145	358	,002	,005*	0,438
B	C	Übernahme: Orange – Rot (S3 + S6)	2,389	118	,018	,018*	0,468
		Alle Situationen	0,927	358	,355	,355	0,400

5.1.3 Beanspruchung

Zur Auswertung der Beanspruchung werden Mittelwerte und Standardabweichungen der Subskalen des DALI zu jeder Displayvariante berichtet (Abbildung 5.5) [114]. Die Mittelwerte aller 7 Faktoren beschreiben über die Varianten hinweg tendenziell geringe bis mittlere Anforderungen, teilweise mit großer Streuung. In sechs der sieben Faktoren lassen sich bei Variante A leicht höhere Beanspruchungen als bei Variante B und C erkennen (Abbildung 5.5). Variante B

zeigt bezüglich der Beeinträchtigung durch die Nebenaufgabe den höchsten Wert. Variante C verursacht tendenziell weniger Stress als die anderen Varianten.

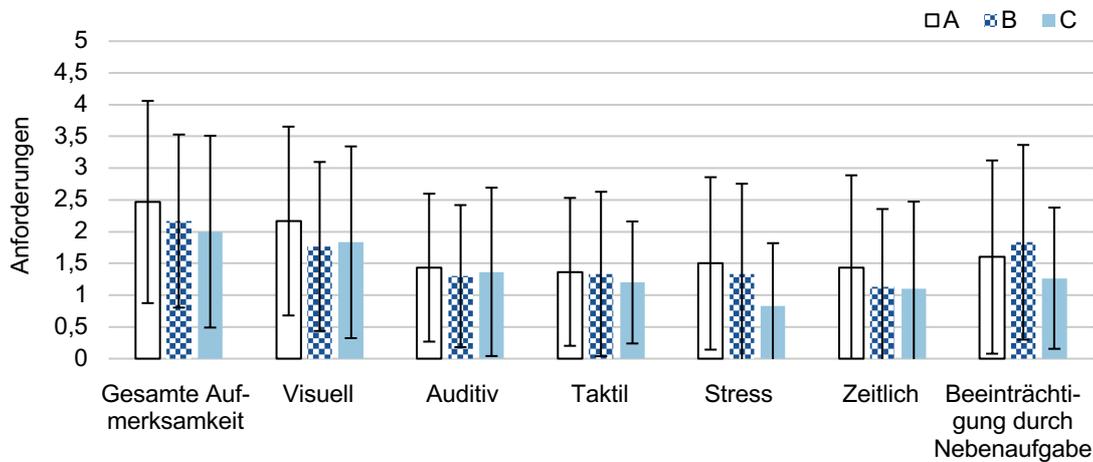


Abbildung 5.5: Mittelwerte und Standardabweichungen der 7 Faktoren des DALI (0 = geringe Anforderungen, 5 = hohe Anforderungen) zu den drei Displayvarianten A, B und C; $n = 30$.

Berechnete inferenzstatistische Werte (Tabelle 5.3) zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Displayvarianten in Bezug auf das während der Fahrt empfundene Stressniveau (Friedman-Test: $\chi^2(2) = 7,387, p = ,025; n = 30$) und der Beeinträchtigung durch die Nebenaufgabe (Friedman-Test: $\chi^2(2) = 8,269, p = ,016; n = 30$).

Tabelle 5.3: Ergebnisse des Friedman-Tests zu den Subskalen des DALI; $n = 30$.
* signifikant ($p \leq ,05$).

Skala	χ^2	df	p	Kendall's W
Gesamte Aufmerksamkeitsanforderungen	5,062	2	,081	0,784
Visuelle Anforderungen	4,030	2	,133	0,781
Auditive Anforderungen	1,077	2	,584	0,836
Taktile Anforderungen	0,125	2	,939	0,828
Stress	7,387	2	,025*	0,683
Zeitliche Anforderungen	3,000	2	,223	0,778
Beeinträchtigung durch Nebenaufgabe	8,269	2	,016*	0,794

Post-Hoc-Vergleiche nach CONOVER [109, S. 371 – 373] (Tabelle 5.4) offenbaren bezüglich des empfundenen Stressniveaus einen signifikanten Unterschied zwischen Variante A und C mit einem nach COHEN [113, S. 155 – 159] mittleren Effekt (Spearman's $\rho = 0,493$). Hinsichtlich der Beeinträchtigung durch die Nebenaufgabe zeigen sich signifikante Unterschiede und große Effekte zwischen den Varianten A und B ($p_{Holm} = ,041, \text{Spearman's } \rho = 0,779$) sowie zwischen B und C ($p_{Holm} = ,019, \text{Spearman's } \rho = 0,607$).

Tabelle 5.4: Post-hoc-Vergleiche der Displayvarianten nach CONOVER [109, S. 371 – 373] sowie Spearman's Rangkorrelationskoeffizient ρ zu den Subskalen Stress und Beeinträchtigung durch die Nebenaufgabe des DALI-Fragebogens; $n = 30$.
* signifikant ($p_{Holm} \leq ,05$).

Varianten	Skala	Conover T-Stat	df	p	p_{Holm}	Spearman rho
A B	Stress	0,660	58	,512	,512	0,533
	Beeinträchtigung durch Nebenaufgabe	2,378	58	,021	,041*	0,779
A C	Stress	2,734	58	,008	,025*	0,493
	Beeinträchtigung durch die Nebenaufgabe	0,457	58	,649	,649	0,687
B C	Stress	2,074	58	,042	,127	0,547
	Beeinträchtigung durch die Nebenaufgabe	2,836	58	,006	,019*	0,607

5.1.4 Akzeptanz

Die Überprüfung der Reliabilität der beiden Akzeptanz-Subskalen Nützlichkeit und Zufriedenheit erzielen ein Cronbach's $\alpha_{Nützlichkeit} = 0,861$ bzw. $\alpha_{Zufriedenheit} = 0,929$, womit die Anforderung von VAN DER LAAN [33] an eine hohe Reliabilität ($\alpha > 0,65$) erfüllt ist.

In der grafischen Darstellung der Ergebnissen zur Nützlichkeit und Zufriedenheit (Abbildung 5.6) lässt sich erkennen, dass alle drei Varianten überwiegend positiv bewertet werden und die Displayvarianten B und C tendenziell besser bewertet werden als Variante A. Im Bezug auf die Nützlichkeit ist Variante B leicht besser bewertet als Variante C.

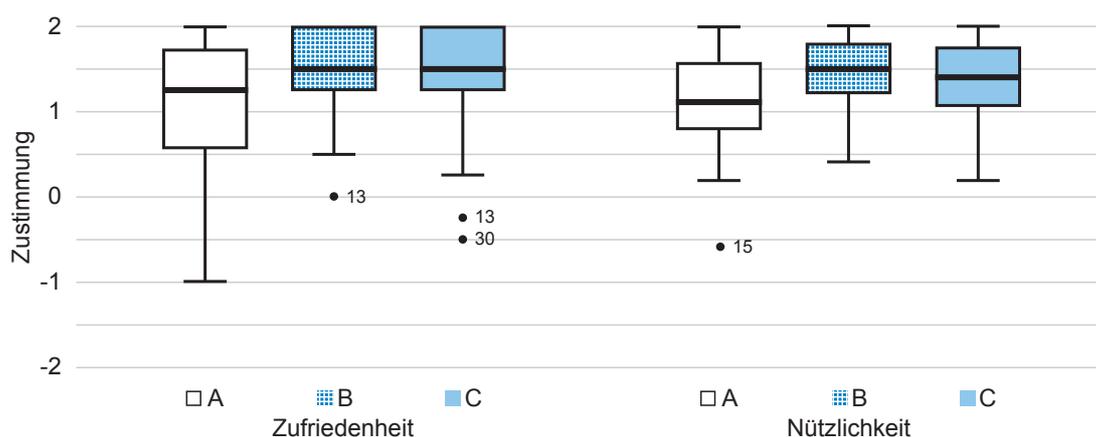


Abbildung 5.6: Boxplots der Ergebnisse zu den Skalen Zufriedenheit und Nützlichkeit des Akzeptanz-Fragebogens von VAN DER LAAN ET AL. [33] (-2 = negative Bewertung; 2 = positive Bewertung); $n = 30$.

Es zeigen sich zwischen den Displayvarianten signifikante Unterschiede hinsichtlich der Nützlichkeit (Friedman-Test: $\chi^2(2) = 17,96$, $p < ,001$; $n = 30$) und der Zufriedenheit (Friedman-Test: $\chi^2(2) = 8,062$, $p = ,018$; $n = 30$) (Tabelle 5.5).

Tabelle 5.5: Ergebnisse des Friedman-Tests zu den Skalen Nützlichkeit und Zufriedenheit des Akzeptanz-Fragebogens von Van der Laan [33]; $n = 30$.
* signifikant ($p \leq ,05$).

Skala	χ^2	df	p	Kendall's W
Nützlichkeit	17,96	2	< ,001*	0,862
Zufriedenheit	8,062	2	,018*	0,812

Post-Hoc-Vergleiche nach CONOVER [109, S. 371 – 373] (Tabelle 5.6) zeigen in Bezug auf die Nützlichkeit signifikante Unterschiede zwischen allen drei Displayvarianten ($p_{Holm} \leq ,05$) mit jeweils einem nach den Konventionen von COHEN [113, S. 155 – 159] großen Effekt (Spearman's $\rho > 0,50$). Bei der Zufriedenheit zeigen sich zwischen den Displayvarianten A und B sowie zwischen A und C signifikante Unterschiede mit großen Effekten (Spearman's $\rho > 0,50$) (Tabelle 5.6).

Tabelle 5.6: Post-hoc-Vergleiche der Displayvarianten nach CONOVER [109, S. 371 – 373] sowie Spearman's Rangkorrelationskoeffizient (ρ) zu den Skalen Nützlichkeit und Zufriedenheit des Akzeptanz-Fragebogens von VAN DER LAAN [33]; $n = 30$.
* signifikant ($p_{Holm} \leq ,05$).

Varianten	Skala	Conover T-Stat	df	p	p_{Holm}	Spearman ρ
A B	Nützlichkeit	4,968	58	< ,001	< ,001*	0,742
	Zufriedenheit	2,809	58	,007	,020*	0,579
A C	Nützlichkeit	2,227	58	,030	,030*	0,769
	Zufriedenheit	2,298	58	,025	,050*	0,800
B C	Nützlichkeit	2,741	58	,008	,016*	0,868
	Zufriedenheit	0,511	58	,611	,611	0,776

5.1.5 User Experience

Nach den Autoren des UEQ [95], [105] können die Skalenmittelwerte zum Vergleich mehrerer Produkte genutzt werden [105, S. 3]. In Abbildung 5.7 werden daher die Mittelwerte und Standardabweichungen der drei Displayvarianten in den sechs Skalen des UEQs dargestellt. Alle Varianten erzielen auf allen Skalen einen Mittelwert $M > 0,8$, womit die Gesamtbewertung als positiv beurteilt werden kann [105, S. 5]. Abbildung 5.7 zeigt, dass die Displayvarianten B und C in allen Skalen tendenziell besser bewertet werden als Variante A, was insbesondere bei der Steuerbarkeit deutlich wird ($M_{Steuerbarkeit_A} = 1,275$, $SD_{Steuerbarkeit_A} = 1,225$; $M_{Steuerbarkeit_B} = 2,067$, $SD_{Steuerbarkeit_B} = 0,540$; $M_{Steuerbarkeit_C} = 2,000$, $SD_{Steuerbarkeit_C} = 0,926$).

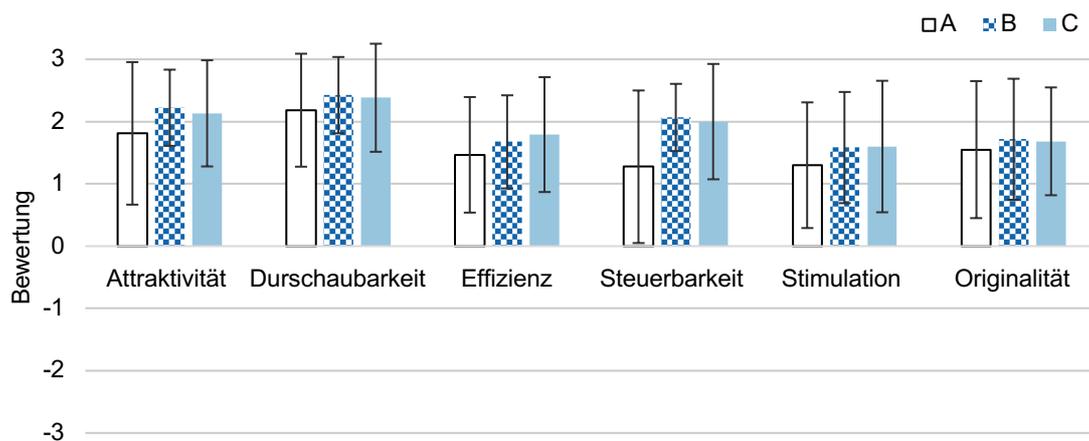


Abbildung 5.7: Mittelwerte und Standardabweichungen der sechs Skalen des UEQ (-3 = negative Bewertung, 3 = positive Bewertung) zu den drei Displayvarianten A (keine Angabe), B (Zeitangabe) und C (Entfernungsangabe); $n = 30$.

Inferenzstatistische Tests (Friedman-Tests; Tabelle 5.7) zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Displayvarianten in den Skalen Effizienz (Friedman-Test: $\chi^2(2) = 8,467, p = ,015; n = 30$) und Steuerbarkeit (Friedman-Test: $\chi^2(2) = 21,90, p < ,001; n = 30$).

Tabelle 5.7: Ergebnisse des Friedman-Tests zu den Subskalen des UEQ; $n = 30$.
* signifikant ($p < ,05$).

Skala	χ^2	df	p	Kendall's W
Attraktivität	5,663	2	,059	0,795
Durchschaubarkeit	3,982	2	,140	0,731
Effizienz	8,467	2	,015*	0,809
Steuerbarkeit	21,90	2	< ,001*	0,779
Stimulation	5,538	2	,063	0,848
Originalität	1,011	2	,603	0,761

Post-Hoc-Vergleiche nach CONOVER [109, S. 371 – 373] (Tabelle 5.8) zeigen bezüglich der Effizienz einen signifikanten Unterschied und einen großen Effekt zwischen den Varianten A und C ($p_{Holm} = ,009$, Spearman's $\rho = 0,720$) sowie hinsichtlich der Steuerbarkeit signifikante Unterschiede und große Effekte zwischen den Varianten A und B ($p_{Holm} < ,001$, Spearman's $\rho = 0,667$) und A und C ($p_{Holm} < ,001$, Spearman's $\rho = 0,578$).

Tabelle 5.8: Post-hoc-Vergleiche der Displayvarianten nach CONOVER [109, S. 371 – 373] sowie Spearman's Rangkorrelationskoeffizient zu den Subskalen Effizienz und Steuerbarkeit des UEQ; $n = 30$.
* signifikant ($p_{Holm} \leq ,05$).

Varianten	Skala	Conover T-Stat	df	p	p_{Holm}	Spearman rho
A B	Effizienz	1,661	58	,102	,204	0,675
	Steuerbarkeit	4,910	58	< ,001	< ,001*	0,667
A C	Effizienz	3,084	58	,003	,009*	0,720
	Steuerbarkeit	5,086	58	< ,001	< ,001*	0,578
B C	Effizienz	1,423	58	,160	,204	0,747
	Steuerbarkeit	0,175	58	,861	,861	0,762

5.1.6 Informationsgehalt und Wohlbefinden

Mehr als zwei Drittel (22 VP) geben an, dass Displayvariante A zu wenige Informationen bereitstellt, wohingegen dies bei Variante B nur 13 und bei Variante C nur 9 VP tun (Abbildung 5.8). Überflüssige Informationen sehen bei Variante A und C jeweils 5 VP und bei Variante B 3 VP.

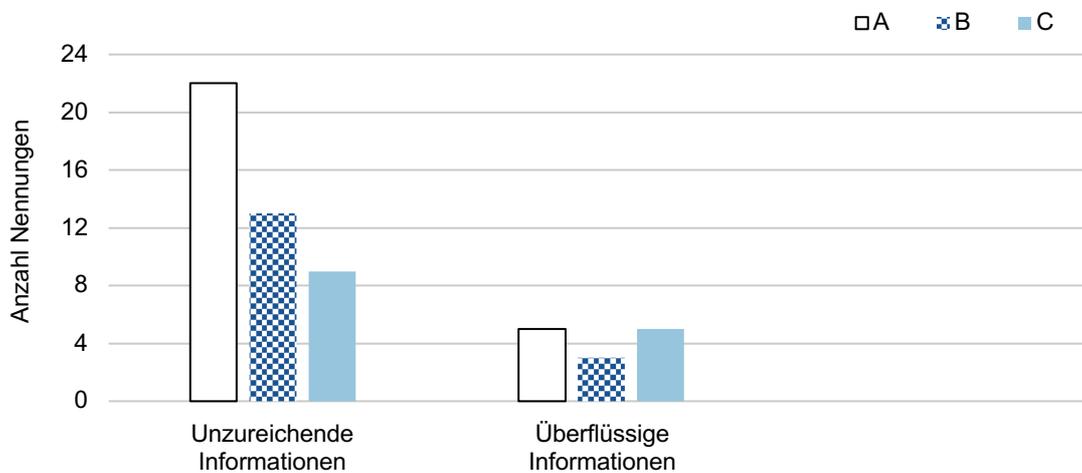


Abbildung 5.8: Anzahl der Nennungen zum Informationsgehalt nach der Fahrt mit der jeweiligen Displayvariante A, B, oder C; $n = 30$.

Tabelle 5.9 gibt einen Überblick zu den genannten fehlenden und überflüssigen Informationen entsprechend der Zugehörigkeit zu einem Element, Gerät oder einer Displayvariante.

Tabelle 5.9: Zusammenfassung der Angaben aus den Zwischenbefragungen zur Frage nach unzureichenden und überflüssigen Informationen; $n = 30$.

Element / Gerät / Variante	Unzureichende Informationen	Überflüssige Informationen
Spezifisch Variante A	Bei „Jetzt übernehmen!“-Situation zu wenig Information (VP 9, 13, 14) Zeitpunkt / Entfernung der nächsten Übernahme wird von 5 VP vermisst (VP 12, 15, 17, 24, 27)	–
Übernahme	Übernahmegrund wird von 9 VP (VP 2, 5, 6, 7, 18, 22, 27, 29, 31) vermisst.	–
Überholen	Akustische Information zu Überholvorgang (VP 7) Informationen zum Manöver auf Tablet (VP 14)	Fortschrittsanzeige des Überholvorgangs (VP 13; siehe auch Tablet)
Folgefahrt	Informationen wie Geschwindigkeit, Abstand etc. zu vorausfahrendem Fahrzeug (VP 7, 14, 20, 23)	–
Kombidisplay	Manöveranzeige im Kombidisplay (VP 7) Blinkeranzeige (VP 13)	–
Tablet	VP 7 wünscht mehr Verkehrsinformationen auf dem Tablet Informationen / Daten zum Fahrzeug (VP 27)	Blinker (VP 13) Fortschrittsanzeige des Überholvorgangs (VP 13)
LED-Leiste	–	Zu groß (VP 13, 14, 27) Spiegelt, z. B. in Seitenscheibe (VP 14)
HUD	Permanent anzeigen (VP 20)	Hat allgemein „genervt“ (VP 14) „Rote Umrandungen“ sind überflüssig (VP 20) <i>// Anmerkung: VP 20 hat die Bedeutung zum Fragezeitpunkt nicht verstanden.</i>
Sounds	–	Ansage „Bitte bereiten Sie sich auf die Übernahme vor“ zur langatmig (VP 5) Signalton für „HAF verfügbar“ zu salient, sollte dezenter sein (VP 15)

5 Ergebnisse

Element / Gerät / Variante	Unzureichende Informationen	Überflüssige Informationen
Navigationskarte	Legende mit Erklärung der Farbbedeutungen (VP 7) Detailliertere Informationen auf Karte (VP 27)	–
Autobahnausfahrt	VP 9 hätte sich die Information / Aufforderung zum Abfahren früher gewünscht	–
Sonstiges	Warnungen bei Fehlverhalten anderer Verkehrsteilnehmer (VP 8, 23) Anzeige der Verkehrssituation, z. B. erkannte Verkehrszeichen (VP 27) VP 17 wünscht sich eine Anzeige bzw. Warnung potentiell gefährlicher Straßensituationen, z. B. Kurvensituation (enge Kurve) in Baustelle.	–

Die VP fühlen sich über die Displayvarianten hinweg wohl während der automatisierten Fahrt (Abbildung 5.9). Hinsichtlich des Wohlbefindens bei auftretenden Übernahmen schneiden Varianten B und C tendenziell besser ab, als Variante A (Abbildung 5.9). VP 14 merkt an, dass sie sich bei einer angekündigten Übernahme mit Frühwarnung wohlgeföhlt hat, bei einer unmittelbar bevorstehenden Übernahme aber nicht. VP 23 merkt an, dass sie sich aufgrund des Lenkverhaltens des Simulators nicht wohlgeföhlt hat. Auch VP 20 beschreibt ein „schwammiges Fahrverhalten“.

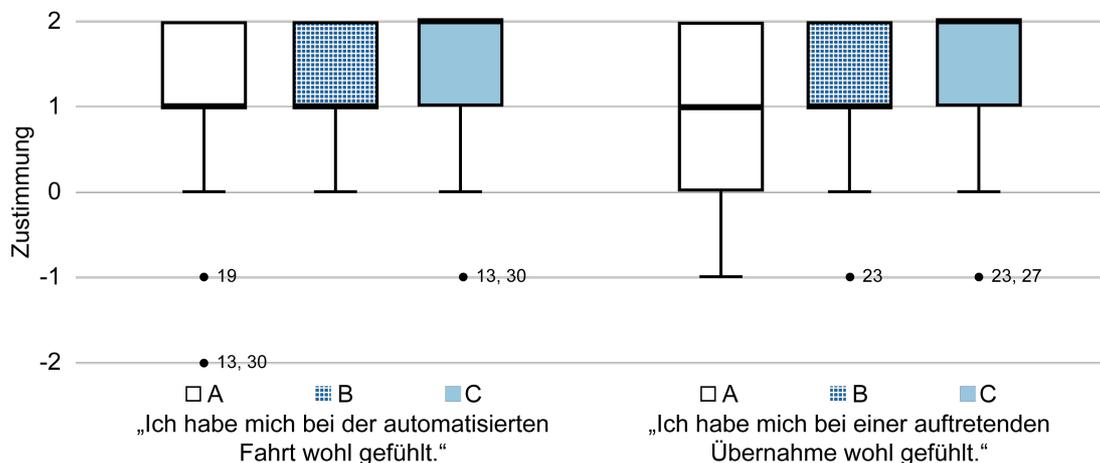


Abbildung 5.9: Ergebnisse (-2 = Stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) zur Bewertung des Wohlbefindens während der automatisierten Fahrt und bei einer auftretenden Übernahme mit der jeweiligen Displayvariante A, B oder C; $n = 30$.

Je zwei VP finden die Frühwarnungen zu bevorstehenden Übernahmen gut (VP 7, 18) bzw. angenehm (VP 10, 17). Neun VP (VP 5, 13, 14, 19, 23, 27, 29, 31, 32) finden die Übernahmezeit bei einer Akutwarnung zu kurz oder möchten früher informiert werden. Weitere Anmerkungen und Kommentare können Anhang B entnommen werden.

5.1.7 Übernahmequalität, Probleme und Auffälligkeiten

Für die Bewertung der Übernahmequalität wird die erfolgreiche Übernahme des Fahrers betrachtet. Dazu wird auf Grundlage der Versuchsprotokolle und Videoaufnahmen berichtet, wann es zu Problemen, Fehlern oder Unfällen bei Übernahmesituationen kommt (Tabelle 5.10).

In 6,94 % (25 von 360) der in den verwendeten Datensätzen aufgetretenen Übernahmesituationen kommt es unabhängig von der Displayvariante vor, während und/oder nach der Situation zu Spurabweichungen, Fahrfehlern oder Unfällen (Tabelle 5.10). Mehr als die Hälfte davon (13 von 25) treten in Situation S3 (Baustelle) auf. Neben dem Übernahmeprozess an sich, kann dies möglicherweise auch an der Schwierigkeit der Situation selbst durch eine kurvige Ein- und Ausfahrt in Zusammenhang mit einer unterschätzten Geschwindigkeit und der ungewohnten, schwammigen Fahrdynamik des Simulators liegen.

Da Kollisionen des Egofahrzeugs mit dem Umgebungsverkehr oder der Infrastruktur in der Fahrsimulation abgesehen von den Reaktionen der VP keine weiteren Auswirkungen auf das Fahrgeschehen haben wird nach den meisten auftretenden Unfällen oder Kollisionen die Fahrt ununterbrochen fortgesetzt.

Bei Betrachtung der anhand der Skala von NEUKUM ET AL. [100, S. 144] bewerteten Kritikalität zeigt sich, dass die Situationen subjektiv stark unterschiedlich bewertet werden (Tabelle 5.10). In mehreren Fällen wird die Kritikalität trotz objektiv beobachtbaren Schwierigkeiten, von den VP subjektiv gering eingestuft.

Tabelle 5.10: Übersicht zu aufgetretenen Problemen, Fahrfehlern und Unfällen bei oder nach Übernahmesituationen (S3, S4, S5, S6).

VP	Fahrt	Display- variante	Situation	Bewertete Kritikalität	Beschreibung
4	F1	C	S5	1	Kommt nach Übernahme leicht von Spur ab.
5	F2	A	S3	3	Fährt nach Übernahme beinahe in Leitplanke.
7	F1	A	S5	8	Hat bei Übernahme Tablet in der Hand. Lkw kommt ins Schlingern und fährt rechts auf den Seitenstreifen.
11	F1	C	S4	3	Fahrzeug kommt nach manueller Übernahme in roter Phase ins Schlingern und von Spur ab.
			S3	3	Übernahme in oranger Phase ca. 900 m vor Situation. Fahrzeug kommt in Baustelle leicht von Spur ab.
			F2	B	S3
14	F1	A	S6	3	Übernahme ca. 50 s vor Ende der Automation in oranger Phase. Fährt mit ca. 80 km/h auf den Verzögerungsstreifen, bremst stark ab und kommt von Spur ab.
			S4	4	Kommt nach Übernahme ca. 5 s vor Ende der Automation ins Schlingern und leicht von Spur ab.

5 Ergebnisse

VP	Fahrt	Display-variante	Situation	Bewertete Kritikalität	Beschreibung
17	F1	B	S3	1	Legt Tablet in früher oranger Phase weg, aber deaktiviert den HAF-Modus erst kurz vor der Situation. Fährt mit ca. 80 km/h in die Baustelle. Das Fahrzeug reißt in der Baustelleneinfahrt aus und es kommt zu einem Unfall. Die Fahrt muss neugestartet werden, da sich die Simulation beim Unfall aufhängt.
19	F1	B	S3	4	Deaktiviert den HAF-Modus etwa 50 s vor der Situation. Fährt mit ca. 70 km/h in Baustelleneinfahrt und kollidiert mit Umgebungsverkehr.
20	F1	B	S3	5	Legt Tablet frühzeitig in oranger Phase weg. Übernimmt ca. 20 s vor Situation. Kommt in Baustelle leicht von Spur ab.
	F3	C	S3	7	Übernahme ca. 7 s vor Situation. Kommt aufgrund hoher Geschwindigkeit in Baustelle von Spur ab.
28	F1	A	S6	1	Übernimmt ca. 8 s vor Ende der Automation. Durchfährt Kurve der Ausfahrt mit 70 km/h, kommt von Spur ab und übersteuert leicht.
	F2	B	S3	1	Legt Tablet ca. 50 s vor Ende der Automation weg und überwacht. Übernimmt ca. 7 s vor Ende der Automation. Kommt in Baustelle leicht von Spur ab.
			S4	1	Übernimmt ca. 5 s vor Ende der Automation. Kollidiert mit Leitpfosten.
			S6	0	Legt Tablet ca. 15 s nach akustischer Frühwarnung weg. Übernimmt ca. 6 s vor dem Ende der Automation. Bei Lenkung auf Verzögerungstreifen kommt das Fahrzeug von der Spur ab und übersteuert. VP bekommt das Fahrzeug durch starkes Abbremsen wieder unter Kontrolle.
30	F2	C	S3	3	Kommt von Fahrbahn ab.
31	F1	A	S4	6	Legt Tablet direkt bei Beginn der Akutwarnung weg und übernimmt ca. 5 s vor Ende der Automation. Kommt in der Situation leicht ins Schlingern.
32	F1	B	S3	5	Legt Tablet gleich nach der akustischen Frühwarnung weg. Übernimmt ca. 50 s vor dem Ende der Automation. Fährt mit > 75 km/h in Situation, kommt von Spurt ab und streift die Leitplanke.
	F3	A	S3	3	Legt Tablet in Frühwarn-Phase weg und übernimmt. Fährt mit ca. 75 km/h in Baustelle, kommt stark von Spur ab und kollidiert mit Leitplanke.

5.1.8 Systemverständnis, Komponenten und Informationseinheiten

Die VP sind in der Abschlussbefragung aufgefordert die Komponenten und damit angezeigte Informationseinheiten in eigenen Worten zu beschreiben. Die Antworten werden von den Versuchsleitern bereits während des Versuchs sowie im Nachgang in der Auswertung hinsichtlich ihrer Übereinstimmung mit der korrekten Beschreibung mit korrekt (✓), teilweise korrekt (⊙) oder falsch (✗) bewertet. Im Folgenden wird ein Überblick zu den Ergebnissen zum Systemverständnis der Elemente des Kombidisplays (Tabelle 5.11), des Tablets (Tabelle 5.12), der LED-Leiste (Tabelle 5.13), des HUD (Tabelle 5.15), der Lenkradtasten (Tabelle 5.16) und der Sounds gegeben, wobei Abweichungen von der korrekten Beschreibung des Elements genauer berichtet werden. Die Komponenten der MMS und deren Informationsgehalt werden von den VP bewertet.

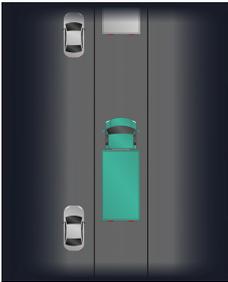
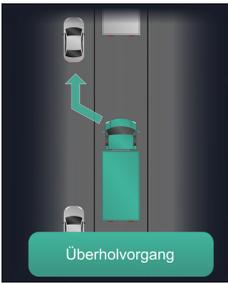
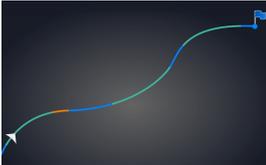
Es ist festzuhalten, dass Begrifflichkeiten wie autonom, vollautomatisiert, hochautomatisiert, teilautomatisiert oder automatisiert von vielen VP nicht eindeutig unterschieden werden und teilweise synonym verwendet werden. Die Farbe Türkis wird oft als Grün und Orange oftmals als Gelb beschrieben.

5.1.8.1 Kombidisplay

Verständnis

Tabelle 5.11: Ergebnisse zum Systemverständnis des Kombidisplays; $n = 30$.

Element	Beschreibung	Ergebnisse
 <p>Manuell</p>	Statusindikator: Manuelle Fahrt ohne Systeme	29 ✓ 1 ⊙ 0 ✗ ⊙: VP 9 erkennt Lenkrad und Fahrer im Symbol, geht aber nicht näher auf den Systemstatus ein.
 <p>Assist</p>	Statusindikator: Manuelle Fahrt mit Assistenzsystemen	24 ✓ 5 ⊙ 1 ✗ ⊙: VP 3 beschreibt, dass damit nur der Abstandsassistent gemeint ist; VP 5, 17, 20, 29 erklären, dass der Spurassistent aktiv ist. ✗: VP 23 gibt an, dass ihm die Informationseinheit nichts sagt, da sie die Einheit nicht beachtet hat. Sie interpretiert das Element als Information über seitliche und frontale Abstände.

Element	Beschreibung	Ergebnisse
	<p>Statusindikator: Hochautomatisierte Fahrt</p>	<p>27 ✓ 1 ⊕ 2 ✖</p> <p>⊕: VP 14 meint, das Fahrzeug fährt autonom und reagiert selbständig auf Umgebung und Umwelteinflüsse.</p> <p>✖: VP 19 verbindet mit dem Element eine automatische Aktivierung des Autopiloten, wenn dieser verfügbar ist; VP 24 versteht das Element als automatische Lenkung, da nur das Lenkrad-Symbol enthalten ist. Sie findet es verwirrend, dass ein extra „Assist“-Element angezeigt wird und meint, man könnte diese zusammenführen.</p>
	<p>Umgebungsverkehr bei hochautomatisierter Fahrt</p>	<p>27 ✓ 3 ⊕ 0 ✖</p> <p>⊕: VP 11 gibt an, dass auch der Abstand zum Vordermann angezeigt wird; VP 13 erkennt drei verfügbare Fahrbahnen; VP 28 beschreibt, dass das HAF-System aktiv ist, jedoch nichts Weiteres zum Umgebungsverkehr.</p> <p>Sonstiges: VP 27 fragt sich, ob Fußgänger und Radfahrer auch erfasst werden.</p>
	<p>Umgebungsverkehr mit Manöveranzei- ge (hoch- automatisierter Überholvorgang)</p>	<p>29 ✓ 1 ⊕ 0 ✖</p> <p>⊕: VP 2 interpretiert den angezeigten Pfeil als Blinker.</p> <p>Sonstiges: VP 2 und 30 weisen auf den geringen Fahrzeugabstand hin; VP 27 erwartet, dass sie den Überholvorgang bestätigen muss.</p>
	<p>Navigationskarte mit verfügbaren HAF-Strecken (türkis), manueller Fahrt (blau) und geplanter Über- nahmephase (orange)</p>	<p>25 ✓ 5 ⊕ 0 ✖</p> <p>⊕: VP 2 interpretiert blaue Abschnitte als Verfügbarkeit des Spurhalteassistenten; VP 14 interpretiert die farbigen Abschnitte als eventuelle Behinderungen auf der Strecke und nicht konkret als Übernahmephasen; VP 17 versteht blaue Abschnitte als einen Wechsel von manuell auf automatisch; VP 28 geht nur auf die Grund-Navigationsfunktionen ein, aber nicht auf die Informationen zum HAF-System; VP 32 interpretiert die Farben als Anzeige von unterschiedlichen Verkehrsbehinderungen.</p> <p>Sonstiges: VP 27 merkt an, dass die Anzeige zu wenige Informationen enthalte.</p>

Element	Beschreibung	Ergebnisse
	Aufforderung zu einer unmittelbar ($t \leq 10$ s) nötigen Übernahme bevor das System selbstständig abschaltet	28 ✓ 2 ⊕ 0 ✗ ⊕: VP 12 und 32 interpretieren das Element als Vorbereitung auf das manuelle Fahren bzw. als Ankündigung einer Übernahme. Sonstiges: VP 20 merkt an, dass auch wenn sich der Autopilot selbst abschaltet, das Fahrzeug zumindest eine Notbremsung einleiten sollte, falls der Fahrer z. B. eingeschlafen oder nicht fahrtüchtig ist; VP 3 und 32 gehen davon aus, dass sie den Autopiloten deaktivieren müssen

Bewertung der Anzeige

Die Boxplots (Abbildung 5.10) veranschaulichen eine überwiegend positive Bewertung der Anzeige im Kombiinstrument. Die Ergebnisse basieren auf den Antworten einer fünfstufigen Likert-Skala (-2 = Stimme gar nicht zu; -1 = Stimme eher nicht zu, 0 = teils/teils, 1 = Stimme eher zu, 2 = Stimme voll und ganz zu). Der Großteil der VP findet die Anzeige von aktuellem Automationsstatus, Umgebungsverkehr, Fahrmanövern und Navigation im Kombiinstrument sinnvoll (Abbildung 5.11).

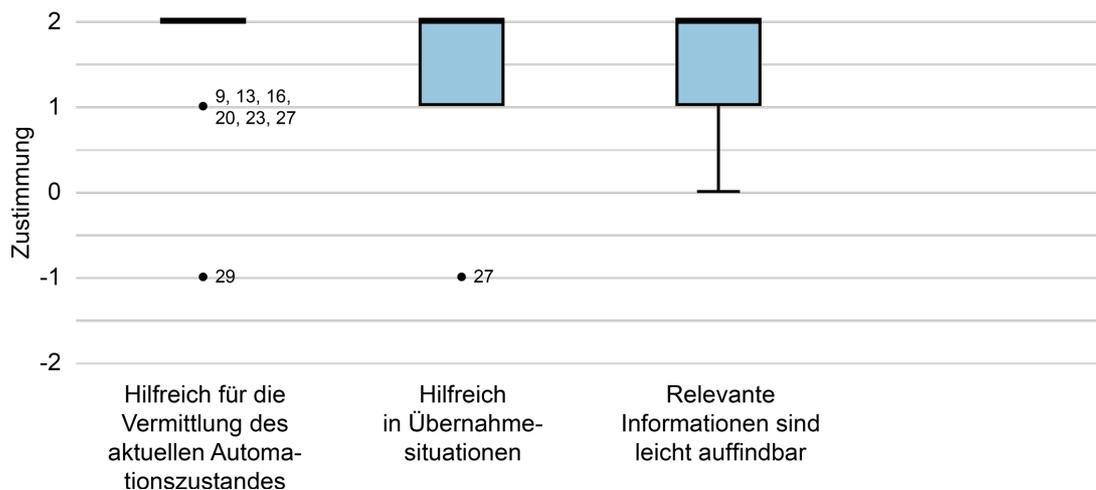


Abbildung 5.10: Bewertung (-2 = Stimme gar nicht zu; 2 = Stimme voll und ganz zu) des Kombiinstrumentes; $n = 30$.

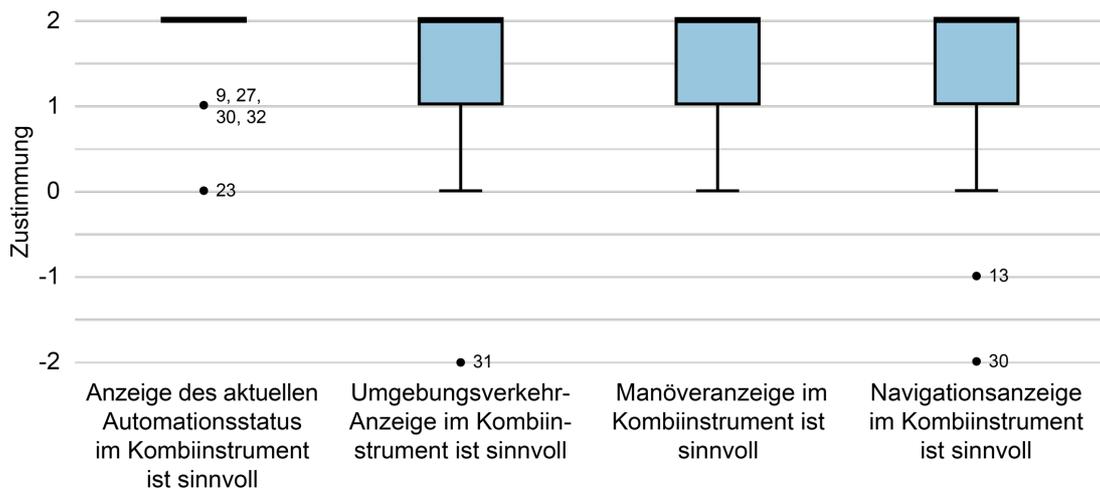


Abbildung 5.11: Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) der Informationseinheiten im Kombiinstrument; $n = 30$.

Informationen im Kombidisplay

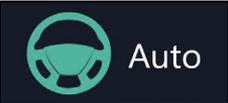
22 der 30 VP bewerten die Anzahl der im Kombidisplay angezeigten Informationen als genau richtig. Die anderen acht als zu wenig:

- Fünf VP (VP 1, 3, 14, 20 und 24) wünschen sich die Anzeige des Abstands zum Vorderfahrzeug. VP 20 wüsste auch gerne dessen Geschwindigkeit.
- VP 2 und 7 möchten mehr bzw. detailliertere Informationen zur Strecke und bekannten Verkehrsbehinderungen.
- VP 3 und 27 wünschen sich die Anzeige von erkannten Verkehrszeichen.
- VP 7 möchte eine Legende zu den in der Navigationskarte angezeigten Streckenabschnitten.

5.1.8.2 Tablet

Verständnis

Tabelle 5.12: Ergebnisse zum Systemverständnis des Tablets; $n = 30$.

Element	Beschreibung	Ergebnisse
	Statusindikator in Tablet Statusleiste: HAF-Modus aktiv	30 ✓ 0 ⊕ 0 ✘ VP 27 hat versucht über Tippen auf das Symbol weitere Informationen zu erhalten.

Element	Beschreibung	Ergebnisse
	Info-Button in Tablet Statusleiste: Bei Tippen auf Button werden Informationen zu Navigation und Umgebungsverkehr eingeblendet	29 ✓ 1 ☉ 0 ✖ ☉: VP 22 gibt an, dass der Button grün leuchten sollte, um die Verfügbarkeit neuer Informationen anzuzeigen. Sonstiges: VP 2 wünscht sich mehr Informationen; VP 14 gibt an, dass er erst durch Versuchsleiter und ausprobieren wusste, was sich hinter dem Button verbirgt; VP 18 nutzte den Button mehrfach, um sich zu kommenden Übernahmen zu informieren; VP 20 findet die verfügbaren Informationen nicht sonderlich interessant; Auch VP 27 hat weitere Fahrzeuginformationen, statt einer „Spiegelung“ des Kombi-instruments, erwartet.
	Manöveranzeige in Tablet Statusleiste	29 ✓ 1 ☉ 0 ✖ ☉: VP 8 interpretiert die Fortschrittsanzeige als Hinweis, dass ein Überholvorgang gestartet wird. Sonstiges: VP 14 sieht lieber auf die Straße, statt die Anzeige zu beachten; VP 15 findet die Anzeige „ganz cool“; VP 24 bewertet die Fortschrittsanzeige mit „das war gut!“; VP 27 ist der Balken erst bei der dritten Fahrt aufgefallen; VP 30 findet die Anzeige hilfreich, um während dem Lesen auf dem Tablet das Fahrzeug zu überwachen;

Bewertung der Anzeige

Das Tablet wird überwiegend als sehr hilfreich und übersichtlich bewertet (Abbildung 5.12). Die Ergebnisse basieren auf den Antworten zu einer fünfstufigen Likert-Skala (-2 = Stimme gar nicht zu; -1 = stimme eher nicht zu, 0 = teils/teils, 1 = stimme eher zu, 2 = stimme voll und ganz zu). Der Großteil der VP findet die Anzeige von aktuellem Automationsstatus, Umgebungsverkehr, Fahrmanöver und Navigation im Tablet sinnvoll. Es zeigt sich im Vergleich zur Anzeige im Kombiinstrument aber eine deutlich größere Streuung bei Umgebungsverkehr und Navigationsanzeige (Abbildung 5.13).

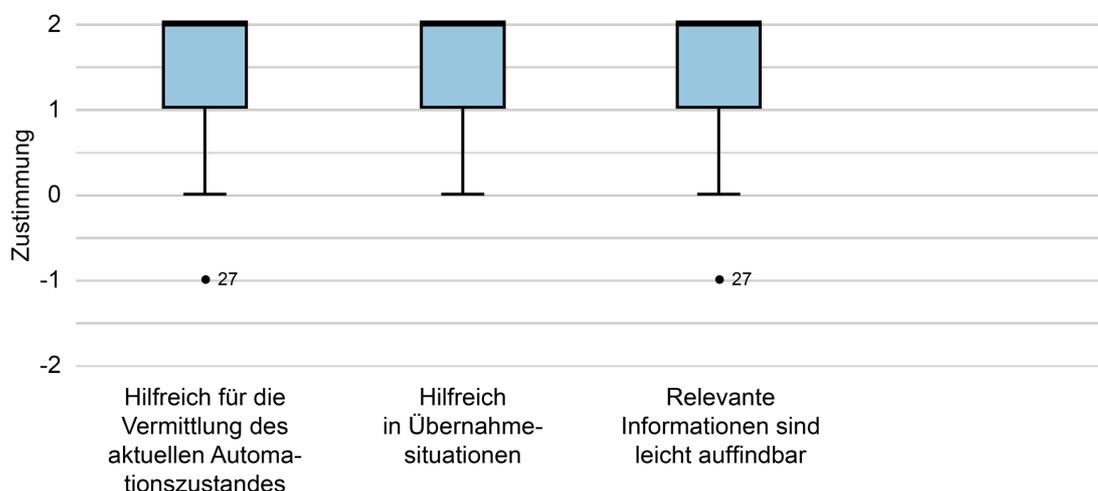


Abbildung 5.12: Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) des Tablets; $n = 30$.

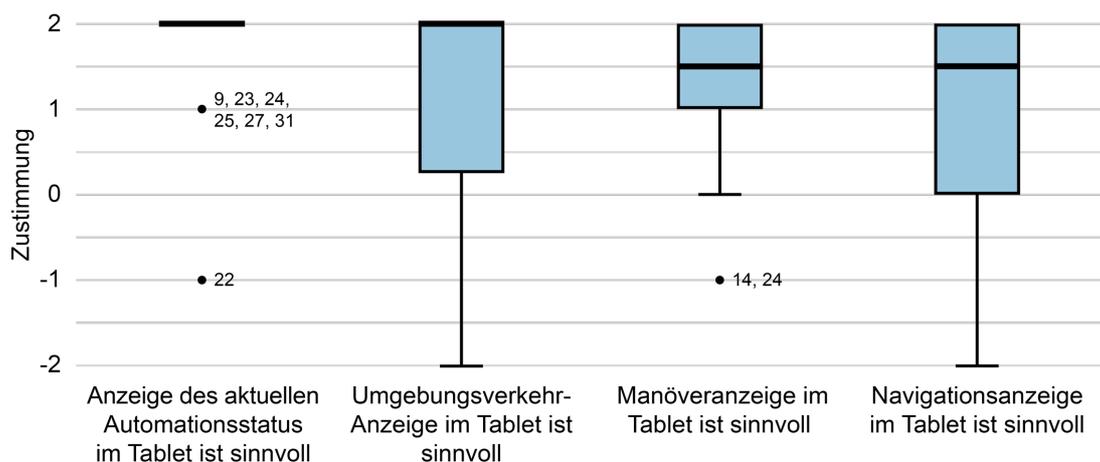


Abbildung 5.13: Ergebnisse (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) zur Bewertung der Informationseinheiten im Tablet; $n = 30$.

Informationen im Tablet

22 der 30 VP bewerten die Anzahl der im Tablet angezeigten Informationen als genau richtig.

Für vier VP werden zu viele Informationen angezeigt:

- Wenn das Kombiinstrument im Sichtfeld ist, empfindet VP 1 die Informationen auf dem Tablet als überflüssig, bei Abwendung allerdings hilfreich.
- VP 10 benötigt die Informationen zum Umgebungsverkehr nicht.
- VP 24 und VP 25 finden eine redundante Anzeige der Informationen (Umgebungsverkehr, Navigationskarte) auf dem Tablet unnötig, sofern diese auf dem Kombidisplay angezeigt werden.

Die anderen vier VP möchten weitere Informationen angezeigt bekommen:

- VP 2, 7 und 27 möchten Informationen zum Fahrzeug und dessen Zustand angezeigt bekommen. VP 7 möchte diese insbesondere bei kritischen Zuständen zur Verfügung haben.
- VP 7 wünscht sich mehr Informationen zur Strecke und dem Verkehrsfluss.
- VP 20 möchte den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug in der Statusleiste des Tablets angezeigt bekommen.
- VP 27 hätte gern, dass erkannte Verkehrsschilder in der Statusleiste angezeigt werden.

5.1.8.3 LED-Leiste

Verständnis

Tabelle 5.13: Ergebnisse zum Systemverständnis der LED-Leiste; $n = 30$.
t = verbleibende Zeit im HAF-Modus.

Element	Beschreibung	Ergebnisse
	<p>LED leuchtet: System befindet sich im HAF-Modus;</p> <p>Türkis: Alles in Ordnung ($t > 60$ s);</p> <p>Orange: System weist mit einer Frühwarnung auf eine bald nötige Übernahme hin ($60 \text{ s} \geq t > 10 \text{ s}$);</p> <p>Rot: System weist mit einer Akutwarnung auf eine unmittelbar nötige Übernahme hin ($t \leq 10 \text{ s}$).</p>	<p>24 ✓ 5 ⊙ 1 ✖</p> <p>⊙: VP 1 nimmt an, dass die LED-Leiste auch auf allgemeine Gefahrensituationen hinweist; VP 11 interpretiert das orange Leuchten als Möglichkeit das HAF einzuschalten und sieht das rote Leuchten als Anzeige von Systemfehler; VP 24 versteht Türkis als Anzeige für die Verfügbarkeit des Systems; VP 27 interpretiert Orange als unmittelbar nötige Übernahme und Rot als Systemfehler oder Defekt; VP 29 sagt aus, dass Türkis nach der Aktivierung des HAF-Modus angezeigt wird und dann erlischt;</p> <p>✖: VP 17 versteht Türkis als Anzeige dafür, dass der Autopilot bereit ist und eingeschaltet werden kann, Orange als Aufforderung zur sofortigen Übernahme und Rot als Anzeige für die selbstständige Deaktivierung des Autopiloten.</p>

Bewertung der LED-Leiste

Die Boxplots (Abbildung 5.14) zeigen, dass die Anzeige des aktuellen Automationsmodus über die LED-Leiste als sinnvoll bewertet wird. Ebenso wird die Vermittlung des aktuellen Zustandes über die LED als hilfreich bewertet. In Übernahmesituationen beurteilen die VP die LED-Leiste zwar mit deutlich größerer Streuung, aber dennoch als hilfreich. Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge der VP sind in Tabelle 5.11 aufgeführt.

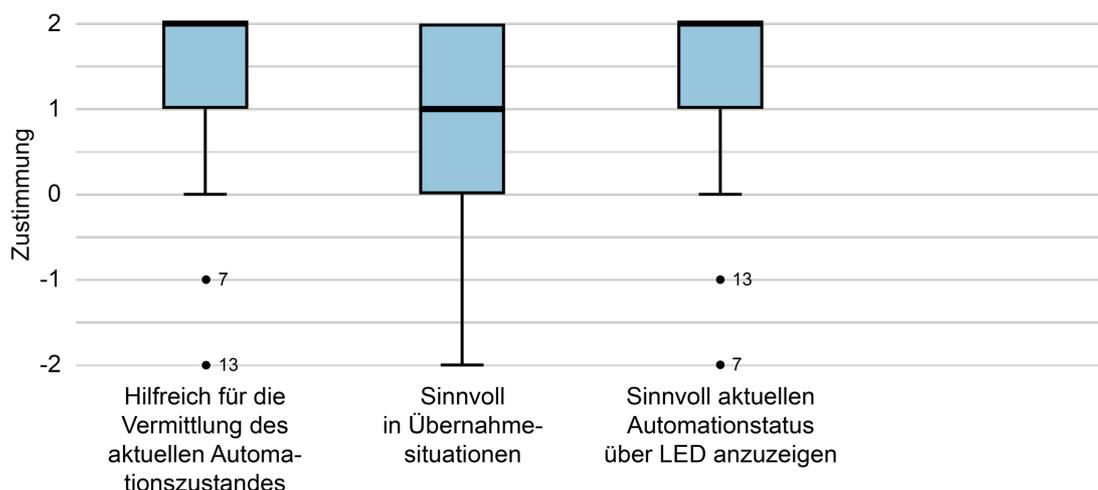


Abbildung 5.14: Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) der LED-Leiste; $n = 30$.

Tabelle 5.14: Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge der VP zur LED-Leiste.

Positive Anmerkungen	Negative Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge
<p>VP 8 und 32 beschreiben ein schnelles Modus-Verständnis durch die LED.</p> <p>VP 8 führt die hilfreiche Redundanz zu anderen Komponenten an.</p> <p>VP 12, 16 und 23 sehen den Vorteil in der peripheren Wahrnehmung der Leiste, sodass keine Notwendigkeit besteht, ständig auf andere Anzeigen zu achten und die LED-Anzeige auch bei längerer/stärkerer Ablenkung wahrgenommen wird.</p> <p>VP 17 und 25 finden die Leiste und die unterschiedlichen Farben bei ausreichender Helligkeit sinnvoll.</p>	<p>Vier VP (VP 5, 10, 13, 31) halten eine dauerhafte Anzeige des Systemzustands über die LED-Leiste für unnötig.</p> <p>Sechs VP (VP 1, 5, 7, 8, 10, 13) finden die Anzeigen über die anderen Displays ausreichend.</p> <p>Sieben VP (VP 3, 7, 15, 16, 20, 24, 25) beschreiben die LED als zu hell. VP 3, 16, 20, 25 weisen auf eine potenzielle Blendungsgefahr besonders bei Nachtfahrten. VP 3 würde die LED-Leiste bei Nacht dunkler einstellen. VP 25 weist auf potentielle Probleme bei Nachtfahrten hinsichtlich Pupillenreaktionen aufgrund der Farbwechsel hin.</p> <p>VP 13, 27 und 29 beurteilen die Leiste als zu groß (VP 27: „Da leuchtet das ganze Cockpit“). VP 13 meint, die wuchtige Gestaltung erzeugt Stresssituationen, da man bei Orange und Rot „gleich von einer gefährlichen Situation“ ausgeht. Bei einer Kontrollübergabe würde für VP 27 ein gewöhnliches Warnlicht ausreichen.</p> <p>VP 24 würde die Leiste komplett weglassen oder kleiner gestalten. VP 20 schlägt vor, die LED an den Rand des HUD zu positionieren.</p>

5.1.8.4 Head-up-Display

Verständnis

Tabelle 5.15: Ergebnisse zum Systemverständnis der Elemente des HUD; n = 30.

Element	Beschreibung	Ergebnisse
	<p>Navigationspfeil im HUD; Um zum Ziel zu gelangen, muss in 8,8 km die aktuelle Straße bzw. Autobahn nach rechts verlassen werden.</p>	<p>28 ✓ 1 ⊙ 1 ✖</p> <p>⊙: VP 8 nimmt an, dass in 8,8 km auch das Ziel erreicht ist.</p> <p>✖: VP 2 interpretiert die Entfernungsangabe als Punkt, an welchem der HAF-Modus deaktiviert wird.</p>
	<p>Übernahme-Symbol im HUD; Wird bei der Übernahmepvorbereitung (60 s ≥ t > 10 s) und während unmittelbar nötigen Übernahmen (t ≤ 10 s) angezeigt.</p>	<p>29 ✓ 0 ⊙ 1 ✖</p> <p>✖: VP 10 hat das Element falsch beschrieben. Genauere Informationen bzw. Notizen liegen hierzu nicht vor.</p>

Element	Beschreibung	Ergebnisse
	Gefahrenumrandung im kontaktanalogen HUD; Hebt während der unmittelbaren Übernahmephase potentiell gefährliche Objekte visuell hervor.	<p>15 ✓ 11 ⊖ 4 ✖</p> <p>⊖: VP 3 und 4 interpretieren die Umrandung nur als Hervorhebung überholender Fahrzeuge; VP 5, 10 und 16 geben an, dass die Umrandung Fahrzeuge hervorhebt, die sich in der Nähe des Egofahrzeugs befinden; VP 18 und 27 geben an, die Anzeige nicht genau verstanden zu haben; VP 18 vermutet eine Anzeige für den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug; VP 27 denkt, dass es sich um eine Programmierungshilfe oder ähnliches handelt; VP 19 kann nicht genau zuordnen, warum die Umrandung auftaucht; VP 31 versteht die Umrandung ähnlich wie VP 13 nur als Systemfeedback (System hat das Fahrzeug „im Blickfeld“).</p> <p>✖: VP 9 ist die Bedeutung der Umrandung nicht klar. Sie erkennt keinen Nutzen dafür; VP 12 nimmt die Umrandung nicht wahr, aber vermutet, dass die Fahrzeuggröße dadurch verdeutlicht werden soll; VP 17 denkt, dass es sich um eine Hervorhebung von Fahrzeugen im toten Winkel handelt; VP 29 meint, dass die Umrandung einen zu schnell fahrenden Pkw verdeutlicht;</p> <p>Sonstiges: VP 1 fällt die Gefahrenumrandung nicht auf, aber interpretiert deren Bedeutung richtig. VP 20 gibt an, dass er das hervorgehobene Fahrzeug nicht als potentiell gefährlich einordnen würde; VP 30 findet die Anzeige sei mit Informationen überladen, VP 14 bewertet sie als nicht notwendig;</p> <p>Anmerkung: Mehrere VP wechseln bereits vor Auftreten der Gefahrenumrandung in den manuellen Modus, sodass diese bei manueller Fahrt nicht wahrgenommen werden kann.</p>

Bewertung des Head-up-Displays

Die Anzeige im HUD wird überwiegend als sehr hilfreich und übersichtlich bewertet, wobei vor allem die Anzeige der Übernahme im HUD als sinnvoll eingestuft wird (Abbildung 5.15).

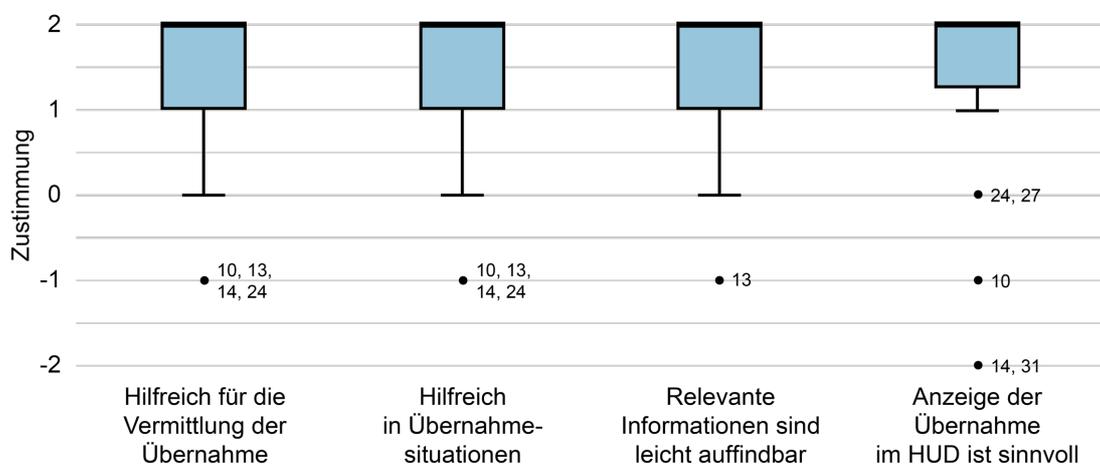


Abbildung 5.15: Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) des HUD; n = 30.

Informationen im Head-up-Display

20 der 30 VP bewerten die Anzahl der im HUD angezeigten Informationen als genau richtig. Für vier VP (VP 10, 13, 14, 31) werden zu viele Informationen angezeigt, wovon VP 10, 14 und 31 zu erkennen geben, das HUD generell nicht zu benötigen bzw. zu wollen.

Die anderen sechs VP möchten weitere Informationen angezeigt bekommen:

- VP 7 und 17 möchten genauere Informationen zu vorausliegenden Ereignissen oder Landmarken.
- VP 15 will allgemein Verkehrszeichen und Hinweise zur Umgebung (z.B. Seitenwind-Warnung) angezeigt bekommen.
- VP 20 und 23 möchten Informationen zum vorausfahrenden Fahrzeug
- VP 21 möchte während der Übernahmephase die verbleibende HAF-Zeit angezeigt bekommen.

5.1.8.5 Lenkradtasten

Verständnis

Tabelle 5.16: Ergebnisse zum Verständnis der Elemente der Lenkradtasten; $n = 30$.

Element	Beschreibung	Ergebnisse
	<p>Lenkradtasten mit LED-Hintergrundbeleuchtung;</p> <p>Kein Leuchten: Manueller Modus und HAF nicht verfügbar oder HAF-Modus aktiv;</p>	<p>14 ✓ 15 ⊙ 1 ✖</p> <p>⊙: VP 7, 18, 22 geben an, dass sich die Tasten gleich wie die LED-Leiste verhalten; VP 9 beschreibt das rote Leuchten als „Aus-Knopf“; VP 13 sind die verschiedenen Zustände nicht bewusst aufgefallen; VP 30 interpretiert das orange Leuchten als „es kann was kommen“ und das rote Leuchten als „es ist schon da“; 7 VP (VP 3, 10, 14, 19, 20, 21, 31) geben an, dass die Tasten im aktiven HAF-Modus türkis leuchten;</p>
	<p>Türkises Leuchten: HAF verfügbar, kann mit gleichzeitigem Drücken auf die beiden Lenkradtasten aktiviert werden;</p>	<p>✖: VP 3 sagt das rote Leuchten tritt im manuellen Modus auf;</p>
	<p>Oranges Leuchten: HAF-Modus aktiv, System weist mit einer „Frühwarnung“ auf eine bald nötige Übernahme hin (60 s \geq t > 10 s);</p>	<p>Sonstiges: VP 4 und 16 ist das orange Leuchten nicht aufgefallen; VP 14 findet die Tasten „sehr gut“ in Kombination mit der LED-Leiste;</p>
	<p>Rot: HAF-Modus aktiv, System weist mit einer „Akutwarnung“ auf eine unmittelbar nötige Übernahme hin (t \leq 10 s).</p>	<p>Anmerkung: Bei den als richtig gewerteten Antworten zum Zustand ohne Hintergrundbeleuchtung wurde von den VP größtenteils nur entweder als HAF nicht verfügbar oder als HAF-Modus aktiv beschrieben.</p>

Bewertung der Lenkradtasten

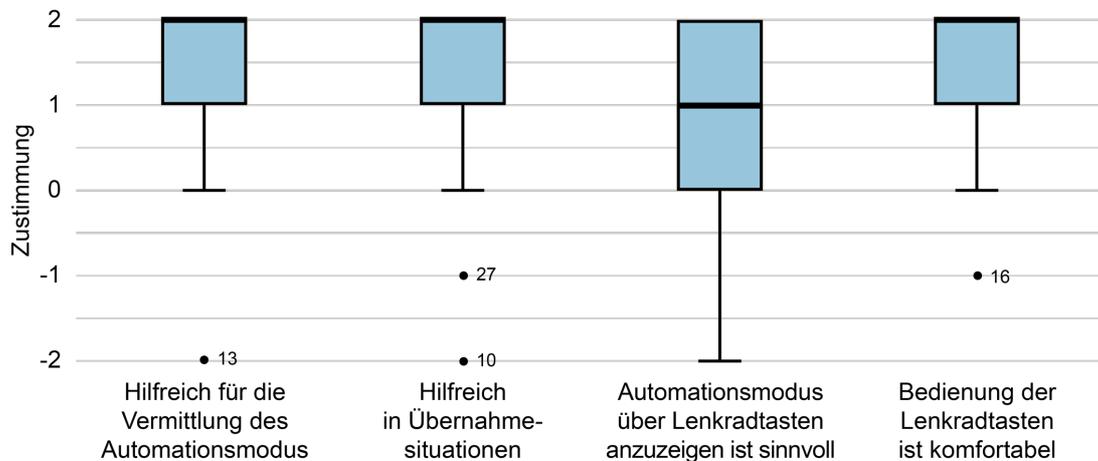


Abbildung 5.16: Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) der Lenkradtasten; $n = 30$.

Die Anzeige der Lenkradtasten wird überwiegend als sehr hilfreich für die Vermittlung des Automationsmodus sowie in Übernahme-situationen bewertet (Abbildung 5.16). Bei der Sinnhaftigkeit der Anzeige des aktuellen Automationsmodus über die Tasten sind sich die VP dagegen weniger einig. Die Bedienung der Tasten zur Aktivierung und Deaktivierung des HAF-Modus wird überwiegend als sehr komfortabel bewertet. Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge der VP sind in Tabelle 5.17 aufgeführt.

Tabelle 5.17: Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge der VP zu den Lenkradtasten.

Positive Anmerkungen	Negative Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge
VP 7 findet die Beleuchtung der Lenkradtasten „zur Unterstützung“ sinnvoll.	VP 1 findet die Anzeige im Kombiinstrument ausreichend. VP 13 gibt an, dass die Anzeige bereits in HUD und Kombidisplay vorhanden sei und es sonst „zu viele Informationen“ wären. Für VP 22 sind die Anzeigen über die LED und das HUD ausreichend. Sie würde die Tasten daher nicht leuchten lassen.
4 VP (VP 8, 16, 24 und 29) finden die zusätzlichen Informationsanzeige über die Tasten gut.	VP 2 merkt an, dass im Automatikmodus die LED leuchtet, aber die Taste nicht.
VP 15 findet die 2-Tasten-Bedienung gut, da man damit beide Hände am Steuer habe, was insbesondere in Übernahme-situationen gut sei. VP 16 gibt an, dass man 2 Tasten nicht aus Versehen aktivieren könne, sagt aber, dass man mit den Daumen relativ weit rein greifen müsse.	VP 9 und 12 möchten neben der LED-Leiste nicht noch mehr leuchtende Objekte in der Fahrerkabine haben.
VP 16 ist der Meinung man fände die leuchtenden Tasten leicht.	VP 10 findet die Verfügbarkeitsanzeige des HAF-Modus hilfreich, alles andere aber unnötig.
VP 18 und 20 beschreiben die periphere Wahrnehmung der Tasten positiv.	VP 23 findet die anderen Anzeigen „wesentlich eindringlicher“.

5.1.8.6 Signaltöne und Ansagen

Die Kombination aus Signaltönen und Ansagen wird überwiegend sehr positiv bewertet (Abbildung 5.17). Vier VP bewerten die Kombination negativ:

- VP 4, 15 und 18 finden die Signaltöne nervig.
- VP 13 ist der Meinung, die Countdown-Töne erzeugen einen künstlichen Zeitdruck. Die Ansage in Meter und eine optische Anzeige der Meterzahl seien ausreichend.



Abbildung 5.17: Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) der Kombination von Signaltönen und Ansagen; $n = 30$.

Aktivierung und Deaktivierung

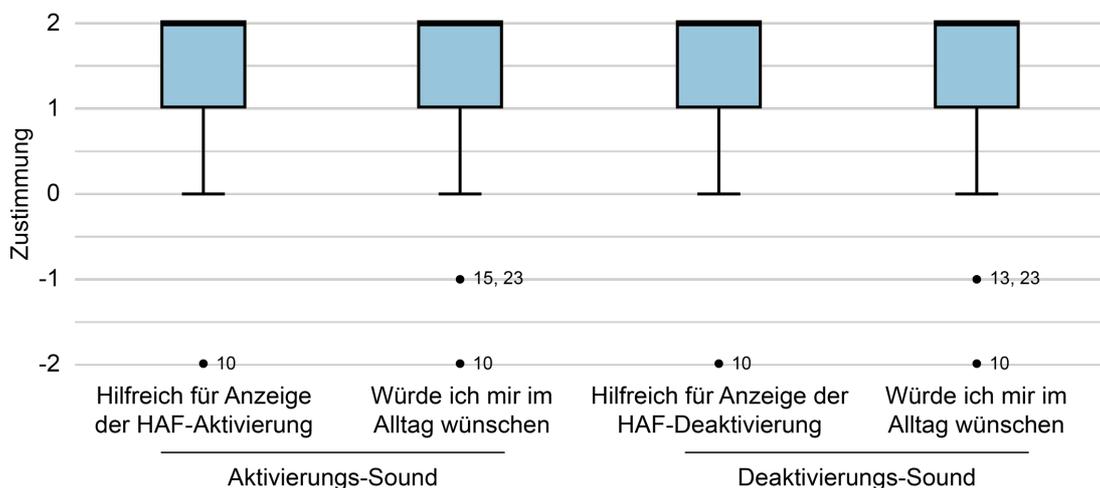


Abbildung 5.18: Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) des Aktivierungs-Sound (Signalton + Ansage „Autopilot aktiviert“) und des Deaktivierungs-Sound (Signalton + Ansage „Autopilot deaktiviert“); $n = 30$.

Die Sounds zur Aktivierung (Signalton + Ansage „Autopilot aktiviert“) und Deaktivierung (Signalton + Ansage „Autopilot deaktiviert“) werden als hilfreich und wünschenswert bewertet (Abbildung 5.18).

5.1.9 Konzeptvarianten

Abgesehen von der indirekten Bewertung der Displayvarianten (A, B, C) erfolgt in der Abschlussbefragung eine direkte Rangreihung der Varianten durch die VP. Zudem werden ausgestaltete Konzeptvarianten zu Navigationskarte, Statusindikator und Spurmarkierungen im Umgebungsverkehr bewertet.

5.1.9.1 Ranking der Displayvarianten

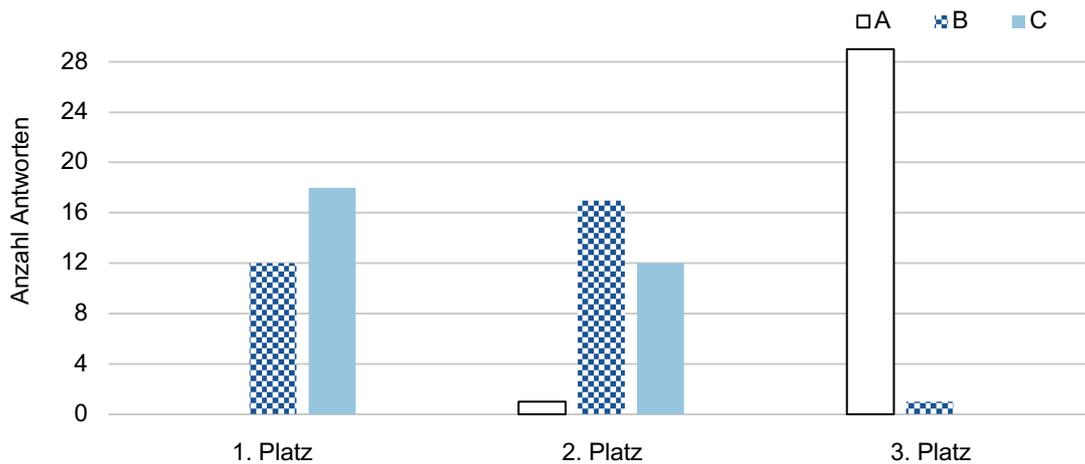


Abbildung 5.21: Ranking der Displayvarianten A (keine Angabe), B (Zeitangabe) und C (Entfernungsangabe) bzgl. der Angabe zur verbleibenden HAF-Zeit; $n = 30$; Auf Platz 1 bewerten die VP die favorisierte Variante.

Von den drei Displayvarianten bevorzugen in der direkten Befragung 12 VP Variante B und 18 VP Variante C, wobei mehrere VP zögern, bevor sie sich zwischen Variante B und C entscheiden. VP 30 setzt Variante C auf den 1. Platz und (als einziger Teilnehmer) Variante A auf den 2. Platz. Die anderen 29 VP geben Variante A den 3. und letzten Platz (Abbildung 5.21).

10 VP (VP 1, 15, 16, 20, 22, 23, 25, 29, 31, 32) geben an, dass Variante B besser einschätzbar sei. 5 VP (VP 4, 8, 17, 24, 27) schreiben dies Variante C zu, da Zeit mitunter von Geschwindigkeit abhängig sei (VP 4, 8, 19, 20, 22). VP 10 und 20 fänden eine Kombination bzw. gleichzeitige Anzeige von Entfernung- und Zeitangabe am besten.

5.1.9.2 Weitere Gestaltungsvarianten

Statusindikator: Symbole und Text

26 VP wollen im Statusindikator sowohl Symbole als auch textuelle Labels angezeigt bekommen, wovon fünf Personen (VP 12, 18, 22, 25, 29) eine bessere Verständlichkeit als Grund angeben. Für drei VP (VP 20, 23, 31) würden nur Symbole zur Statusanzeige ausreichen. VP 15 enthält sich, da es ihr „egal“ ist. Für eine rein textuelle Anzeige entscheidet sich keine der VP.

Spurmarkierung

18 VP wählen eine farbige Markierung der eigenen Spur in der Umgebungsverkehr-Anzeige, da diese beispielsweise auffälliger (VP 16, 18, 21) sei. Zwölf VP entscheiden sich für eine schwarze Spurmarkierung, da es als Anzeige der erkannten Spur ausreichen würde (VP 25, 26). Fünf VP (9, 12, 20, 22 und 32) merken an, dass es für sie egal ist, ob die Spur farbige oder schwarz dargestellt wird, solange sie markiert wird. Zwei VP würden die eigene Spur während der manuellen Fahrt schwarz markieren und während der Verwendung von Spurhalteassistenten oder im hochautomatisierten Modus farbige.

Navigationskarte

27 VP favorisieren eine detaillierte Ansicht der Navigationskarte, wovon 11 Personen (VP 3, 10, 17, 18, 21, 23, 23, 29, 30, 31, 32) angeben, dass damit eine bessere Orientierung möglich sei. Drei VP (VP 12, 20, 23) geben an, dass damit eine bessere Planung möglich sei. Eine VP (VP 13) entscheidet sich für die abstrakte Karte, da ihr die detaillierte Karte zu überladen ist. Zwei VP möchten sich nicht auf eine der gezeigten Varianten festlegen.

5.1.10 Gesamtkonzept

In diesem Abschnitt wird die Bewertung des Gesamtkonzepts dargelegt. Darin eingeschlossen werden Kommentare und Anmerkungen der VP, wobei nur Punkte aufgeführt werden, die mindestens zwei Mal genannt werden. Weitere Anmerkungen und Kommentare können Anhang B entnommen werden.

Das Gesamtkonzept wird zusammenfassend überwiegend positiv bewertet. Konkrete Anmerkungen der VP auf die Fragen danach, was besonders gut gefallen hat oder verbesserungswürdig ist können Tabelle 5.18 entnommen werden.

Tabelle 5.18: Kommentare der VP zum Gesamtkonzept.

Lob	Verbesserungsvorschläge
8 VP (VP 2, 11, 12, 15, 22, 25, 28, 31) loben das generelle Gesamtkonzept/-design.	4 VP (VP 3, 14, 20, 24) möchten Informationen zum vorausfahrenden Fahrzeug angezeigt bekommen.
8 VP (VP 5, 7, 9, 14, 19, 24, 25, 32) gefällt die Übersichtlichkeit.	Nach VP 5 und 29 sollte der Übernahmegrund immer angezeigt werden.
VP 2, 3, 18 und 23 mögen die LED-Leiste	VP 3 und 15 möchten erkannte Verkehrszeichen angezeigt bekommen.
VP 3 und 23 finden die Doppel-Tasten gut.	
Die akustische Ansagen werden von VP 4 und 18 gelobt.	
VP 4, 7 und 16 bewerten das Konzept als allgemein verständlich.	
VP 8, 16 und 23 finden die Anzeige im HUD gut.	
Das Farbkonzept wird von vier Personen (VP 14, 23, 30, 32) positiv hervorgehoben.	
VP 17 und 20 finden den automatischer Überholvorgang sehr positiv.	

5.1.10.1 Statusindikator und Übernahmeanzeige

Die Anzeige zum aktuellen Modus wird als sehr hilfreich bewertet, ebenfalls das Verständnis von aktuellem Modus und der damit einhergehenden Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine (Abbildung 5.22).

Der Großteil der VP gibt die Kontrolle komplett an das System ab. Die große Streuung deutet darauf hin, dass in Bezug auf das Vertrauens in das System bzw. in die Automation noch Verbesserungspotential vorhanden ist (Abbildung 5.23). Die VP verfügen nach ihrer subjektiven Einschätzung über ein gutes Situationsbewusstsein (Abbildung 5.23).

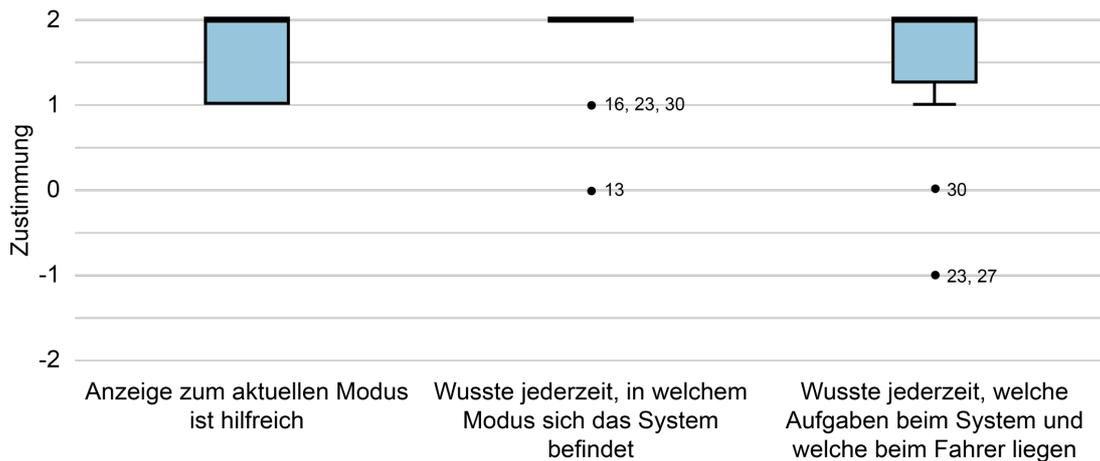


Abbildung 5.22: Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) von Aspekten zu Modus-Anzeige und -Verständnis; $n = 30$.

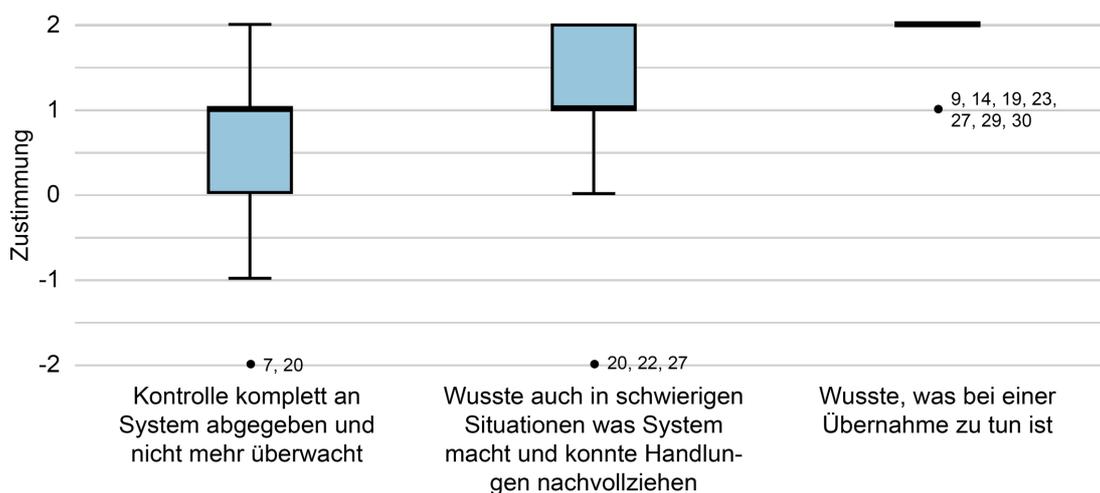


Abbildung 5.23: Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) von Aspekten zu Kontrollübergabe (Vertrauen) und Systemverständnis; $n = 30$.

Modi-Anzeige

27 VP möchten im Statusindikator den manuellen Modus, 22 den Assist-Modus und 27 den HAF-Modus zeitgleich angezeigt bekommen. 20 VP möchten, wie im vorgestellten Konzept, die drei Modi Manuell, Assist und HAF gleichzeitig dargestellt bekommen. 6 VP (VP 5, 8, 17, 23, 28 und 32) würden auf die Anzeige des Assistenzsysteme-Modus verzichten und nur die anderen beiden Modi zeitgleich anzeigen. VP 22 und 24 möchten immer nur den aktiven Modus angezeigt bekommen.

Übernahmegrund

27 von 30 VP möchten den Grund für eine bevorstehende Übernahme erfahren. Die VP führen grob kategorisiert die folgende Begründungen an:

- Bessere Vorbereitung auf bevorstehende Situation bzw. Verbesserung des Situationsbewusstseins (VP 1, 8, 10, 11, 12, 15, 17, 18, 20, 21, 24, 31, 32)
- Verringerung von Überraschungen bzw. von unerwarteten, eventuell gefährlichen Situationen durch Vorabinformation (VP 2, 16)
- Der Fahrer möchte wissen, was auf ihn zukommt (VP 18, 22, 23, 28)
- Hinweis für (nicht) erforderliche Handlungen (VP 15, 19)

Drei VP (VP 7, 14 und 25) geben an, dass der Übernahmegrund nicht angezeigt werden soll, da die Übernahmeanzeige ausreichend sei (VP 7) bzw. es genügen würde, zu wissen, dass eine Übernahme nötig ist (VP 14 und 25).

5.1.10.2 Farbwechsel und Ampelkonzept

Die drei im Versuch auftretenden Farbwechsel fallen den VP wie folgt auf (Grün wird als Türkis, Gelb als Orange gewertet):

- Türkis – Rot: 16 VP
- Türkis – Orange: 18 VP
- Orange – Rot: 20 VP

Alle drei auftretenden Farbwechsel beschreiben acht VP (VP 10, 11, 12, 13, 15, 22, 23, 27). Einige VP nennen weitere Farbwechsel (Blau – Gelb: VP 7; Blau – Türkis: VP 17; Rot – Orange: VP 18; Rot – Türkis: VP 16; Rot – Aus: VP 31). VP 4 und 20 merken an, dass die Farbwechsel nicht bewusst wahrgenommen werden. VP 24 meint, dass Türkis während der Fahrt nicht bewusst wahrgenommen wird.

Bei der Frage danach, ob die VP das dreistufige (Türkis – Orange – Rot) oder zweistufige Ampelkonzept (Türkis – Rot) bevorzugen, entscheiden sich 13 für das dreistufige Konzept. Keine VP entscheidet sich für die ausschließliche Verwendung des zweistufigen Konzepts. 17 VP geben an, je nach Situation beide Konzepte haben zu wollen, wovon neun (VP 4, 5, 8, 12, 16, 18, 20, 22, 32) angeben, das dreistufige Konzept zu bevorzugen. Bei akuten Gefahrensituationen bzw. unmittelbar nötigen Übernahmen, geben neun VP (VP 4, 5, 12, 18, 20, 22, 24, 29, 32) explizit an, den direkten Wechsel von Türkis auf Rot zu bevorzugen. Weitere (Einzel-) Anmerkungen und Kommentare können Anhang B entnommen werden.

5.1.10.3 Übernahmezeiten

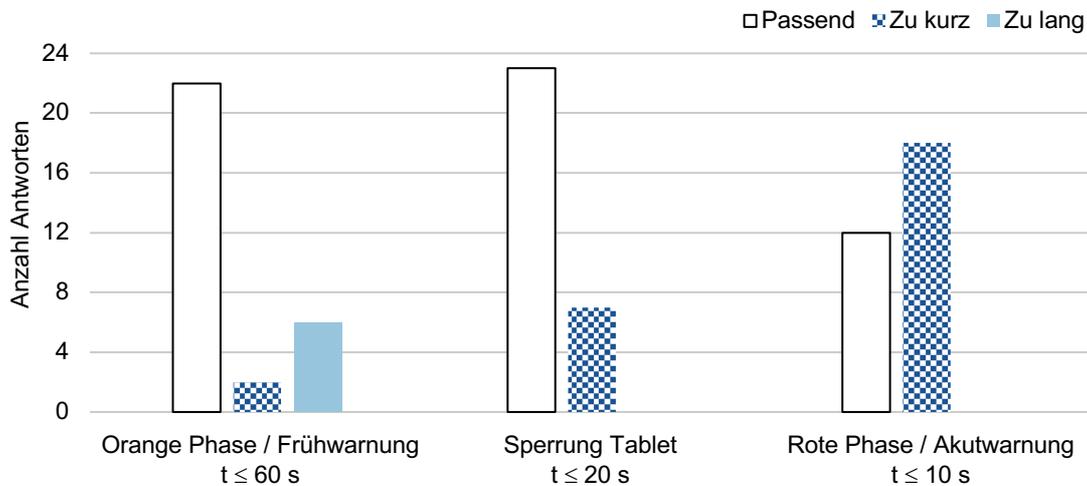


Abbildung 5.24: Bewertung der Zeitdauern der einzelnen Übernahmephasen; $n = 30$.

22 VP finden den Beginn der orangenen Phase (Frühwarnung) mit 60 s vor der Übernahme und 23 VP die Zeitdauer der Sperrung des Tablets mit 20 s vor der Übernahme passend gewählt. 5 VP (VP 1, 12, 22, 27, 28) sind der Meinung, dass 30 s für die orange Phase ausreichen würden. Laut VP 7 wären 15 s ausreichend. VP 3 und 17 möchten mehr als 60 s Zeit, wobei VP 17 zwei Minuten vorschlägt.

Sieben VP (VP 2, 3, 10, 11, 13, 24, 31) bewerten die Zeitdauer von 20 s für die Sperrung des Tablets als zu kurz. VP 10, 11 und 24 würden das Tablet früher sperren, damit der Fahrer mehr Zeit hat sich auf den Verkehr bzw. auf die Übernahmesituation einzustellen. VP 13 meint, dass man durch das Tablet massiv abgelenkt sein kann und würde es daher früher sperren. VP 18 ist die Sperrung des Tablets nicht aufgefallen, da sie in allen Situationen direkt eingegriffen hat.

Die Zeitdauer der roten Phase (Akutwarnung) bewerten 12 VP mit 10 s vor der Übernahme als passend. Die Mehrheit (18 VP) bewertet sie jedoch als zu kurz. VP 13 ist der Meinung, die rote Phase verursache Panik. Drei VP (VP 19, 21 und 23) möchten 20 s Zeit, um sich auf die Situation einzustellen.

5.1.10.4 Rückfallebene

18 VP würden es bevorzugen, wenn Teilfunktionen wie der ACC nach der Deaktivierung des Autopiloten aktiv bleiben. Fünf Personen (VP 10, 11, 16, 17, 24) nennen eine höhere Sicherheit, z. B. bei Stausituationen, als Vorteil.

Elf VP (VP 5, 9, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 23, 25, 31) möchten lieber manuell weiterfahren. Zwei VP (VP 8 und 25) möchten situationsabhängig beide Rückfallebenen zur Verfügung haben. VP 25 schlägt etwa vor, bei voraussehbaren Situationen den ACC aktiviert zu lassen, bei akuten Übernahmesituationen jedoch direkt in den manuellen Modus ohne Tempomat zu wechseln. Begründungen und Kommentare können Anhang B entnommen werden.

5.1.11 Mix and Match

Im Mix and Match erstellen die VP mit vorbereiteten Templates, Stift und Papier (Abbildung 4.9) ihr „Wunsch“-Anzeigeconcept für Fahrerkabine, Kombiinstrument und Tablet. Die Ergebnisse sind im Folgenden jeweils für einen „Alles in Ordnung“-HAF-Modus und eine Übernahme-Situation in Grafiken (Abbildungen 5.25 – 5.30) zusammengefasst. Die entsprechenden Elemente sind dargestellt, sobald mindestens 3 VP das Element verwendet haben. Sie erhalten entsprechend der absoluten Auswahlhäufigkeiten einen Deckkraft-Wert (z. B. 50 %, wenn 15 von 30 VP das Element gewählt haben). Die Darstellung der Elemente nebeneinander bedeutet in der Zusammenfassung, wie auch in den einzelnen Mix and Match Konzepten der VP (Datenträger: 04_Fahrsimulatorstudie/04_Ergebnisse/10_Mix-and-Match), nicht, dass die Elemente gleichzeitig angezeigt werden sollen, schließt dies aber andererseits auch nicht aus.

5.1.11.1 Fahrerkabine

Die Fahrerkabine im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus (Abbildung 5.25) ähnelt mit den überlagerten Auswahlhäufigkeiten in den Grundzügen mit LED-Leiste, Lenkradtasten, türkiser Farbe, den vorgegebenen Displays, Kombiinstrument und Tablet der konzipierten MMS. Abweichend ist, dass 23 VP das HUD und 14 VP Sounds auch im hochautomatisierten Modus verwenden möchten. Jeweils 4 VP möchten auch im HAF-Modus die Gefahrenumrandung angezeigt bekommen sowie eine Sitzvibration zur Verfügung haben.

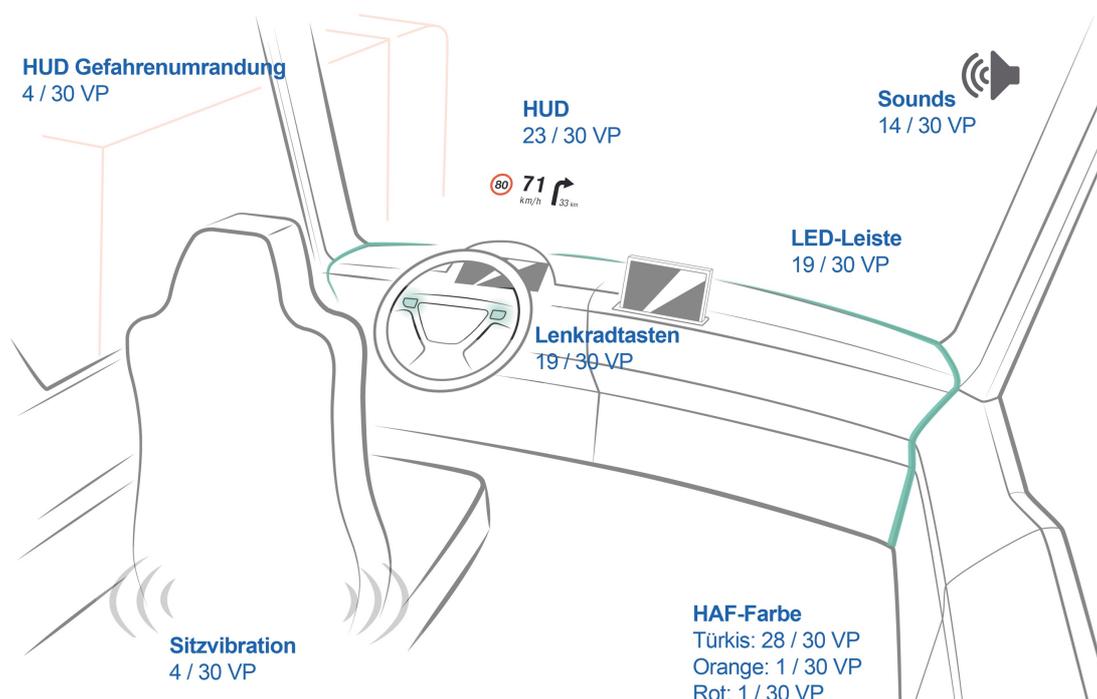


Abbildung 5.25: Mix and Match – Fahrerkabine im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus: Absolute Auswahlhäufigkeiten der jeweiligen Elemente (Darstellung basierend auf Lehmer [11]).

In einer Übernahmesituation (Abbildung 5.26) möchten jeweils 28 der 30 VP das HUD und Sounds angezeigt bekommen. Für die Sitzvibration entscheidet sich über ein Drittel (11 VP), für die Gefahrenumrandung lediglich ein Fünftel (6 VP). Die Anzeige über die Lenkradtasten und LED-Leiste wird von mehr als zwei Dritteln (23 VP, 21 VP) gewählt. Vier VP (VP 13, 20, 24, 27) möchten die LED-Leiste insgesamt kleiner und in Fahernähe positioniert haben.

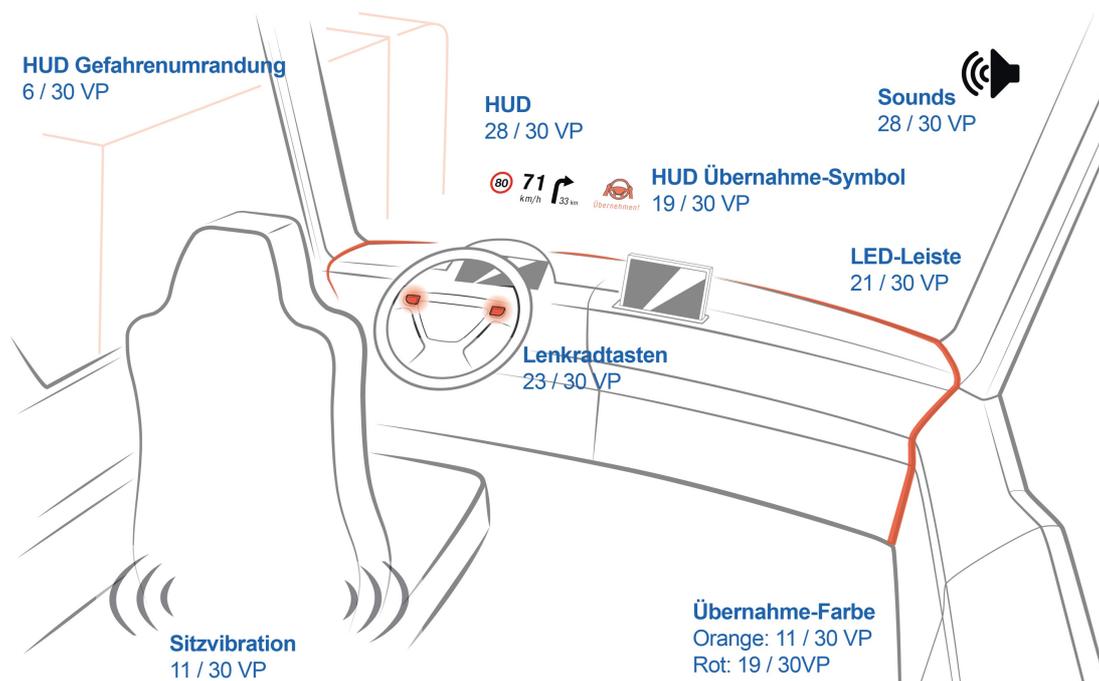


Abbildung 5.26: Mix and Match – Fahrerkabine in Übernahme-situation: Absolute Auswahlhäufigkeiten der jeweiligen Elemente (Darstellung basierend auf Lehmer [11]).

5.1.11.2 Kombiinstrument

Der Großteil der Probanden möchte den aktiven Modus im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus (27 VP) und in einer Übernahme-situation (26 VP) angezeigt bekommen (Abbildung 5.27, Abbildung 5.28). Jeweils über zwei Drittel möchten die beiden Rundinstrumente Drehzahlmesser und Tachometer in beiden Situationen dargestellt bekommen.

Im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus möchten 23 VP den Umgebungsverkehr, 16 VP die Manöveranzeige, 18 VP Routeninformationen und 16 VP eine Navigationskarte angezeigt bekommen. 15 VP wählen bei der Navigationskarte die detaillierte Variante. Die verbleibende HAF-Verfügbarkeit möchten zwölf VP angezeigt bekommen. Bei einer auftretenden Übernahme wollen jeweils zwei VP die Navigationskarte und den Umgebungsverkehr weniger angezeigt bekommen. 17 VP möchten den Übernahmegrund und über zwei Drittel (23 VP) möchten die verbleibende HAF-Verfügbarkeit wissen. Weitere Details können Abbildung 5.27 und Abbildung 5.28 entnommen werden.

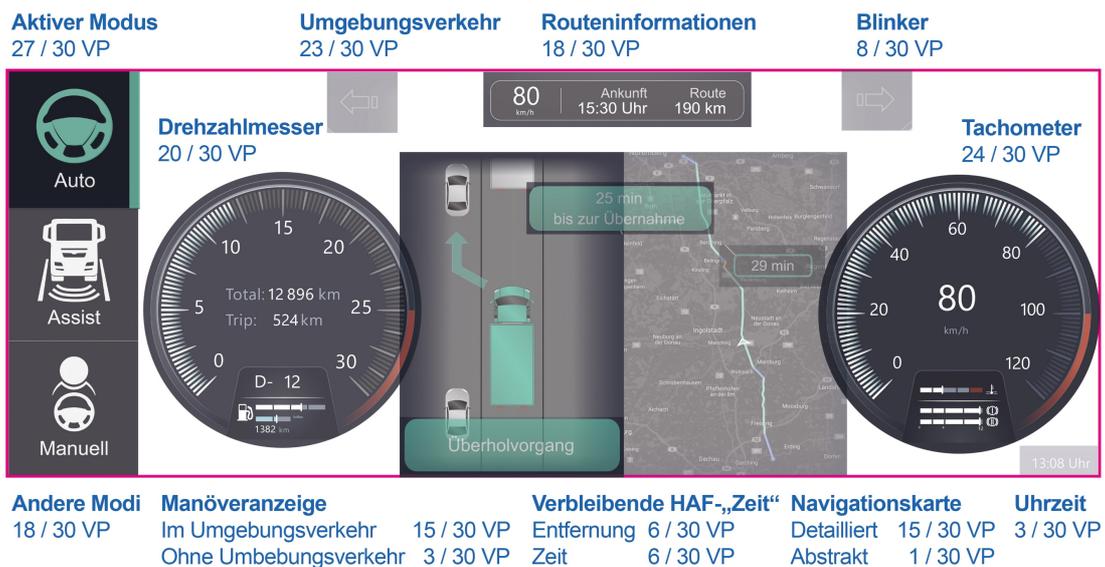


Abbildung 5.27: Mix and Match – Kombiinstrument im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus:
Absolute Auswahlhäufigkeiten der jeweiligen Elemente.



Abbildung 5.28: Mix and Match – Kombiinstrument in Übernahmesituation:
Absolute Auswahlhäufigkeiten der jeweiligen Elemente.

5.1.11.3 Tablet

27 VP möchten im Tablet im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus (Abbildung 5.29) eine Navigationskarte angezeigt bekommen bzw. die Möglichkeit haben, diese zuzuschalten, wovon sich 24 VP für die detaillierte Variante entscheiden. Den Umgebungsverkehr möchten 19 VP und die Routeninformationen 21 VP verfügbar haben. 22 VP möchten den aktiven Modus in der Statusleiste angezeigt bekommen, fünf VP die aktuelle Geschwindigkeit und neun die Manöveranzeige. Zwölf VP möchten einen Info-Button nutzen, um weitere Informationen einzublenden. Die verbleibende HAF-Verfügbarkeit möchten 13 VP im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus über das Tablet erfahren.



Abbildung 5.29: Mix and Match – Tablet im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus: Absolute Auswahlhäufigkeiten der jeweiligen Elemente.



Abbildung 5.30: Mix and Match – Tablet in Übernahmesituation: Absolute Auswahlhäufigkeiten der jeweiligen Elemente.

In einer Übernahme-situation (Abbildung 5.30) verwenden 18 VP den aktiven Modus, 24 VP die Navigationskarte, 16 VP die Routeninformationen, 18 VP den Umgebungsverkehr und 3 VP die Manöveranzeige in der Gestaltung ihres Wunschanzeige-konzepts. 22 VP möchten die restliche HAF-Verfügbarkeit und 19 VP den Übernahmegrund angezeigt bekommen. 21 VP entscheiden sich für die Nutzung eines orangen Farbschemas, womit überwiegend eine Frühwarnung dargestellt werden soll. Zwölf VP nutzen ein rotes Farbschema. Beim Farbschema sind Mehrfachauswahlen möglich, indem die VP mehrere identische Elemente in diversen Farben platzieren. Mit der Platzierung von orangen und roten Elementen beschreiben die VP die Nutzung einer zweistufigen Warnkaskade. Weitere Ergebnisse und Details sind Abbildung 5.29 und Abbildung 5.30 zu entnehmen.

5.2 Konformitätsbewertung nach ISO 15005

Die inspektionsbasierte Konformitätsbewertung wird unter Verwendung der Dialogprinzipien der ISO 15005 [14] für die MMS sowie für erstellte Varianten durchgeführt. In den folgenden Abschnitten sind die Ergebnisse in Tabellen zusammengefasst. Darin aufgeführt sind die angewendeten Dialogprinzipien mit kurzer Erläuterung, verletzte Anforderungen oder Empfehlungen und konkrete Beschreibungen der Verletzungen. Auf erfüllte Anforderungen und Empfehlungen sowie Aspekte, die über den aktuellen Entwicklungsstand eines Fahrsimulator-Prototyps hinausgehen (z. B. Anforderungen an das Fahrzeug, in welchem das TICS integriert werden soll), wird nicht weiter eingegangen. Ebenso nicht aufgeführt werden Verletzungen von Aspekten, die für hochautomatisierte Systeme nicht relevant sind sowie Verstöße gegen aktuell geltende gesetzliche Bestimmungen, die in Zukunft für eine Nutzung von hochautomatisierten Systemen auf öffentlichen Straßen angepasst werden. Die ISO 15005 verweist auf die Einhaltung der Anforderungen aus anderen Normen. Für die vorliegende MMS sind davon besonders die auditiven Anforderungen aus der ISO 15006 und die visuellen Anforderungen aus der ISO 15008 relevant. Diese werden explizit in die Bewertung miteinbezogen.

Die neun in der ISO 15005 [14, S. 10 – 19] beschriebenen Dialogprinzipien werden in drei übergeordnete Prinzipien unterteilt:

- Eignung für den Gebrauch während der Fahrt
- Eignung für TICS-Aufgaben
- Eignung für den Fahrer

Im Folgenden werden anhand dieser Prinzipien Abweichungen von den jeweiligen Anforderungen und Empfehlungen berichtet. In Anlehnung an die Klassifizierung von Usability-Problemen nach NIELSEN [115] wird jeder Verletzung ein Schweregrade (en. „severity rating“; SR) zugeordnet:

SR0 = Kein Problem

SR1 = Kosmetisches Problem: Behebung nicht zwingend erforderlich; Sollte jedoch behoben werden, wenn extra Projektzeit vorhanden ist.

SR2 = Geringfügiges Problem: Behebung erforderlich; geringe Priorität.

SR3 = Wesentliches Problem: Behebung erforderlich; hohe Priorität.

SR4 = Katastrophal: Behebung zwingend erforderlich.

5.2.1 Eignung für den Gebrauch während der Fahrt

Das Prinzip beschreibt, dass ein TICS-Dialog für den Gebrauch während der Fahrt geeignet ist, „wenn er die vorrangige Wichtigkeit der primären Fahraufgabe berücksichtigt, die Notwendigkeit einbezieht, dass ein Fahrer auf Reize des Verkehrsumfelds ebenso wie, wenn anwendbar, auf zusätzliche von TICS ausgehende Reize reagieren muss“ [14, S. 10]. Dem Prinzip sind die drei Dialogprinzipien

- Kompatibilität mit der Fahrzeugführung,
- Einfachheit und
- Timing / Prioritäten

untergeordnet [14, S. 10]. Tabelle 5.19 gibt einen Überblick zu den verletzten Anforderungen und Empfehlungen der drei Prinzipien. Größere Defizite zeigen sich hinsichtlich der Kompatibilität mit der Fahrzeugführung und den damit verknüpften Anforderungen an die visuellen und auditiven Anzeigen sowie hinsichtlich des Prinzips Timing / Prioritäten.

Tabelle 5.19: Bewertung der MMS anhand des Prinzips Eignung für den Gebrauch während der Fahrt [14, S. 10 – 15].

Prinzip	Verletzte Anforderung / Empfehlung	Verletzung und deren Schweregrad (SR)
Kompatibilität mit der Fahrzeugführung TICS-Gebrauch optimiert die Fähigkeit des Fahrers zur Ausführung der primären Fahraufgabe oder beeinflusst diese zumindest nicht nachteilig [14, S. 11].	„[Es] dürfen sich keine nachteiligen Auswirkungen auf die Reaktion des Fahrzeugs auf Bedienaktionen des Fahrers ergeben, wenn ein TICS auf primäre [und / oder sekundäre] Bedienelemente einwirkt“ [14, S. 11].	SR4: Aufhebung bzw. Deaktivierung der HAF-Funktion über Lenk- und Bremsengriffe erfordert momentan sehr starke Eingriffe des Fahrers, was sich sehr nachteilig auf die Reaktion und Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs auswirkt.
	„Displays und Bedienelemente für TICS-Dialoge müssen so gestaltet und positioniert werden, dass sowohl die Fahraufgabe als auch die TICS-Funktion ungehindert vollzogen werden können“ [14, S. 11]. Die Anforderungen von ISO 15006 und ISO 15008 müssen erfüllt sein [14, S. 11].	SR2: Auditive Anforderungen nach ISO 15006 sind zum Teil nicht erfüllt (Details siehe unten). SR3: Visuelle Anforderungen nach ISO 15008 sind zum Teil nicht erfüllt (Details siehe unten).
Einfachheit Interaktion mit TICS sollte so einfach und so selten wie möglich erfolgen; Informationsmengen und Interaktionen entsprechen dem Niveau der Aufgabe [14, S. 12].	„TICS-Dialoge, die durch ein Regel- oder Warnsystem die Fahrzeugdynamik beeinflussen, sollten auf maximale Verständlichkeit [...] ausgelegt sein“ [14, S. 12].	SR2: Die Verständlichkeit der Statussymbole ist für die Modi Auto und Manuell ohne Erfahrungswissen oder weitere Kontextinformationen fraglich.

Prinzip	Verletzte Anforderung / Empfehlung	Verletzung und deren Schweregrad (SR)
Timing / Prioritäten „kontinuierliche Aufmerksamkeit des Fahrers für [die] Verkehrssituation [wird] unterstützt oder nicht negativ beeinflusst“ [14, S. 13].	Die Gestaltung „sollte den physischen und mentalen Aufwand des Fahrers optimieren und den Fahrer so wenig wie möglich ablenken, es sei denn die Aufmerksamkeit des Fahrers ist gefordert“ [14, S. 12].	SR2: Hohe visuelle Anforderungen im („Alles in Ordnung“-) HAF-Modus durch simultane Statusanzeige auf allen verfügbaren Devices, insbesondere durch die permanente und saliente Statusanzeige über die LED-Leiste. SR2: Die Displays (insbesondere die LED-Leiste) sind sehr hell, salient und passen sich nicht an Lichtverhältnisse der Umgebung an. SR1: Zielführungssystem zeigt nur Informationen zur gesamten Route / Strecke, statt „Information, die auf die unmittelbare Umgebung und Fahraufgabe zugeschnitten ist“ [14, S. 13].
	„Ein TICS-Dialog muss den Informationsfluss in ausreichend kleine und prägnante Gruppen fassen, sodass diese leicht wahrgenommen werden können“ [14, S. 13].	
	→ „Zusammenhängende Informationen [...] werden in unmittelbarer räumlicher und zeitlicher Nähe dargestellt, damit die Meldung kürzer und leichter verständlich sein kann“ [14, S. 13].	SR2: In der Übergangsvorbereitung ist im Kombidisplay die Information zur verbleibenden HAF-Verfügbarkeit räumlich relativ weit von der Übernahmeaufforderung entfernt.
	→ „Die Menge der Textinformation, die das TICS bereitstellt, ist bezüglich der Länge beschränkt. In Karten wird soweit wie möglich auf Text verzichtet“ [14, S. 13].	SR2: Die detaillierte Kartenvariante beinhaltet sehr viel Textinformation.
	„Ein TICS sollte eine visuell dargestellte Information so lange wie nötig zur Verfügung stellen“ [14, S. 14].	
	→ „Sowohl Warnungen als auch Statusmeldungen bleiben aktiv [...], solange die auslösende Situation weiterbesteht“ [14, S. 14].	SR3: Nach dem Ablauf des Übernahme-Countdowns wechselt das System selbstständig in den manuellen Modus, ohne weitere Informationen zur noch bestehenden Situation bereitzustellen.
	→ „Die auf dem Display eines Navigationssystems dargestellte Position des Fahrzeugs wird in Echtzeit aktualisiert“ [14, S. 14].	SR2: Die Position des Egofahrzeugs auf der simulierten Strecke stimmt in der prototypischen Umsetzung nicht mit der auf der Karte angezeigten Position überein.

5.2.1.1 Auditive Anforderungen (ISO 15006)

Signalspezifikation

Die verwendeten Sounds werden anhand einer spektralen Frequenzanalyse mit der Software Adobe Audition CS 6 (Version 5.0) visuell hinsichtlich den Empfehlungen zum Signalspektrum überprüft (Datenträger: 05_Konformitätsbewertung/Ergebnisse/Spektralanalyse). Alle Hauptkomponenten der Sounds befinden sich im empfohlenen Frequenzbereich von 200 Hz bis 8000 Hz für Sprachsignale bzw. im Bereich von 400 Hz bis 2000 Hz für Tonsignale [116, S. 7]. Signalpegel-Aspekte wie z. B. Hörbarkeit, Angemessenheit oder Lautheit werden im Rahmen dieser Konformitätsbewertung nicht näher betrachtet. Hier wird auf die qualitativen Ergebnisse der Fahrsimulator-Studie (Kapitel 5.1) verwiesen. Bei der Validierung im Zielfahrzeug sollten diese Aspekte ausführlich adressiert werden.

Informationskodierung

Sprachkodierung sollte nach der ISO 15006 [116, S. 10] „nur dann verwendet werden, wenn die verfügbare Zeit ausreicht, um eine vollständige Meldung zu hören und eine angemessene Handlung zu planen“. Des Weiteren sollte „ein einheitliches und einfaches Vokabular verwenden[n]“ und die Sprachausgabe „zum geschriebenen Text konsistent sein“ [116, S. 10]. Letzteres ist im aktuellen Konzept nicht immer der Fall. Das Vokabular und die Anordnung der textuellen Informationseinheiten ist uneinheitlich. Beispielsweise wird in den visuellen Anzeigen die Entfernung bzw. Zeit bis zur „Übernahme“ angegeben, während die akustischen Ansagen die Entfernung bzw. Zeit bis zum Ende der „Automation“ wiedergeben (Tabelle 5.20). In den visuellen Anzeigen wird die Entfernungs- bzw. Zeitangabe an erster Stelle angezeigt, in den akustischen Ansagen an letzter Stelle (Tabelle 5.20). Die akustischen Ansagen zur Aktivierung und Deaktivierung des HAF-Modus verwenden das Wort „Autopilot“ zur Beschreibung des HAF-Modus, während bei Früh- und Akutwarnungen stattdessen „Automation“ verwendet wird (Tabelle 5.21).

Tabelle 5.20: Inkonsistenzen zwischen visuellen und akustischen Anzeigen in Vokabular und Anordnung der Informationseinheiten bei der Frühwarnung.

Kombidisplay / Tablet	Ansage: Früh-/Akutwarnung
„[Zeit / Entfernung] bis zur <i>Übernahme</i> “	„ <i>Automation</i> endet in [Zeit / Entfernung]“

Tabelle 5.21: Inkonsistentes Vokabular in den akustischen Ansagen.

Ansage: HAF De-/Aktivierung	Ansage: Früh-/Akutwarnung
„ <i>Autopilot</i> aktiviert“ „ <i>Autopilot</i> deaktiviert“	„ <i>Automation</i> endet in [Zeit / Entfernung]“

Komplexe und sicherheitskritische Meldungen

Die ISO 15006 empfiehlt die Bereitstellung von Steuerungsmechanismen für den Fahrer, um Sprachmeldungen bei Bedarf wiederholen und stoppen zu können [116, S. 11]. Solche Mechanismen sind derzeit nicht vorhanden.

Komplexe und insbesondere sicherheitskritische Meldungen „dürfen nicht ausschließlich auditiv ausgegeben [werden]“ [116, S. 11]. Eine redundante Ansprache anderer Sinneskanäle ist daher erforderlich, insbesondere im Hinblick auf Wahrnehmungsbeeinträchtigung wie

Hörschwächen oder Hintergrundgeräusche [116, S. 11]. Die ISO 15006 sieht diese Anforderung erfüllt, wenn eine weitere Darstellung erfolgt [116, S. 11]. Das entwickelte System erfüllt mit der redundanten visuellen Darstellung grundlegend diese Anforderung. Die Erweiterung um eine haptische Modalität könnte Redundanz und Sicherheit erhöhen.

5.2.1.2 Visuelle Anforderungen (ISO 15008)

Die Überprüfung der Anforderungen nach ISO 15008 basiert mitunter auf einem Abgleich mit Messungen unter diversen Beleuchtungsbedingungen, wie Nacht, Zwielicht, Tag mit diffusem Umgebungslicht oder Tag mit direktem Sonnenlicht, die künstlich simuliert werden müssen [76, S. 12 – 13]. Das vorliegende Design liegt in einer Variante mit einem negativen Anzeigemodus (= „helle Symbole auf einem dunklen Hintergrund“ [76, S. 16]) vor. Es wird angenommen, dass diese Variante in allen Bedingungen, also sowohl bei Tag- als auch Nachtfahrt genutzt werden soll, wofür der negative Anzeigemodus aufgrund der dunklen Umgebung im Fahrzeug generell geeignet ist [14, S. 16]. Im Folgenden wird das Design auf die jeweils kritischsten Anforderungen der Norm digital, ohne reale Simulation der Beleuchtungsbedingungen, überprüft. Diese Überprüfung dient in erster Linie als Orientierung für die Optimierung der Schnittstelle. Eine analoge Überprüfung hinsichtlich der Gegebenheiten im finalen Zielfahrzeug unter allen (Beleuchtungs-)Bedingungen wird dadurch nicht ersetzt.

Kontrastverhältnisse und Farbkombinationen

Die ISO 15008 fordert für den Nachtzustand ein Mindestkontrastverhältnis von 5:1 [76, S. 13]. Für die Berechnung der Kontrastverhältnisse wird der Color Contrast Checker von WebAIM [117] verwendet.

Tabelle 5.22: Kontrastverhältnisse der primär für Zeichen, Symbole und Hintergründe verwendeten Farben. Verwendete Farbkombinationen sind fett hervorgehoben, Unterschreitungen der Mindestkontrastanforderungen unterstrichen und farbig markiert.

	Schwarz #161B27	Rot #F10002	Orange #EF7F00	Türkis #42B59D	Blau #0180FF	Grau #232323	Hellgrau #CFCFCF	Blaugrau #8C9AAD	Weißgrau #EFEFEF	Weiß #FFFFFF
Farbe										
	1:1	<u>3,89:1</u>	<u>6,32:1</u>	<u>6,83:1</u>	<u>4,53:1</u>	1,10:1	11,05:1	<u>6,02:1</u>	<u>14,97:1</u>	<u>17,21:1</u>
	<u>3,89:1</u>	1:1	1,63:1	1,76:1	1,17:1	3,55:1	2,84:1	1,55:1	3,85:1	<u>4,43:1</u>
	<u>6,32:1</u>	1,63:1	1:1	1,08:1	1,39:1	5,77:1	1,75:1	1,05:1	2,37:1	<u>2,73:1</u>
	<u>6,83:1</u>	1,76:1	1,08:1	1:1	1,51:1	6,23:1	1,62:1	1,13:1	2,19:1	<u>2,52:1</u>
	<u>4,53:1</u>	1,17:1	1,39:1	1,51:1	1:1	4,14:1	2,44:1	1,33:1	3,30:1	3,80:1
	1,10:1	3,55:1	5,77:1	6,23:1	4,14:1	1:1	<u>10,09:1</u>	5,49:1	13,67:1	17,21:1
	11,05:1	2,84:1	1,75:1	1,62:1	2,44:1	<u>10,09:1</u>	1:1	1,84:1	1,35:1	1,56:1
	<u>6,02:1</u>	1,55:1	1,05:1	1,13:1	1,33:1	5,49:1	1,84:1	1:1	2,49:1	2,86:1
	<u>14,97:1</u>	3,85:1	2,37:1	2,19:1	3,30:1	13,67:1	1,35:1	2,49:1	1:1	1,15:1
	<u>17,21:1</u>	<u>4,43:1</u>	<u>2,73:1</u>	<u>2,52:1</u>	3,80:1	17,21:1	1,56:1	2,86:1	1,15:1	1:1

In Tabelle 5.22 sind die berechneten Werte für die im Kombidisplay und Tablet primär verwendeten Farben aufgelistet. Verwendete Farbkombinationen sind fett hervorgehoben. Auftretende Unterschreitungen der Mindestkontrastanforderungen von 5:1 sind unterstrichen und rot hervorgehoben. Insbesondere bei der Nutzung zur Anzeige wichtiger Statusinformationen oder Warnungen müssen bei Nichterfüllung der Anforderungen geeignete Maßnahmen getroffen werden. Alternativ oder zusätzlich zur Verwendung anderer Farbkombinationen können Umrisse oder Schattierungen verwendet werden [76, S. 13 – 15].

Zeichengrößen

Die DIN EN ISO 15008 beschreibt Zeichenhöhen anhand ihrer Eignung für Fahrerinformations- und Assistenzsysteme mit den Begriffen Minimum, Akzeptabel und Empfohlen, wofür in der Norm entsprechende Mindest-Zeichenhöhen für die Höhe von Versalien in Form von Seh winkeln angegeben werden [76, S. 17]. Die für eine bestimmte Klasse erforderliche Zeichenhöhe x ist abhängig vom Sehabstand des Fahrers d und kann durch umstellen der in der ISO 15008 angegebenen Gleichung, nach Gl. (5.2) berechnet werden, wobei α_R der in Radiant (rad) angegebene (Mindest-)Sehwinkel ist, der erforderlich für die Erfüllung der jeweiligen Eignung ist.

$$x = \alpha_R \cdot d \quad (5.2)$$

Zur Abmessung des maximalen Sehabstands des Fahrers zu den Displays wird der hinterste Punkt der zyklischen Augenellipse des Fahrers bestimmt [76, S. 25]. Dieser wird im Rahmen der Arbeit näherungsweise über die Stammlänge des 95. Perzentil Mann bestimmt. Auf Basis des Werts der deutschen Reihenmessung SizeGERMANY [118] von $h_{Stamm_{95}} = 992$ mm wird die Höhe der zyklischen Augenellipse mit $h_{Augenellipse} = 900$ mm und der rückwärtigen Entfernung zur Kopflehne von $d_{Augenellipse_Kopflehne} = 150$ mm approximiert. Basierend darauf wird bei maximal möglicher Sitzverstellung nach hinten und oben, der Sehabstand mittig zur Lenkachse gemessen und eine senkrechte Blickrichtung auf die Displays angenommen. Die gemessenen Sehabstände von diesem Punkt zu den jeweiligen Displays sowie die Displaymaße sind Tabelle 5.23 zu entnehmen. Der Sehabstand des Tablets bezieht sich auf die Position in der Halterung. Bei Handhaltung des Tablets kann dieser ggf. deutlich geringer sein.

Tabelle 5.23: Displaymaße und gemessene Sehabstände.

Display	Breite		Höhe		Pixelhöhe in mm	Sehabstand in mm
	in mm	in px	in mm	in px		
Kombidisplay	295	1920	112	720	0,156	1027
Tablet	207	1280	130	800	0,163	908

Auf Basis der gemessenen Werte (Tabelle 5.23) und der in der ISO 15008 für die Zeichenhöhe angegebenen Sehwinkel-Werte werden die entsprechenden Zeichenhöhen-Eignungen für das Kombidisplay und das Tablet nach Gl. (5.2) berechnet (Tabelle 5.24).

Tabelle 5.24: Sehwinkel und Zeichenhöhen entsprechend ihrer Eignung für Fahrerinformations- und Assistenzsysteme nach der DIN EN ISO 15008 [76, S. 17].

Eignung	Sehwinkel		Kombidisplay Zeichenhöhe		Tablet Zeichenhöhe	
	in arcmin	in rad	in mm	in px	in mm	in px
Empfehlenswert	20	$5,815 \cdot 10^{-3}$	5,972	38	5,280	32
Akzeptabel	16	$4,652 \cdot 10^{-3}$	4,778	31	4,224	26
Minimum	12	$3,489 \cdot 10^{-3}$	3,583	23	3,168	19

Die Zeichenhöhen (Tabelle 5.24) werden in Pixel umgerechnet, auf Ganzzahlen gerundet und visuell mit den in den Designs verwendeten Höhen verglichen. Ist eine empfehlenswerte Zeichenhöhe erreicht, wird diese in den Abbildungen 5.31 – 5.35 grün markiert. Ist eine akzeptable oder minimale Höhe erreicht, entsprechend gelb oder orange. Ist die minimale Zeichenhöhe unterschritten, wird der Text rot markiert.

- 38 px | Empfehlenswert
- 31 px | Akzeptabel
- 23 px | Minimum

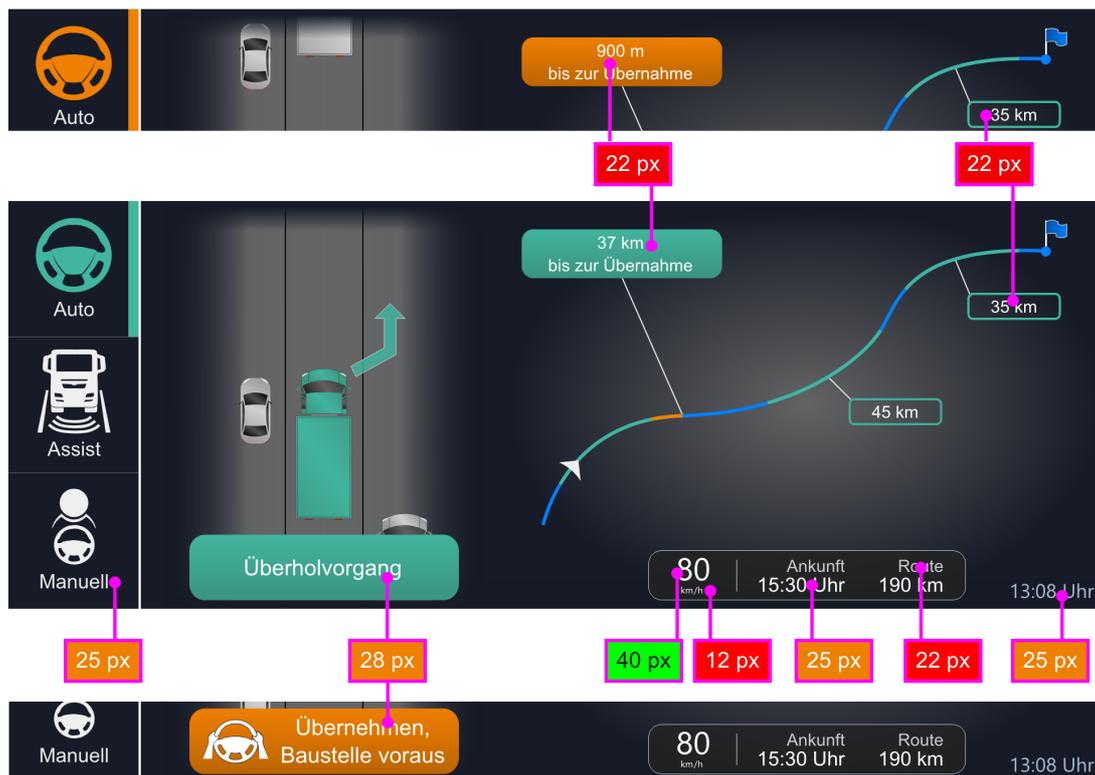


Abbildung 5.31: Bewertung der Zeichenhöhen im Kombidisplay Teil 1/2.

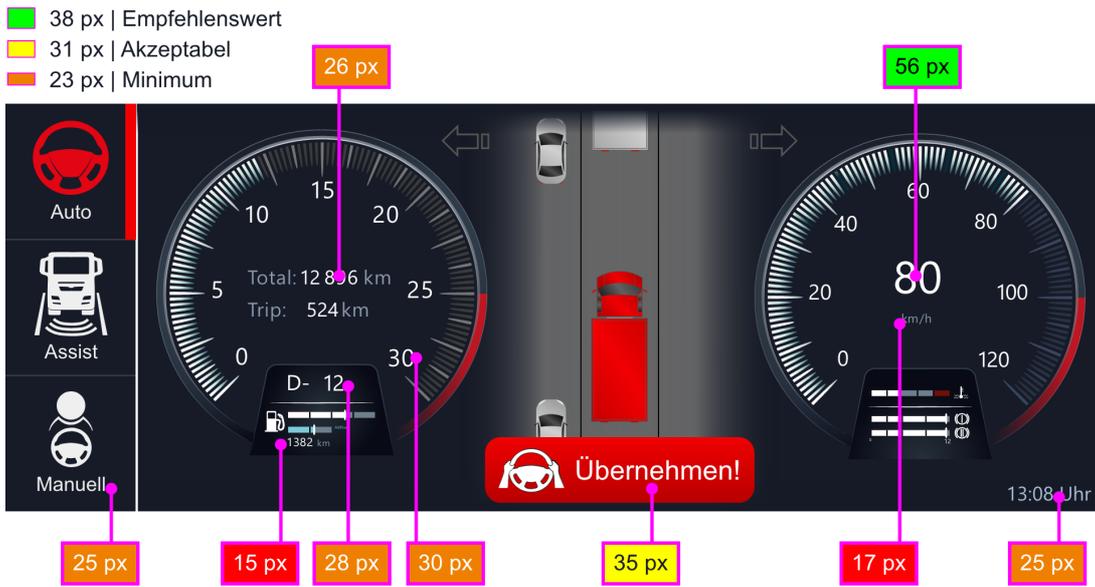


Abbildung 5.32: Bewertung der Zeichenhöhen im Kombidisplay Teil 2/2.



Abbildung 5.33: Bewertung der Zeichenhöhen im Tablet Teil 1/3.

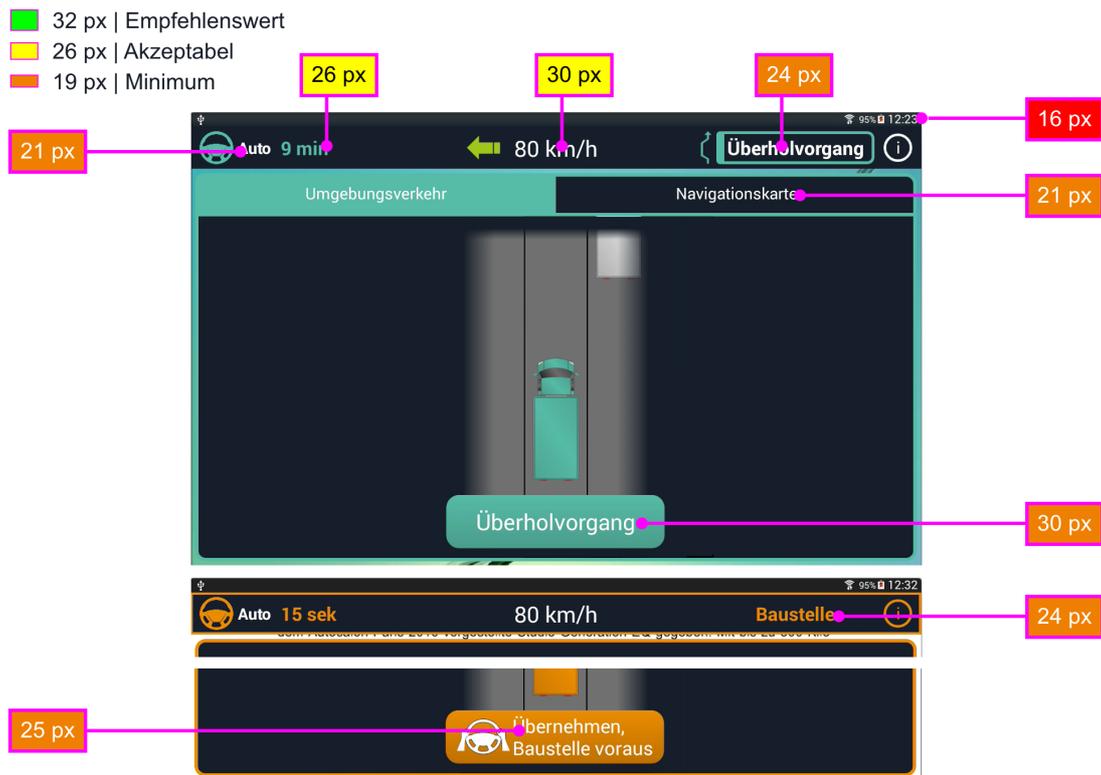


Abbildung 5.34: Bewertung der Zeichenhöhen im Tablet Teil 2/3.



Abbildung 5.35: Bewertung der Zeichenhöhen im Tablet Teil 3/3.

Reflexionen und Spiegelungen

„Für den Fahrer sichtbare Reflexionen und Spiegelungen sollten auf ein Minimum reduziert werden“ [76, S. 22]. Die von der LED-Leiste erzeugten Spiegelungen und Reflexionen behindern die direkte und indirekte Sicht aus dem Fahrzeug (Abbildung 4.2). Die LED-Leiste sollte entsprechend angepasst werden. Mögliche Ansatzpunkte zur Optimierung sind Ausrichtung, Position, Halterung oder Größe.

5.2.2 Eignung für TICS-Aufgaben

„Ein Dialog ist für eine TICS-Aufgaben geeignet, wenn er den Fahrer bei der sicheren, effizienten und effektiven Erfüllung dieser Aufgabe unterstützt“ [14, S. 15]. Dem Prinzip sind die beiden Dialogprinzipien

- Konsistenz und
- Steuerbarkeit

untergeordnet [14, S. 10]. Tabelle 5.25 gibt einen Überblick zu den verletzten Anforderungen und Empfehlungen der beiden Prinzipien. Insbesondere zeigen Inkonsistenzen in der Informationsdarstellung Optimierungsbedarf auf.

Tabelle 5.25: Bewertung der MMS anhand des Prinzips Eignung für TICS-Aufgaben [14, S. 15 – 17].

Prinzip	Verletzte Anforderung / Empfehlung	Verletzung und deren Schweregrad (SR)
Konsistenz Interaktionen mit TICS und deren Verhalten erfolgt anhand „feste[r] Regeln und einer inneren Logik“ [14, S. 15].	„Informationsdarstellung und [...] Dialoge müssen hinsichtlich Modus, Ort, Ausrichtung und Dialogmanagement konsistent sein“ [14, S. 15].	SR3: Inkonsistente Verwendung der türkisen Farbe: Bei den Lenkradtasten bedeutet türkises Leuchten, dass der HAF-Modus verfügbar ist. Bei den anderen Displays bedeutet türkis, dass der HAF-Modus aktiviert ist und alles ist in Ordnung ist. SR2: Symbole im Statusindikator sind uneinheitlich in Bezug auf Größe, Detaillierungsgrad und Stil (z. B. Manuell- vs. Assist-Symbol). SR2: Symbol zum Modus-Wechsel auf Lenkradtasten ist nicht konsistent mit den Symbolen der anderen Displays.
	„[...] Informationen über aktuelle TICS-Zustände werden entweder kontinuierlich oder nach Aufforderung angezeigt“ [14, S. 16].	SR2: Informationen, wie z. B. den Abstand zum Vorderfahrzeug oder die Zielgeschwindigkeit des Systems, sind dem Fahrer nicht zugänglich.
Steuerbarkeit Der Fahrer muss „sowohl Beginn und Abschluss des Dialogs steuern [können], als auch die Art und Weise und die Bedingungen, unter denen der Dialog auftritt“ [14, S. 16].	„Mit Ausnahme von rechtlich erforderlichen Meldungen sollte der Fahrer in der Lage sein, auszuwählen, welche der von einem TICS zur Verfügung gestellten Informationen tatsächlich angezeigt werden“ [14, S. 17].	SR1: Der Fahrer kann nicht steuern wann, wo und wie vorhandene Informationen beispielsweise zu Übernahmegrund, HAF-Verfügbarkeit oder Vorderfahrzeug angezeigt werden.

5.2.3 Eignung für den Fahrer

„Ein TICS-Dialog ist für den Fahrer geeignet, wenn er die Erwartungen, Merkmale und Grenzen des Fahrers in Betracht zieht“ [14, S. 17]. Dem Prinzip sind die vier Dialogprinzipien

- Selbstbeschreibungsfähigkeit,
- Konformität mit Fahrererwartungen
- Fehlertoleranz und
- Lernfähigkeit

untergeordnet [14, S. 17 – 19]. Tabelle 5.26 gibt einen Überblick zu den verletzten Anforderungen und Empfehlungen der vier Prinzipien. Es zeigen sich größere Defizite hinsichtlich der Selbstbeschreibungsfähigkeit der Anzeigen und der Konformität mit Fahrererwartungen.

Tabelle 5.26: Bewertung der MMS anhand des Prinzips Eignung für den Fahrer [14, S. 17 – 19].

Prinzip	Verletzte Anforderung / Empfehlung	Verletzung und deren Schweregrad (SR)
Selbstbeschreibungsfähigkeit Die „wesentliche Bedeutung der Information [wird] unmissverständlich vermittelt und [...] der Fahrer [ist sich] zu jeder Zeit bewusst [...], was während eines Dialoges getan werden kann oder getan werden muss“ [14, S. 17].	„Displays [...] sollten ausschließlich Symbole, Signale, Kontroll-Leuchten, graphische Elemente und Terminologie [...] enthalten, die für den Fahrer wahrscheinlich verständlich sind“ [14, S. 18].	SR2: Die Verständlichkeit der Symbole für die Modi ist ohne Erfahrungswissen oder weitere Kontextinformationen fraglich. (siehe auch Prinzip Einfachheit) SR2: Türkise Markierung der HAF-Strecke macht nicht klar, dass es trotzdem zu einer Übernahme kommen kann. SR1: Farbige Kontur der Route wird in gängigen Navigationsgeräten und Kartendarstellungen bereits als Kodierung von Verkehrsfluss oder Streckenzustand genutzt.
Konformität mit Fahrererwartungen „Merkmale des Fahrers wie Bildungsniveau, Erfahrung und allgemein anerkannte Gewohnheiten [werden] berücksichtigt“ [14, S. 18].	„Anzeigen und Bedienelemente sollten inhaltlich und stilistisch so gestaltet sein, dass sie vom Fahrer verstanden werden und angemessene Reaktionen auslösen“ [14, S. 18]. → „Der Fahrer kann den Detaillierungsgrade von TICS-Graphiken selber auswählen“ [14, S. 18].	SR3: Übernahmegrund wird nicht in jeder Übernahmesituation angegeben. Durch Angabe des Grundes kann dem Fahrer ermöglicht werden, Erfahrungswissen abzurufen und so besser auf die Situation zu reagieren. SR2: Die Farbe Blau wird häufig zur Darstellung von automatisierten Funktionen genutzt. Im bestehenden Design wird blau jedoch im manuellen Modus als Akzentfarbe verwendet. SR2: Die abstrakte Navigationskarte bietet zu wenig Informationen zu Umgebung und Verkehrsgeschehen. Sie ist zu ungenau, um angemessene Reaktionen auszulösen.

Prinzip	Verletzte Anforderung / Empfehlung	Verletzung und deren Schweregrad (SR)
	<p>„Vokabular und Syntax des Dialogs sollten konsistent und einfach sein sowie auf anerkannte Symbole, Abkürzungen und Erwartungen der Bevölkerungen des Landes zurückgreifen und in einer Weise angegeben werden, die von der anvisierten Nutzergruppe wahrscheinlich verstanden wird“ [14, S. 18].</p> <p>→ Verwendung „[a]nerkannte[r] Fahrzeugsymbole, wie in der ISO 2575 beschrieben“ [14, S. 18].</p>	<p>SR2: Im Statusindikator werden zum Teil nicht anerkannte Symbole verwendet. Diese sind ohne weitere Information oder Erfahrungswissen schwer verständlich.</p>
<p>Fehlertoleranz Trotz „offensichtlicher Eingabefehler [kann] das angestrebte Ziel mit entweder keiner oder nur minimalen Fehlerkorrektur durch den Fahrer erreicht werden [14, S. 19].</p>	–	–
<p>Lernfähigkeit Wenn mit dem System nicht vertraute Nutzer, im Speziellen „Anfänger beim ersten Versuch und ohne weiteres Training oder Weiterbildung verstehen, wie Aufgaben auszuführen sind“, gilt ein Dialog „als leicht erlernbar“ [14, S. 19]. „Ein solcher Dialog erfordert einen niedrigen Aufwand und geringen Zeitaufwand [...] und hilft dem Nutzer, seine Nutzungskompetenz effizient und effektiv zu verbessern“ [14, S. 19].</p>	<p>„Informationen zu Regeln und Modellen, die der Anwendung zugrunde liegen, sollten dem Nutzer bei Aufforderung angezeigt werden“ [14, S. 19].</p>	<p>SR1: Mehrere solcher zugrundeliegenden Informationen wie beispielsweise Übernahmegrund, erkannte Verkehrszeichen oder der Abstand zum Vorderfahrzeug sind dem Nutzer nicht zugänglich.</p>

6 Diskussion

Die entwickelte MMS erweist sich als geeignete Basis, um den Herausforderungen des HAF im Lkw entgegenzutreten. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Fahrsimulatorstudie und der Konformitätsbewertung interpretiert und kritisch betrachtet, um die Forschungsfragen aus Kapitel 3 zu beantworten und Optimierungspotenziale abzuleiten. Mit diesen wird die MMS konzeptionell und gestalterisch optimiert.

6.1 Interpretation der Ergebnisse

Die mit den standardisierten Fragebögen erfassten Daten spiegeln sich zum Großteil in den qualitativen Befragungen sowie im Mix and Match wieder. Damit kann das Forschungsdesign als in sich stimmig und adäquat bewertet werden.

Tabelle 6.1 fasst die Beantwortung der drei Fragestellungen mit formulierten Hypothesen in zusammen. In den darauffolgenden Abschnitten werden die Erkenntnisse zu allen acht Forschungsfragen diskutiert.

Tabelle 6.1: Übersicht zur Beantwortung der drei Forschungsfragen mit Hypothesen (* = Hypothese abgelehnt, ✓ = Hypothese angenommen).

Forschungsfragen und Hypothesen	Antwort
1. Soll dem Fahrer die verbleibende HAF-Verfügbarkeit angezeigt werden?	
1.H ₀ Aus Fahrersicht ist es nicht wünschenswert, die verbleibende HAF-Verfügbarkeit anzuzeigen.	✘
1.H ₁ Aus Fahrersicht ist es wünschenswert, die verbleibende HAF-Verfügbarkeit anzuzeigen.	✓
2. Wie soll die verbleibende HAF-Verfügbarkeit angezeigt werden?	
2.H ₀ Aus Fahrersicht ist es wünschenswert, die verbleibende HAF-Verfügbarkeit als Entfernung in Metern oder Kilometern anzugeben.	✓
2.H ₁ Aus Fahrersicht ist es wünschenswert, die verbleibende HAF-Verfügbarkeit als Zeit in Sekunden, Minuten oder Stunden anzugeben.	✘
3. Wie wird der Wechsel zwischen 3-stufigem (Türkis – Orange – Rot) und 2-stufigem (Türkis – Rot) „Ampelkonzept“ bewertet?	
3.H ₀ Aus Fahrersicht ist es wünschenswert keinen Wechsel zwischen verschiedenen Ampelkonzepten zu verwenden.	✘
3.H ₁ Aus Fahrersicht ist es wünschenswert, je nach Situation eine der beiden Varianten zu verwenden, also einen Wechsel zwischen verschiedenen Ampelkonzepten zu verwenden.	✓

6.1.1 Angabe der HAF-Verfügbarkeit

Die beiden Varianten mit Angabe der verbleibenden HAF-Verfügbarkeit, also Variante B (Zeitangabe) und Variante C (Entfernungsangabe), erzielen, wie erwartet, in der inferenzstatistischen Auswertung der standardisierten Tests zum großen Teil signifikant bessere Ergebnisse. Variante A (keine Angabe) wird mit überwiegend großen Effekten (Spearman's $\rho > 0,50$) schlechter bewertet:

- **Kontrollierbarkeit:**
Alle Varianten erreichen geringe Kritikalitätsbewertungen in den sechs Szenarien. Die Varianten mit Angaben zur HAF-Verfügbarkeit erzielen signifikant bessere Ergebnisse, als die Variante ohne Angabe. Variante C schneidet in Übernahme-situationen mit Übernahmepvorbereitung mit einem mittleren Effekt (Spearman's $\rho > 0,468$) signifikant besser ab, als Variante B. Die Angabe von weiteren Informationen zur verbleibenden HAF-Verfügbarkeit kann somit als positiver Einfluss auf die Kontrollierbarkeit von HAF-Systemen betrachtet werden.
- **Beanspruchung:**
Die subjektive Bewertung der Beanspruchung mit dem DALI ergibt variantenübergreifend eine geringe bis mittlere Beanspruchung. In den deskriptiven Plots ist erkennbar, dass Variante A in sechs der sieben Subskalen, außer bei der Beeinträchtigung durch die Nebenaufgabe, eine höhere Beanspruchung, als die Varianten mit Angaben zur HAF-Verfügbarkeit erzielt. Variante C schneidet gegenüber Variante A zudem hinsichtlich der Beeinträchtigung durch die Nebenaufgabe sowie gegenüber Variante B hinsichtlich des erfahrenen Stressniveaus signifikant besser ab. Variante C erzeugt also mit der Entfernungsangabe den geringsten Stress bei der Nutzung des HAF-Systems.
- **Akzeptanz:**
Auch bezüglich der Akzeptanz werden alle drei Varianten gut bewertet. Die Varianten mit Angabe der HAF-Verfügbarkeit werden hinsichtlich Zufriedenheit und Nützlichkeit signifikant besser bewertet als Variante A. Die Akzeptanz wird also durch die zusätzliche Information durch die Angabe der HAF-Verfügbarkeit positiv beeinflusst. Variante C schneidet in Bezug auf die Nützlichkeit mit großem Effekt (Spearman's $\rho = 0,868$) signifikant besser ab als Variante B.
- **User Experience:**
Analog zu den anderen standardisierten Tests, werden alle Varianten bezüglich den sechs Dimensionen des UEQ gut bewertet. Die sehr gute Bewertung der Durchschaubarkeit spricht dafür, dass die MMS nachvollziehbar gestaltet ist und von den Nutzern verstanden wird. In der deskriptiven Auswertung wird ersichtlich, dass die Angabe der HAF-Verfügbarkeit in allen Dimensionen einen positiven Effekt hat. Dies wirkt sich am stärksten hinsichtlich der Steuerbarkeit aus, was durch große Effekte und signifikante paarweise Vergleiche der Varianten B und C zur Variante A bestätigt wird. Die Effizienz zeigt einen signifikanten Unterschied mit großem Effekt zwischen den Varianten A und C.

Die Ergebnisse aus den standardisierten Tests spiegeln sich in der Zwischenbefragung zu Informationsgehalt und Wohlbefinden, in den weiteren qualitativen Anmerkungen und Kommentaren, wie auch im direkten Variantenranking der VP wieder. In Letzterem bewerten 18 VP Variante C und 12 VP Variante B als beste Variante, während nahezu alle VP (29 von 30) Variante A am schlechtesten bewerten.

Zusammenfassend kann Hypothese 1.H₁ („Aus Fahrersicht ist es wünschenswert, die verbleibende HAF-Verfügbarkeit anzuzeigen“) angenommen werden. Variante C erzielt signifikant bessere Werte als Variante B hinsichtlich der Kontrollierbarkeit bei geplanten Übernahmen (Orange – Rot), hinsichtlich der Beeinträchtigung durch die Nebenaufgabe und hinsichtlich der Nützlichkeit. Auf Basis dieser Ergebnisse wird die Nullhypothese 2.H₀ („Aus Fahrersicht ist es wünschenswert, die verbleibende HAF-Verfügbarkeit als Entfernung in Metern oder Kilometern anzugeben“) beibehalten. Folglich passt Variante C besser in das mentale Modell der Zielgruppe. Entfernungsangaben werden in Wegweisern und Anweisungen von Navigationsgeräten verwendet und sind der Zielgruppe daher vertrauter als Zeitangaben.

Die Ergebnisse müssen jedoch vor dem Hintergrund der stark ausgeprägten Technikbereitschaft der Stichprobe betrachtet werden. Es lässt sich vermuten, dass die Stichprobe tendenziell eher zu „technischeren“ Angaben tendiert. Der große Anteil von 12 VP, die eine Angabe in Zeiteinheiten bevorzugen, sollte nicht vernachlässigt werden. Zumal sich mehrere Personen bei der Wahl zwischen Variante B und C länger Zeit lassen. Die nahezu gleiche Verteilung der Auswahlhäufigkeit von Entfernungs- und Zeitangaben im Mix and Match von Tablet und Kombiinstrument bestärken dies ebenfalls. Um diesen Umständen gerecht zu werden, könnte das System für den Nutzer adaptierbar gestaltet werden, sodass dieser zwischen Zeit- und Entfernungsangaben wählen kann. Alternativ könnte der Vorschlag von VP 10 in Betracht gezogen werden, Entfernungs- und Zeitangaben zu kombinieren. Diese könnten simultan angezeigt werden oder situationsabhängig verwendet werden, z. B. Zeitangaben bei Frühwarnungen und Entfernungsangaben bei Akutwarnungen.

Der generellen Tendenz zu Variante C steht die Bewertung der akustischen Anzeigen entgegen. Während bei der Frühwarnung Variante B am besten abschneidet, wird Variante A bei der Akutwarnung besser als Variante B und C bewertet. Eine mögliche Erklärung könnte der starke implizite Aufforderungscharakter der Ansage sein, der die Notwendigkeit für eine unmittelbar nötige Handlung effektiver kommuniziert, als die anderen Varianten. Eine Kombination aus diesem Aufforderungscharakter und der Angabe von Entfernungs- und/oder Zeitinformation könnte die Effektivität der Warnung potentiell weiter steigern.

6.1.2 Ampelkonzept

Bei der Bewertung der Ampelkonzepte entscheidet sich die Mehrheit (17 VP) dafür, beide Konzepte wie aktuell umgesetzt, also situationsabhängig zu nutzen. Die 17 VP verstehen, dass geplante und ungeplante Übernahmen auftreten können. 9 VP davon geben an, das dreistufige gegenüber dem zweistufigen Konzept zu bevorzugen. 13 VP entscheiden sich für die konsistente Nutzung des dreistufigen Konzepts. Nach Möglichkeit wünschen sich die VP also immer eine Frühwarnung. Das steht im Einklang mit den Antworten zu den Übernahmezeiten: 22 VP finden 60 s passend für die Vorbereitungsphase, aber nur 12 VP finden 10 s passend für die unmittelbare Übernahmephase.

Auf Basis der Ergebnisse wird die Gültigkeit der Hypothese 3.H₁ (Kapitel 3) angenommen. Es sollte immer, wenn möglich, das dreistufige Ampelkonzept mit Vorbereitungszeit verwendet

werden. Bei unmittelbar nötigen Übernahmen sollte direkt von der türkisen in die rote Phase übergegangen werden. Damit dem Fahrer klar ist, dass eine Übernahmeaufforderung kurzfristig auftreten kann, sollte diese Unsicherheit des Systems auch in der türkisen Phase über die Anzeigen und das Wording kommuniziert werden.

6.1.3 Übernahmezeit

Die verfügbare Zeit bei Übernahmen mit Vorbereitungsphase (60 s) wird von den VP als angemessenes Zeitfenster bewertet. Tendenziell möchten die VP bei der unmittelbaren Übernahme mehr Zeit zur Verfügung haben. Dieser Nutzerwunsch deckt sich mit den Ergebnissen aus früheren Studien (z. B. [49, S. 2872]).

Die Wissenschaft hat sich weitestgehend darauf geeinigt, dass 10 s für eine komfortable Übernahme ausreichend sind [3, S. 77]. Die vorgeschlagenen Zeiten entstammen aktuell zum größten Teil aus Fahrsimulatorstudien. Da es noch Forschungsbedarf bezüglich der Validität von Simulationen [71, S. 47] gibt, ist die direkte Übertragbarkeit ins Realfahrzeug allerdings fraglich. Ein größeres Zeitfenster würde deutlich höhere Anforderungen an die Systemleistung stellen bzw. an die Fähigkeit des Systems mittels Umgebungserfassung „vorauszusehen“.

Dennoch ist der Wunsch nach einer längeren Ankündigung von nötigen Übernahmen vorhanden und gerechtfertigt. Insbesondere bei längerer HAF-Fahrt im Fernverkehr oder bei der Ausführung aufwendigerer fahrfremder Tätigkeiten, die vor der Übernahme sicher beendet werden müssen. Andererseits könnte eine Langzeitnutzung von HAF-Systemen dazu führen, dass die Nutzer 10 s oder sogar weniger angemessen finden. Zu solchen Langezeitnutzungen liegen noch keine fundierten Erkenntnisse vor. Es sollte in jedem Fall eine angemessene Mindestübernahmezeit gewährleistet werden, um etwaige Fehler des Systems oder des Fahrers kompensieren zu können.

6.1.4 Fahrerzustand und Rückfallebene

Nach dem Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft [54, S. 16] sollte eine HAF-Fahrt die Dauer von 15 Minuten nicht überschreiten, ohne dass der Fahrer Nebentätigkeiten ausführt. Es ist daher wichtig zu wissen, was der Fahrer tut und in welchem Zustand er sich befindet. Auch bezüglich der zu gewährenden Übernahmezeit sollte der aktuelle Fahrerzustand miteinbezogen werden [54, S. 16], damit der Fahrer trotz großer Ablenkung oder Müdigkeit sicher übernehmen kann.

Je nach Situation und Fahrerzustand sollte die Rückfallebene überdacht werden. FLEMISCH ET AL. [55, S. 274] raten dazu, Systemübergänge, bei denen sich die Automation abschaltet, ohne dass sichergestellt wird, dass der Fahrer bereit zur Übernahme ist, nach Möglichkeit zu vermeiden. Die Mehrheit der VP aus der Fahrsimulatorstudie (18 von 30) bevorzugt den assistierten Modus als Rückfallebene, sodass Funktionen wie ACC und LKA weiterhin aktiv bleiben. Dadurch könnte potentiell die Sicherheit in kritischen Situationen erhöht werden. Wird der HAF-Modus aufgrund eines Sensorausfalls beendet, kann dies auch die Funktionsfähigkeit des ACC betreffen. Eine solche Situation könnte in Modus-Verwirrung enden, da die Fahrer nicht direkt nachvollziehen können, wann welche Systemkomponenten noch aktiv sind bzw. bleiben. Mehr als ein Drittel der VP (11 von 30) bevorzugt einen Wechsel in den manuellen Modus. Durch die klare Trennung von automatisierter und manueller Fahrt könnte das Modus-Verständnis gesteigert bzw. zumindest aufrecht erhalten werden.

Eine Kompromisslösung wie von VP 8 und 25 vorgeschlagen könnte als weitere Option in Betracht gezogen werden. Beispielsweise könnte bei manueller Deaktivierung des HAF-Modus in den manuellen Modus und bei systembedingter Deaktivierung in den Assist-Modus geschaltet werden. Ein solches Systemverhalten ist jedoch inkonsistent und sollte hinsichtlich Kontrollierbarkeit im Sinne des Code of Practice [62] und des Modus-Verständnisses der Nutzer überprüft werden. Dies ist insbesondere in Bezug auf die Langzeitnutzung relevant, wenn beispielsweise eine seltene Situation wie ein Sensorausfall zu einem ungewohnten Systemverhalten führen würde.

6.1.5 Systemverständnis

Das Systemverständnis von Anzeigen, Bedienelementen und Informationseinheiten fällt tendenziell positiv aus. Die Fahrsimulatorstudie und die Konformitätsbewertung zeigen allerdings einige Optimierungspotenziale auf. Im Folgenden werden die wesentlichen Aspekte diskutiert.

6.1.5.1 Symbole

Die verwendeten Symbole werden in der Nachbefragung überwiegend verstanden. Es ist nicht bekannt, ob die Symbole auch ohne Erfahrungswissen, welches die Befragten durch die drei Fahrten erhalten haben, klar verständlich sind. Das Statusindikator-Symbol für den Assist-Modus wird in der Fahrsimulatorstudie nicht im aktiven Modus erlebt und von 20 % der Stichprobe nicht korrekt verstanden. Das Verständnis des anderen Stichprobenteils kann darauf zurückgeführt werden, dass, auf Basis der Erfahrung aus den drei Versuchsfahrten und dem daraus resultierenden Verständnis für die anderen Funktionen, die Bedeutung des Assist-Modus antizipiert wird. Das Symbol für den HAF-Modus wird zwar nur von einem Zehntel fehlinterpretiert, allerdings mit gravierenden Missverständnissen.

Die Statusindikator-Symbole sind aktuell unterschiedlich und inkonsistent gestaltet. Es zeigen sich Unterschiede in Größe, Detaillierungsgrad bzw. Komplexität, Standardkonformität, der gewählten Perspektive und der Dimensionalität der Darstellung. Um die Verfügbarkeit von Funktionen anzuzeigen, wird zwischen Kontur- und Flächendarstellung gewechselt, wodurch eine weitere Inkonsistenz im Stil hinzukommt. Die Symbole sollten überarbeitet werden, wobei auf eine konsistente und einfache Gestaltung sowie auf die Konformität mit anerkannten Symbolen, z. B. bezüglich der ISO 2575 [88], zu achten ist (Abbildung D.1). Da das Verständnis der Statusindikator-Symbole ein wesentlicher Aspekt des Modusverständnisses darstellt, sollte überprüft werden, wie gut das Verständnis der Zielpopulation von den Symbolen mit und ohne Text-Labels bei Erstkontakt, also ohne eine vorherige Nutzungserfahrung, ist.

Die Navigationsanweisung im HUD wird vom Großteil der VP verstanden (28 von 30). Ebenso das Übernahme-Symbol (29 von 30). Letzteres ist den VP auch von der Anzeige der Übernahmeaufforderung in anderen Displays bekannt.

6.1.5.2 Modi-Anzeige

Der Großteil der Stichprobe möchte alle drei im Konzept angedachten Modi mit Symbol und Text-Label zeitgleich angezeigt bekommen. Das spricht dafür, dass die drei Modi überwiegend verstanden werden und deren Anzeige auch im nicht-aktiven Zustand als relevant erachtet wird.

Das Assist-Modus-Symbol fasst die beiden Funktionen ACC und Spurhalteassistent zusammen. Die Verfügbarkeit und Aktivität einer einzelnen Funktion kann damit nicht gesondert angezeigt werden. Beispielsweise kann nicht dargestellt werden, wenn nur ACC, aber nicht LKA aktiv ist. Dies sollte im Weiteren berücksichtigt werden. Die Bestandteile des Icons könnten beispielsweise deutlicher getrennt werden, um einzelne Funktionen und deren Zustand visuell darzustellen.

Über die Hälfte der Studienteilnehmer (16 VP) verstehen zumindest Teile der Modus-Anzeige über die Lenkradtasten falsch. Dies ist auf die inkonsistente Gestaltung zu den anderen Anzeigen zurückzuführen. Die LED-Leiste leuchtet türkis, wenn der HAF-Modus aktiv ist, aber nicht wenn dieser verfügbar ist; die Lenkradtasten leuchten nicht bei aktivem HAF-Modus, aber türkis wenn dieser verfügbar ist. Dies sollte, auch hinsichtlich der Anforderungen der ISO 15005, behoben werden, um Fehlinterpretationen und Modus-Verwirrungen zu vermeiden. Um die Konsistenz zu den anderen visuellen Anzeigen wie Tablet und Kombidisplay herzustellen, sollten die Lenkradtasten weiß leuchten, wenn HAF verfügbar ist.

6.1.5.3 Umgebungsverkehr und Manöveranzeige

Generell ist die Aufsicht-Anzeige der Umgebung inkompatibel mit dem internen Modell des Fahrers bzw. mit dessen Perspektive auf den Verkehr (siehe hierzu [65, S. 269 – 270]). Der Umgebungsverkehr und die Manöveranzeige werden dennoch sehr gut verstanden. Kleinere Fehlinterpretationen (von 2 VP) können auf mangelnde Systemerfahrung zurückgeführt werden und würden sich bei längerer Nutzung vermutlich von selbst klären. Es zeigen sich keine Verständnisprobleme aufgrund der Inkompatibilität. Daher wird die Aufsicht-Anzeige, die eine übersichtliche Rundum-Sicht ermöglicht, beibehalten.

Der Fortschrittsbalken zum Manövriervorgang in der Statusleiste des Tablets wird sehr gut verstanden und sehr positiv bewertet. Die Anzeige informiert den Nutzer in effektiver Weise über die Vorgänge des Systems. Die Anzeige des Umgebungsverkehrs und die Manöveranzeige sind gut geeignet, um Vertrauen zwischen System und Nutzer zu schaffen.

6.1.5.4 Navigationskarte

Die Navigationskarte wird in ihrer abstrakten Variante vom Großteil der Stichprobe (25 VP) verstanden. Die Markierung von Streckenabschnitten mit den Farben Türkis, Orange und Rot wird mehrmals als Kodierung für Verkehrsbehinderungen, wie z. B. Staus und Baustellen, bzw. als Visualisierung der Verkehrslage verstanden. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Farbe in gängigen Navigationsgeräten und Karten, wie z. B. Google Maps [119], als solche verwendet wird. Eine Nutzung der gleichen Art der Farbkodierung zur Anzeige der HAF-Verfügbarkeit kann zu Missverständnissen führen und verhindert eine simultane Anzeige der Verkehrslage.

Es sollten Darstellungs- oder Interaktionsmöglichkeiten überprüft werden, die dem Nutzer beide Informationen zeitgleich oder wechselnd bereitstellen können. Gestalterisch könnte die redundante Kodierung mittels Symbolen, Text oder Zeichen (z. B. [78]) eine adäquate Lösung bieten, um die Gefahr einer Fehlinterpretation zu verringern.

Die detaillierte Karte wird gegenüber der abstrakten Variante eindeutig (27 VP) bevorzugt. Über ein Drittel der VP gibt eine bessere Orientierung als Grund an. Die Karte sollte also

Informationen zur Umgebung und Landmarken bereitstellen. Die Herausforderung besteht darin, trotz erhöhten Informationsgehalts die Übersichtlichkeit beizubehalten.

Allgemein sollte neben einer Gesamtroutenansicht auch eine adaptive und detailliertere Ansicht möglich sein, mit Informationen, „die auf die unmittelbare Umgebung und Fahraufgabe zugeschnitten [sind]“ [14, S. 13].

6.1.5.5 Gefahrumrandung

Die Gefahrumrandung wird von 50 % der Stichprobe falsch oder nicht korrekt beschrieben. Das weist auf eine mangelnde Selbsterklärungsfähigkeit der Anzeige hin. Andererseits könnten das fehlende Verständnis darin begründet sein, dass die Umrandung nur dann auftritt, wenn die VP vorzeitig, also vor dem Auftreten einer „Gefahrsituation“, übernehmen. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass manche VP die Umrandung nie oder nur selten in den Versuchsfahrten wahrnehmen. Hierzu liegt jedoch keine entsprechende Datenauswertung vor. Das Verständnis der Anzeige kann auch von der Situation an sich beeinflusst werden. So wird die Gefahrumrandung angezeigt, obwohl für die VP keine Gefahr ersichtlich ist und dieser somit nicht klar ist, warum die Umrandung dargestellt wird. Die Anzeige der Gefahrenwarnung wird auf Basis dieser Ergebnisse aus dem Gesamtkonzept entfernt.

6.1.5.6 Angabe des Übernahmegrundes

Fast alle Studienteilnehmer (27 von 30) möchten den Grund für eine nötige Übernahme erfahren und begründen dies mit der besseren Vorbereitungsmöglichkeit auf die bevorstehende Situation. Aktuelle Studienergebnisse von KÖRBER ET AL. [40, S. 305] befürworten zudem die Angabe des Übernahmegrundes, da das wahrgenommene Systemverständnis der Nutzer gesteigert wird. Die Angabe des Übernahmegrundes ist konform mit dem Dialogprinzip der Lernfähigkeit nach der ISO 15005 [14, S. 19]. Wenn möglich, sollte der Fahrer immer über den Grund der Übernahme informiert werden.

6.1.6 Komponenten

Die Stichprobe findet die Anzeigen überwiegend hilfreich und sinnvoll. Es zeigt sich insgesamt, dass der Großteil der VP geräteübergreifend auf möglichst viele Informationen Zugriff haben möchte. Anhand der einzelnen Komponenten wird im Folgenden diskutiert, wo einzelne Informationen angezeigt werden sollten.

6.1.6.1 Kombidisplay

Den Statusindikator im Kombidisplay anzuzeigen ist auf Basis der Studie als sehr sinnvoll zu bewerten und wird beibehalten. Die absolute Mehrheit der Stichprobe möchte den Umgebungsverkehr, die Manöveranzeige und die Navigationsanzeige im Kombidisplay haben.

Im Mix and Match (Kapitel 5.1.11) wählen mehr als zwei Drittel der Stichprobe beide Rundinstrumente sowohl in Übernahmesituationen, als auch im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus. Im aktuellen Konzept sind diese im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus und in der Übernahmepreparations-Phase ausgeblendet. Das Ausblenden der Rundinstrumente verstärkt das Modusbewusstsein. Vor diesem Hintergrund sollten die Rundinstrumente im „Alles in Ord-

nung“-HAF-Modus ausgeblendet bleiben, aber bereits in der Übernahmepvorbereitung wieder eingeblendet werden (Abbildung D.2).

Mehrere VP wünschen sich die Anzeige von Informationen zum Vorderfahrzeug oder der Verkehrssituation. Diese Informationen gleichzeitig anzuzeigen, würde das Kombidisplay überladen. Hinsichtlich dem Dialogprinzip Steuerbarkeit (Kapitel 5.2.2) sollte es dem Nutzer überlassen werden, wann welche optionalen Informationen angezeigt werden. Es müssen daher Bedienelemente, wie z. B. Lenkradtasten, genutzt werden können, um zwischen verschiedenen Anzeigen zu wechseln.

6.1.6.2 Tablet

Auch im Tablet sollte der Automationsstatus angezeigt werden. Die Anzeigen von Umgebungsverkehr, Manöver und Navigation werden ebenfalls als sinnvoll bewertet, allerdings mit einer größeren Streuung als im Kombidisplay. Die Anzeigeelemente müssen somit nicht ständig angezeigt werden, sollten aber verfügbar sein, um den Fahrer, bei Ablenkung durch die Tablet-Nutzung, über Verkehrsgeschehen und Fahrzeugaktivitäten bei Bedarf zu informieren. Das aktuelle Anzeige-/Bedienkonzept erfüllt dahingehend die Anforderungen bereits ausreichend. Es könnten zudem weitere gewünschte Informationen zu Fahrzeug oder Strecke über das Info-Menü und die Statusleiste bereitgestellt werden.

6.1.6.3 LED-Leiste

Die Anzeige des Automationsstatus über die LED-Leiste wird mehrheitlich als hilfreich und sinnvoll bewertet. Eine dauerhafte Anzeige des Systemzustands halten vier Probanden für unnötig. In Übernahmesituationen wird sie von 25 % der Stichprobe als nicht sinnvoll bewertet. Die periphere Wahrnehmung der LED wird von 3 VP explizit hervorgehoben, da auch bei starker Ablenkung damit die Aufmerksamkeit geweckt wird. Um diesen Reiz zu erhöhen und eine visuelle Belastung durch die dauerhafte Beleuchtung der Fahrerkabine zu verringern, sollte die LED-Leiste im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus in ihrer Präsenz zurückgenommen oder ausgeschaltet werden. Letzteres wäre im Sinne einer „quiet/dark“ Designphilosophie, nach welcher Informationen nur angezeigt werden, wenn etwas schief geht [120, S. 44]. Im „Alles-in-Ordnung“-Betrieb würden somit keine Statusinformationen, sondern lediglich Fehler oder Warnungen angezeigt werden. Mehrere VP schätzen die periphere Wahrnehmung der Leiste. Dies spricht für die Empfehlung von CARSTEN & MARTENS [32, S. 4], dass der aktuelle Zustand eines Systems oder einer Funktion mit einem Blick erfassbar sein sollte, um Modus-Verwirrung zu vermeiden. Die Leiste sollte daher auch im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus ein dezentes Feedback zum Automationsstatus geben.

Die LED-Leiste wird mehrmals als zu groß und zu hell bewertet, wobei auch auf eine potentielle Blendungsgefahr hingewiesen wird. Eine solche Beeinträchtigung muss, auch hinsichtlich der Konformität mit der ISO 15005 [14], unbedingt vermieden werden, da dies die Fähigkeit des Fahrers zur Ausübung bzw. zur Übernahme der primären Fahraufgabe beeinträchtigt. Bezüglich der Helligkeit sollte die LED-Leiste, wie auch die anderen Anzeigen adaptiv gestaltet werden, sich also an das Umgebungslicht automatisch anpassen. Neben Position und Größe könnte auch die Anbringung der LED-Leiste bezüglich der genannten Aspekte optimiert werden. Konzepte wie z. B. [121, S. 29] zeigen dazu geeignete Lösungsansätze (Abbildung C.1, Abbildung C.2).

Animationen über die LED-Leiste könnten zusätzlich genutzt werden, um die Kritikalität einer Situation zu verdeutlichen oder einen angenehmeren Wechsel zwischen dem türkisen „Alles in Ordnung“-HAF-Modus und der orangen Übernahmevorbereitung darzustellen.

6.1.6.4 Head-up-Display

Die Informationen im Head-up-Display (HUD) werden als sinnvoll und hilfreich bewertet. 20 VP finden die Anzahl der Informationen angemessen. 6 Personen schlagen vor, das HUD mit weiteren Informationen anzureichern, z. B. zu Verkehrssituation, zum Vorderfahrzeug, zu Landmarken oder zur verbleibenden HAF-Verfügbarkeit. Die aktuelle Gestaltung des HUD reizt das Potenzial der Anzeige im Sichtfeld des Fahrers noch nicht aus. Derzeitige Seriensysteme (z. B. [66], [122]) zeigen wie solche Informationen, Navigationsanweisungen oder Abstands- und Spurhaltewarnungen übersichtlich in Head-up-Displays angezeigt und die Vorteile der Technologie effektiv genutzt werden können. Die Anzeige im Head-up-Display sollte auf dieser Basis optimiert werden und zur Darstellung weiterer Informationen genutzt werden. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die Anzeige im direkten Sichtfeld des Fahrers nur für Informationen genutzt wird, die für die primäre Fahraufgabe relevant sind.

6.1.6.5 Lenkradtasten

Die Bedienung der Lenkradtasten wird mit großer Mehrheit als komfortabel, die Anzeige als hilfreich bewertet. Bezüglich der Anzeige des Automationsmodus zeigt sich, dass 25 % der Studienteilnehmer die Tasten nicht als sinnvoll bewerten. Das kann an der bereits diskutierten inkonsistenten Gestaltung zwischen den Anzeigekomponenten liegen, was zu Verwirrungen beim Fahrer führt. Es muss daher eine komponentenübergreifende konsistente Gestaltung sichergestellt werden. Konkret sollten die Lenkradtasten zur Anzeige der HAF-Verfügbarkeit weiß statt türkis und während des HAF türkis leuchten (Kapitel 6.1.5.2).

6.1.6.6 Signaltöne und Ansagen

Eine Kombination von Signaltönen und Ansagen wird von der Stichprobe eindeutig bevorzugt. Die einzelnen Sounds werden bzgl. Eignung und Akzeptanz im Alltag in allen Varianten sehr gut bewertet. Bei der Akutwarnung schneidet Variante A am Besten ab, was am impliziten Aufforderungscharakter der Ansage liegt. Es könnte sich, vor dem Hintergrund der gesamten Ergebnisse, die Kombination aus dem Aufforderungscharakter von Variante A und dem Informationsgehalt von Variante C in Kombination mit einem eskalierenden Warnton-Countdown anbieten. Beispiel: „Automation endet in 220 Metern aufgrund einer Baustelle. Jetzt übernehmen!“

6.1.7 Konformität mit der ISO 15005

Die untersuchte MMS erfüllt einen Großteil der Anforderungen der ISO 15005. Sie weist allerdings insbesondere Defizite hinsichtlich den Prinzipien Kompatibilität mit der Fahrzeugführung, Timing / Prioritäten, Konsistenz und Konformität mit Fahrerwartungen auf. Die erfassten Verletzungen (Kapitel 5.2) sollten behoben werden. Sie werden daher in Form von Maßnahmen und Empfehlungen mit in die Optimierung aufgenommen (Kapitel 6.2, Anhang D).

6.2 Optimierung von Konzept und Design

Auf Basis der Ergebnisse aus der Simulatorstudie und der Konformitätsbewertung werden konkrete Optimierungsmaßnahmen und Empfehlungen formuliert. In Tabelle 6.2 sind modalitäts- bzw. komponentenübergreifende Aspekte aufgeführt. Abbildung 6.1 gibt einen Überblick zum überarbeiteten Gesamt-Anzeige-konzept.

Tabelle 6.2: Komponentenübergreifende Optimierungsmaßnahmen und -empfehlungen.

Element	Maßnahme / Empfehlung
Akustische und visuelle Anzeigen	Das Vokabular und die Reihenfolge der Informationseinheiten wird hinsichtlich Konsistenz von visuellen und akustischen Anzeigen angepasst (Kapitel 5.2.1). Die Anzeigen sollten z. B. über das Wording die Systemunsicherheit im HAF-Modus kommunizieren (Kapitel 6.1.2). Also dass eine Übernahmeaufforderung auch ohne vorherige Ankündigung erfolgen kann.
Sitzvibration	Als weitere Eskalationsmöglichkeit und zur Steigerung der multimodalen Redundanz (Kapitel 5.2.1.1, 5.1.11.1), wird die Übernahmekaskade (Abbildung 6.1) um eine taktile Komponente in Form einer Sitzvibration erweitert, die 3 s vor dem Ende der Automation beginnt.
Lenkung, Bremse, Lenkradtasten	Die Sensibilität der Bedienelemente muss so angepasst werden, dass eine HAF-Deaktivierung jederzeit, ohne nachteilige Auswirkungen auf die Fahrzeugführung bzw. auf die Reaktion des Fahrzeugs möglich ist (Kapitel 5.2.1).
Übernahme	Der Übernahmegrund wird nach Möglichkeit immer angezeigt (Kapitel 6.1.5.6). Nach Ablauf der Übernahmzeit zeigt das System solange weiterhin Feedback zum Systemzustand an, bis eine Reaktion des Fahrers erkannt wird und/oder die Situation vorüber ist (Kapitel 5.2.3).
Interaktion	Der Fahrer sollte mit einem für die jeweilige Komponente geeigneten Bedienelement steuern können, welche Informationen ihm angezeigt werden (u. a. Kapitel 6.1.6.1). Hierfür eignen sich z. B. Tasten am Lenkrad oder Touch-Interaktion auf dem Tablet. Grundlegende Interaktionskonzepte sollten früh angedacht werden, auch wenn diese in der aktuellen Prototypen-Phase noch nicht zwingend erforderlich ist.
Übernahmezeiten	Die Akutwarnung sollte aus Fahrersicht früher, ca. 15 s vor dem Ende der Automation gestartet werden. Aufgrund der technischen Machbarkeit und des aktuellen Stands der Wissenschaft wird eine Mindestübernahmezeit von 10 s beibehalten (Kapitel 6.1.3).
HAF-Verfügbarkeit	Standardmäßig wird die HAF-Verfügbarkeit in Entfernungsangaben angezeigt (Kapitel 6.1.1). Der Fahrer sollte über die Systemeinstellungen die Möglichkeit haben, stattdessen Zeitangaben oder eine simultane Anzeige beider Angaben auszuwählen.

	t in S	Kombidisplay & Tablet	Head-up- Display	LED-Leiste & Lenkradtasten	Signaltöne & Ansagen	Sitzvibration
 Manueller Modus Weiß: #FFFFFF	0	–	–	–	–	–
		Informationen zu HAF- Verfügbarkeit über Sta- tusindikator und Karte verfügbar			<i>Wenn HAF verfügbar:</i> Weißes Leuchten der Lenkrad- tasten	
 "Alles in Ordnung" HAF-Modus Türkis: #42B59D	> 60	"Automation endet voraus- sichtlich in x km." + Grund als Symbol in Karte	x km z. B. 23 km	Türkises Leuchten Dezent, ggf. ruhige Animation	<i>Bei HAF- Aktivierung:</i> Signalton + "Automation aktiviert"	–
 Übernahme- vorbereitung Orange: #F29100	≤ 60	"Automation endet in x m." "Vorbereiten!" + Grund + Übernahme- Symbol Tablet-Sperrung ab $t = 20$	x m z. B. 1300 m + Übernahme- Symbol	Oranges Leuchten	"Automation endet in x Metern aufgrund [Grund]."	–
 Unmittelbare Übernahmephase Rot: #E20514	≤ 10	"Automation endet in x m." "Übernehmen!" + Grund + Übernahme- Symbol	x m z. B. 220 m + Übernahme- Symbol	Rotes Leuchten	"Automation endet in x Metern aufgrund [Grund]. Jetzt übernehmen!" + 10 s eskalier- ender Signal- Countdown	Aktivierende Sitzvibration ab $t = 3$
 Manueller Modus Weiß: #FFFFFF	0	"Automation deaktiviert!" + Grund <i>Wenn nach 2 s keine Reaktion bzw. Übernahme registriert wird:</i> "Übernehmen!"	– Übernahme- symbol	– Rotes Blinken	Signalton + "Automation deaktiviert!" Schriller Warnton	– Aktivierende Sitzvibration

Abbildung 6.1: Überarbeitetes Gesamtkonzept für eine geplante Übernahme mit Entfernungsangabe. Bei einer ungeplanten Übernahme wird die Übernahmepvorbereitung übersprungen. t = HAF-Verfügbarkeit in Sekunden.

6.2.1 Visuelle Anzeigen

Optimierungsmaßnahmen und -empfehlungen für die visuellen Anzeigekomponenten sind Tabelle 6.3 zu entnehmen. Tabelle 6.4 gibt einen Überblick zur Anzeige von Informationseinheiten in den jeweiligen Komponenten, wobei Anpassungen des bestehenden Konzepts hervorgehoben werden. Entsprechend der aufgeführten Maßnahmen wird eine Design-Optimierung erarbeitet (Anhang D).

Tabelle 6.3: Optimierungsmaßnahmen und -empfehlungen für die visuellen Anzeigen der MMS.

	Maßnahmen / Empfehlungen
LED-Leiste	<p>Im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus wird über die LED-Leiste die türkise Anzeige stark zurückgenommen, also wesentlich dezenter gestaltet (Kapitel 6.1.6.3).</p> <p>Um Blendungen oder Störungen durch Spiegelungen oder Reflexionen zu vermeiden, sollten Größe, Anbringungsort und Anbringungsart überdacht werden. Dazu sollten Varianten und bestehende Lösungsansätze (z. B. in [121, S. 29]; Anhang C) recherchiert und evaluiert werden.</p>
LED-Leiste, Lenkradtasten	<p>Die Anzeigen über Lenkradtasten und LED-Leiste werden konsistent gestaltet (Kapitel 6.1.5.2): Die Lenkradtasten leuchten im manuellen Modus weiß, sobald das HAF verfügbar ist. Im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus leuchten beide Elemente dezent türkis, wobei auch ruhige Animationen in Betracht gezogen werden könnten. In Übernahme-situationen leuchten beide Elemente in angemessener Helligkeit orange bzw. rot.</p>
Tablet	<p>Bei der Optimierung der Gestaltung des Android-Tablets sollten die „Material Design“ Richtlinien und Empfehlungen [123] berücksichtigt werden.</p>
Anzeige-helligkeit	<p>Die Helligkeit der visuellen Anzeigen sollten sich adaptiv an die Umgebungsbeleuchtung anpassen und zudem vom Fahrer adaptierbar sein (u. a. Kapitel 6.1.6.3).</p>
Zeichengrößen und Schriftart	<p>Zeichengrößen werden an die Anforderungen der ISO 15005 [14] angepasst, um eine gute Lesbarkeit der Informationen zu gewährleisten. Es sollte nach Möglichkeit mindestens eine akzeptable Eignung gewährleistet werden (Kapitel 5.2).</p> <p>Die serifenlose Schrift Segoe UI wird für alle Elemente konsistent verwendet. Andere verwendete Schriften werden damit ersetzt.</p>
Navigationskarte	<p>Die abstrakte Karte wird durch eine detaillierte Karte ersetzt (Kapitel 6.1.5.4).</p> <p>Die detaillierte Karte sollte übersichtlich gestaltet und nicht mit textuellen oder anderen Informationen überladen werden.</p> <p>Der Kartenausschnitt sollte sich während der Fahrt bei einer „zentrierten“ Ansicht an die unmittelbare Umgebung des Fahrzeugs anpassen.</p>
Statusindikator	<p>Die Statusindikator-Symbole sollten überarbeitet werden, wobei auf eine konsistente und einfache Gestaltung sowie auf die Konformität mit anerkannten Symbolen (z. B. [88]) geachtet werden sollte (Kapitel 5.2.3, 6.1.5.1).</p> <p>Im manuellen Modus wird Weiß als neutrale Akzentfarbe gewählt, da Blau oftmals zur Visualisierung einer aktiven Automation verwendet wird (Kapitel 5.2.3).</p>
Informationseinheiten	<p>Die Anzeige von Informationseinheiten auf den jeweiligen Komponenten wird entsprechend Tabelle 6.4 angepasst bzw. erweitert.</p>

Tabelle 6.4: Übersicht zu Informationseinheiten, die in den Komponenten im jeweiligen Modus angezeigt werden bzw. verfügbar sind (**M** = Manueller Modus; **A** = HAF-Modus; **o (X)** = im evaluierten Konzept enthalten; **+ (X)** = kommt in Modus X dazu; **- (X)** = fällt in Modus X weg).

Informationseinheit	Kombi	Tablet	LED	HUD	Lenkradtasten
Statusindikator					
• Manueller Modus	o (M, A)	+ (M)			
• Assist-Modus	o (M, A)				
• HAF-Verfügbarkeit	o (M)	o (A)			o (M)
• „Alles in Ordnung“-HAF	o (A)	o (A)	o (A)		+ (A)
• Übernahme Frühwarnung	o (A)	o (A)	o (A)	o (A)	o (A)
• Übernahme Akutwarnung	o (A)	o (A)	o (A)	o (A)	o (A)
Verbleibende HAF-Verfügbarkeit (Entfernungsangabe)	o (M, A)	o (M, A)		+ (A)	
Übernahmegrund	o (A)	o (A)			
Geschwindigkeit des Egofahrzeugs					
• Ziffernanzeige	o (M, A)	o (M, A)		o (M) + (A)	
• Tachometer (Rundinstrument)	o (M)				
Drehzahlmesser (Rundinstrument)	o (M)				
Umgebungsverkehr	o (M, A)	o (M, A)			
Manöveranzeige	o (M, A)	o (M, A)		+ (A)	
Blinker	o (M, A)	o (M, A)			
Navigationsanzeige					
• Navigationskarte, detailliert	o (A) + (M)	o (M, A)			
• Navigationsanweisung	+ (M, A)	+ (M, A)		o (M) + (A)	
• Routeninformationen	o (M, A)	o (M, A)			
Abstand zum Vorderfahrzeug	+ (M, A)	+ (M, A)			
Weitere Informationen zur Verkehrssituation					
• Verkehrszeichen / -regeln (z. B. Geschwindigkeitslimit, Überholverbot)	+ (M, A)	+ (M, A)		o (M) + (A)	
• Warnungen (z. B. bei starkem Seitenwind)	+ (M, A)	+ (M, A)		+ (M, A)	

Informationseinheit	Kombi	Tablet	LED	HUD	Lenkradtasten
Gefahrenumrandung, z. B. Warnung vor Kollisionen				- (A)	
Fahrzeuginformationen, z. B. Tankstand, Reichweite, Spritverbrauch, Temperatur, Kühlwasserstand	o (M) + (A)	+ (A)			

6.2.2 Akustische Anzeigen

Optimierungsmaßnahmen und -empfehlungen zu den akustischen Anzeigen der MMS sind Tabelle 6.5 zu entnehmen. Optimierungsvorschläge für die akustischen Anzeigen befinden sich auf dem Datenträger (Datenträger: 06_Mensch-Maschine-Schnittstelle/04_Optimierung/05_Signaltoene).

Tabelle 6.5: Optimierungsmaßnahmen und -empfehlungen für die akustischen Anzeigen der MMS.

Element	Maßnahme / Empfehlung
Akutwarnung, Signalton-Countdown	Bei ausbleibender Fahrerreaktion sollte die Warnung beispielsweise in Form des Signal-Countdowns weiter eskaliert werden (Kapitel 6.1.6.6). Die Signaltöne könnten zunehmend lauter, schneller oder schriller werden und in einer höheren Frequenz auftreten, um die zunehmende Kritikalität zu verdeutlichen. Zur Erhöhung der multimodalen Redundanz wird empfohlen die Übernahmekaskade bei der Akutwarnung um eine taktile Komponente in Form einer Sitzvibration zu erweitern (Kapitel 5.2.1.1, 5.1.11.1).
Ansagen	Die Ansagen sollten dem Gesamtkonzept (Abbildung 6.1) entsprechend überarbeitet bzw. neu aufgenommen werden.

6.3 Kritik

Bezüglich der Durchführung der Studie und der Auswertung der Ergebnisse müssen retrospektiv Limitationen kritisch betrachtet werden.

6.3.1 Versuchsleiterkonstellation und Befragungsmodus

Insgesamt wirken sechs Personen als Versuchsleitende bei der Versuchsdurchführung mit. Ein Versuch wird jeweils in einer Zweierkonstellation mit einem „Versuchsleiter“ (VL) und einem „technischen Leiter“ (TL) durchgeführt. Der VL ist für den korrekten Ablauf sowie für die generelle Interaktion und Kommunikation mit der VP verantwortlich. Der TL kümmert sich primär um die Steuerung von Simulation, Aufzeichnung und die Kommunikation mit der VP während der Versuchsfahrt. Um die Durchführungsobjektivität trotz wechselnder Versuchsleiterkonstellationen zu gewährleisten, werden die Durchführenden vor dem Beginn der Versuchsdurchführung hinsichtlich Versuchsablauf, Verhaltensweisen und Methodik geschult. Es wird zudem ein detaillierter Moderationsleitfaden bereitgestellt.

Das zur Befragungen verwendete Interview erfordert es, dass die VP direkt mit dem Versuchsleiter kommunizieren. „Die direkte Kommunikation mit einem bestimmten Interviewer gelingt [... aber] nur dann, wenn der Befragte ihn akzeptiert und ihm selbstbewusst gegenübersteht“ [98, S. 48]. Da der Interviewer als „Repräsentant der Öffentlichkeit“ mit einer vermeintlich gültigen Ansicht wahrgenommen wird, kann durch die direkte Kommunikation die Qualität der Daten aufgrund sozialer Erwünschtheit geschmälert werden [98, S. 48]. VP entscheiden sich in solchen Fällen eher für Antworten, die, aus ihrer Sicht, vom Versuchsleiter erwünscht sind. Die Versuchsleiter haben so indirekt Einfluss auf die Ergebnisse. Dieses Phänomen wird auch Versuchsleiterartefakt bzw. Versuchsleiter- oder Rosenthal-Effekt [124] genannt. Durch die variierenden Versuchsleiterkonstellationen wird es verstärkt. Da die Versuchsleiter die Antworten der VP in die Datenmaske eintragen, ergibt sich zudem eine Anfälligkeit für Übertragungsfehler bei der Dateneingabe.

6.3.2 Konsistenz, Strukturierung und Permutation

Reihenfolge-, Lern- und Transfereffekten wird mittels Permutation und Randomisierung entgegengewirkt. Das Auftreten solcher Effekte und die damit einhergehende Beeinflussung der Bewertung, lässt sich im gewählten Versuchsdesign mit Messwiederholungen (Within-Subject-Design) nicht ganz ausschließen.

Der Versuch hätte hinsichtlich Protokollführung und Notation von Beobachtungen und Ereignissen weiter strukturiert werden können, um beispielsweise eine besser vergleichbare Bewertung der Übernahmequalität vorzunehmen.

Bei den in der Abschlussbefragung verwendeten Skalen handelt es sich hauptsächlich um eine fünfstufige Likert-Skala. Diese wird konsistent verwendet. Ebenso werden die Fragen konsistent in einer positiven Richtung (z. B. „Ich stimme zu ...“) formuliert, sodass sich auch hierdurch Reihenfolgeeffekte einstellen können. Eine zufällige Invertierung der Skala oder der Frage hätte diese abmildern können.

6.3.3 Szenarien und Simulator

Abgesehen von Szenario S3 (Baustelle) erfordern die gewählten Übernahme-situationen lediglich die Übernahme durch den Fahrer auf einer geraden Strecke. Spurwechsel oder Ausweichmanöver sind ansonsten keine erforderlich. Die Auswertung der Versuchsprotokolle und Videoaufzeichnungen zeigt, dass die meisten Fahrfehler (13 von 25) in S3 unabhängig von der Displayvariante auftreten. Das lässt darauf schließen, dass das Szenario aufgrund des erforderlichen Lenkmanövers an sich schwieriger zu bewältigen ist, als die anderen Übernahme-situationen. Fünf VP beschreiben ein schwammiges Fahr- bzw. Lenkverhalten des Simulators, was in Zusammenhang mit einer unterschätzten Geschwindigkeit als Grund für die Fahrfehler betrachtet werden kann.

In sechs Versuchen ist aufgrund von Simulator-Problemen, Anzeige-Fehlern oder Reaktionen der VP ein Neustart einer oder mehrerer Versuchsfahrten erforderlich (Tabelle B.1). Werden Versuchsfahrten neugestartet, und somit Situationen mit derselben Displayvariante mehrfach erlebt, wird bei der Bewertung der Kontrollierbarkeit der zuletzt erhaltene Wert verwendet. Zudem treten in weiteren fünf ausgewerteten Versuchen kleinere Simulator-Probleme oder Anzeige-Fehler auf, die aber nicht mit einem Neustart gehandhabt werden (Tabelle B.2, Tabelle B.3). In beiden Fällen kann eine Beeinflussung der Daten nicht ausgeschlossen werden.

6.3.4 Mix and Match

Das Mix and Match ist eine Methode, die in der derzeitigen Forschung kaum verwendet wird. In der Fahr-simulatorstudie erweist sie sich als geeignete und motivierende Methode, um gemeinsam mit den Nutzern Designentscheidung zu eruiieren. Die Ergebnisse des Mix and Match sollten nicht zusammenhangslos interpretiert werden, sondern in Bezug zu anderen objektiven und subjektiven Ergebnissen gestellt werden. Im Folgenden sind einige limitierende Faktoren der verwendeten Methode und Erkenntnisse aus deren Anwendung dokumentiert:

- Die in der Fahr-simulatorstudie vorgegebenen Elemente bestehen größtenteils aus Elementen, welche die VP bereits im Fahr-simulator erleben. Dies erleichtert die schnelle Erkennbarkeit von bekannten Elementen, schränkt aber gleichzeitig die VP indirekt in ihrer Kreativität ein.
- Die Elemente sind durch eine Vorauswahl selektiert, aber dennoch sehr umfangreich. Eventuell würden die VP andere Elemente bevorzugen, greifen aber der Einfachheit halber auf bereits bekannte Elemente zurück oder können andere bzw. neue Elemente nicht mit Worten oder Skizzen beschreiben. Es sollten mehr alternative oder generischere Elemente zur Verfügung gestellt werden. Gleichzeitig könnte aber eine größere Auswahl an Elementen die VP überfordern. Die Menge an vorgegeben Elementen sollte daher hinsichtlich des resultierenden Mehrwerts und der Anwendungseffizienz der Methode abgewogen werden.
- Das Setting wird in der Studie auf eine „Alles in Ordnung“-HAF-Situation und eine Übernahme-situation begrenzt. Die Übernahme-situation wird nicht genauer spezifiziert, was eine vergleichende Auswertung erschwert. Die VP wählen gemäß der Intention der Methode beispielsweise unterschiedliche (Ampel-)Konzepte, Phasen und Übernahmezeiten und treffen dementsprechend andere Designentscheidungen. Die direkte Vergleichbarkeit zwischen den VP ist dadurch aber eingeschränkt.

6.3.5 Interpretation der Ergebnisse

Bei den aus den standardisierten Fragebögen erhaltenen Daten handelt es sich um subjektive Daten. Obwohl in der Praxis solche Daten oftmals als metrische Daten interpretiert werden und darauf basierend parametrische Tests gerechnet werden, empfiehlt u. a. FIELD [125, S. 8] bei subjektiven Daten die Annahme eines Ordinalskalen-Niveaus. Grund hierfür ist, dass für die Erfüllung der Voraussetzungen eines metrischen Skalenniveaus die Differenzen zwischen Elementen einer Skala den Differenzen des Merkmals entsprechen müssen [125, S. 9]. Dies ist bei den erfassten, subjektiven Daten nicht gegeben, da die Intervalle von den Probanden unterschiedlich eingeschätzt werden können. Aussagen, wie z. B. „die Bewertung der visuellen Anforderungen von VP X ist mit einem Wert von 4 doppelt so hoch wie die von VP Y mit einem Wert von 2“, sind somit nicht möglich. Nach JAMIESON [126, S. 38] haben Skalen vom Likert-Typ, die in der Fahrsimulatorstudie Anwendung finden, zwar eine Rangreihe, aber deren Intervalle können nicht als gleich angenommen werden. Damit handelt es sich um ordinalskalierte Daten. MURRAY [127, S. 261] kommt bei einer Untersuchung der Analysemöglichkeiten von Daten aus Likert-Skalen zum Schluss, dass die Anwendung parametrischer Tests die Gefahr birgt, falsche Schlussfolgerungen aus den ordinalskalierten Daten zu ziehen.

Vor diesem Hintergrund werden die Daten aus den standardisierten Fragebögen bei der deskriptiven und inferenzstatistischen Auswertung als ordinalskalierte Daten betrachtet. Es werden, sofern nicht von den Fragebogen-Autoren explizit vorgegeben, keine metrischen Werte, wie z. B. Mittelwerte oder Standardabweichungen, in den Ergebnissen berichtet. Statt parametrischen Verfahren werden Friedman-Tests (siehe z. B. [109, S. 369ff]), Post-hoc-Tests nach CONOVER [109, S. 371 – 373] und Effektstärken in Form von Spearman's Rangkorrelationskoeffizient ρ genutzt. Die Tests besitzen aufgrund der geringeren a priori Informationen eine geringere Teststärke und niedrigere Effizienz als parametrische Verfahren, bei denen die Verteilungsform zuvor bekannt ist [128, S. 192]. Nichtparametrische Verfahren sind also konservativer ausgerichtet. Es kann daher sein, dass nicht alle Effekte gefunden werden. Neben der inferenzstatistischen Signifikanz sollten daher die berechneten Effektstärken mitbetrachtet werden.

6.4 Ausblick

Die Optimierung der MMS legt im Sinne des menschenzentrierten Entwicklungsprozesses nach der ISO 9241-210 [68] die Grundlage für die iterative Weiterentwicklung der Schnittstelle. Nachdem die Optimierungsmaßnahmen und -empfehlungen technisch umgesetzt sind, sollte die überarbeitete Schnittstelle erneut mit Nutzern evaluiert werden.

Nachfolgende Studien sollten die Schnittstelle insbesondere hinsichtlich einer Langzeitnutzung des Systems untersuchen. Von großem Interesse ist hierbei beispielsweise, wie sich mit zunehmender Nutzungserfahrung Aspekte, wie Informationsbedürfnisse, Übernahmezeiten, Vertrauen oder Nutzerverhalten während der hochautomatisierten Fahrt oder in Übernahmesituationen, verändern.

Kritische Szenarien, bei denen der Fahrer nach der Übernahme eine der Situation angemessene Aktion (z. B. Lenk- oder Ausweichmanöver) ausführen muss, sollten verstärkt untersucht werden.

Bei der Nutzung hochautomatisierter Systeme auf öffentlichen Straßen sollte herstellerübergreifend eine Standardisierung sichergestellt werden, um Missverständnisse und Verwirrungen bei den Nutzern zu vermeiden. Hierbei sind rechtliche und ethische Aspekte von großer Bedeutung. Es bedarf beispielsweise klaren Regelungen bezüglich der Ausführung von fahrfremden Tätigkeiten. Vor diesem Hintergrund sollte überprüft werden, inwiefern weitere, private Geräte in das Gesamtsystem eingebunden werden könnten, um während der Fahrt kontrolliert genutzt zu werden und einem Missbrauch des Systems vorzubeugen. Dabei sollten Möglichkeiten für eine adäquaten Fahrerüberwachungen untersucht werden.

Mit dem Ziel der Entwicklung einer idealen MMS für das HAF im Lkw, sollte die vorgestellte Schnittstelle mit fortschreitendem Entwicklungsstatus nicht nur für sich alleine stehen, sondern aktuell übliche Funktionen, wie z. B. die Steuerung von Klima, Licht, Entertainment oder Navigation, in das Gesamtkonzept integrieren und gleichzeitig Raum für Erweiterung bereitstellen.

Die Erkenntnisse aus dem Bereich der Gestaltung von MMS für das HAF sollten mit aktuellen Technologien und dem erarbeiteten Wissen aus anderen Forschungsbereichen, beispielsweise aus Umgebungserfassung und kooperativem Fahren, zusammengeführt werden, um die Systeme in der realen Welt zu erproben.

7 Zusammenfassung

Hochautomatisierte Fahrzeuge übernehmen für eine gewisse Zeit in einer spezifischen Situation Längs- und Querführung, ohne dass eine Überwachung durch den Fahrer erforderlich ist [6, S. 31]. HAF ist kein entferntes Zukunftsszenario mehr. Erste hochautomatisierte Systeme haben in den Vereinigten Staaten bereits 2015 Zulassungen für öffentliche Straßen erhalten [7]. Einer Einführung von HAF auf deutschen Straßen sollen zum Jahr 2020 keine technischen Hindernisse im Weg stehen [3, S. 104]. Neben einer Steigerung von Sicherheit, Effizienz und Komfort [1, S. 6–7], wird durch die Möglichkeit zur Ausführung von NDRTs ein Produktivitätszuwachs erwartet [8, S. 89]. Berufskraftfahrer können sich während dem HAF erholen oder dispositive Tätigkeiten wie Tourenplanung erledigen [2, S. 390].

Beim Erreichen von Systemgrenzen oder beim Auftreten von Fehlern muss der Mensch die Fahrzeugführung „mit ausreichender Zeitreserve“ wieder übernehmen [6, S. 31]. Dieser Kontrollwechsel zwischen Mensch und Fahrzeug ist ein kritischer Faktor des HAF. Probleme und Gefahren liegen in unangemessenem Vertrauen, unzureichendem Situationsbewusstsein und Fertigkeitsverlusten begründet [17, S. 338].

Eine geeignete MMS für das HAF im Lkw ist erforderlich, um resultierenden Herausforderungen zu begegnen. Der Großteil der Forschungsarbeiten zu HAF fokussiert sich aktuell auf Pkw. Das Wissen daraus stellt eine gute Basis, kann aber nicht direkt auf Lkw übertragen werden [12, S. 2072]. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine entwickelte MMS für das HAF im Lkw menschenzentriert evaluiert und optimiert.

In einer Fahrsimulatorstudie mit 30 Versuchspersonen erleben die Lkw-Fahrer das hochautomatisierte System in einem dynamischen Lkw-Fahrsimulator. In der Simulation treten sechs Lkw-spezifische Autobahnsszenarien [96, S. 4 – 5] auf. In vier der sechs Szenarien wird eine Übernahme durch den Fahrer nötig, wobei in je zwei Situationen eine Übernahmeaufforderung frühzeitig (60 s vorher) und unmittelbar (10 s vorher) erfolgt. Die Fahrer beschäftigen sich während des HAF mit dem Lesen eines Zeitschriftenartikels, sodass diese vollständig abgelenkt sind, wenn das System zur Übernahme auffordert. Die VP fahren drei Fahrten mit variierenden Angaben zur verbleibenden HAF-Verfügbarkeit. Je nach Variante stellt die MMS keine Informationen oder Informationen in Form von Zeit- oder Entfernungsangaben bereit. Während und nach den Fahrten werden die Varianten von den Nutzern bezüglich Kontrollierbarkeit, Beanspruchung, Akzeptanz, User Experience, Informationsgehalt und Wohlbefinden bewertet. Alle Varianten erhalten gute Bewertungen. Die beiden Varianten mit Angabe der verbleibenden HAF-Verfügbarkeit erzielen signifikant bessere Ergebnisse als die Variante ohne Angabe. Daraus lässt sich auf einen positiven Effekt der Informationsangabe bezüglich der Interaktion von Fahrer und Automation schließen. Am besten wird die Variante mit Entfernungsangabe bewertet. Diese Ergebnisse spiegeln sich in der qualitativen Abschlussbefragung wieder, in welcher das Systemverständnis und die Bewertung einzelner Komponenten und Informationseinheiten sowie Aspekte des Gesamtkonzepts erfasst werden. Abgerundet wird die Abschlussbefragung

durch einen „Mix and Match“-Designworkshop, bei welchem die VP eigene Anzeigeconzepte entwerfen sowie Ideen und Vorschläge äußern.

Neben der Fahrsimulatorstudie wird die MMS inspektionsbasiert hinsichtlich der Konformität mit der ISO 15005 bewertet. Ein Großteil der Anforderungen und Empfehlungen der neun Dialogprinzipien werden durch die MMS bereits erfüllt. Es zeigen sich aber größere Defizite in Bezug auf die Prinzipien Kompatibilität mit der Fahrzeugführung, Timing / Prioritäten, Konsistenz und Konformität mit Fahrerwartungen.

Die Erkenntnisse aus der Fahrsimulatorstudie und der Konformitätsbewertung werden in Form von Optimierungsmaßnahmen gebündelt (Kapitel 6.2), auf deren Basis konkrete Optimierungsvorschläge erarbeitet werden (Anhang D). Wesentliche Anpassungen betreffen die modalitäts- und komponentenübergreifende konsistente Gestaltung der Anzeigen, die Steigerung des Detaillierungsgrades von Informationseinheiten wie der Kartendarstellung sowie die Erweiterung der Warnkaskade um eine haptische Modalität und die Anzeige von post-hoc Informationen nach einer Übernahme.

Die Arbeit legt das Fundament für die iterative Weiterentwicklung der MMS. Im Sinne des menschenzentrierten Entwicklungsprozesses sollte die überarbeitete Schnittstelle erneut mit Nutzern evaluiert werden. Insbesondere sollten kritische Szenarien mit erforderlichen Fahrerreaktionen und die Langzeitnutzung des Systems untersucht werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Schematischer Aufbau der Arbeit.....	3
Abbildung 2.1:	Situationsbewusstsein nach ENDSLEY [35, S. 35] in einem dynamischen Entscheidungsprozess mit Darstellung beeinflussender Faktoren (eigene Darstellung in Anlehnung an [35, S. 35]).	9
Abbildung 2.2:	Schematische Illustration eines Übernahmeprozesses (eigene Darstellung in Anlehnung an DAMBÖCK ET AL. [46]).	12
Abbildung 2.3:	Zu verwendende Anzeigemodalitäten entsprechend Schadensausmaß und Zeitbudget nach MÜLLER & LERMER (eigene Darstellung in Anlehnung an [53, S. 54]).	14
Abbildung 2.4:	Allgemeines Strukturschema eines Mensch-Maschine-Systems (eigene Darstellung in Anlehnung an [58, S. 18]).	15
Abbildung 2.5:	Strukturen von Mensch-Maschine-Systemen: Serielle Verschaltung (oben), Parallele Verschaltung (unten) (eigene Darstellung in Anlehnung an [57, S. 35]).	16
Abbildung 2.6:	Arbeitsmodell der Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug (eigene Darstellung in Anlehnung an [64, S. 635]).	18
Abbildung 2.7:	Menschzentrierter Gestaltungsprozess nach der ISO 9241-210 [68, S. 15] (eigene Darstellung in Anlehnung an [68, S. 15]).	19
Abbildung 2.8:	Anzeigevarianten des Statusindikators im EU-Projekt HAVEit [85, S. 149]. ..	23
Abbildung 2.9:	Anzeigeconcept von MELCHER ET AL. [49, S. 2871] am Fraunhofer IAO: Statusindikator (links) und Übernahmeaufforderung (rechts) im Kombidisplay.	23
Abbildung 2.10:	Konzept für das HAF von Volvo [77]: De-/Aktivierung des HAF-Modus erfolgt über Wippschalter (links), im Kombidisplay wird während der hochautomatisierten Fahrt und bei Übernahmeaufforderungen eine Karte sowie ein Timer zur verbleibenden HAF-Verfügbarkeit angezeigt (rechts)...	24
Abbildung 2.11:	Konzept von Bosch Mobility Solutions [78]: Hochautomatisierte Fahrt mit Manöveranzeige im Infotainmentdisplay (links), Übernahmeaufforderung (rechts).	25
Abbildung 2.12:	BMW i Vision Future Interaction [79]: Videokonferenz im HAF-Modus (links), Übernahmeaufforderung (rechts).	26
Abbildung 2.13:	Scania Active Frame Konzept [81]: Kombidisplay mit dreistufigem Statusindikator (links), geteilte Ansicht auf dem Active Frame Tablet (rechts).	26

Abbildung 2.14:	Daimler – Mercedes-Benz Future Truck 2025 [90]: Fahrerkabine mit gedrehtem Fahrerstuhl (links), Anzeige im Tablet (rechts).....	27
Abbildung 2.15:	Übersicht zu den Modi und Anzeigen im MMS-Konzept von LEHMER [11, S. xxx – xxxvii] (v. l. n. r.): Manueller Modus mit verfügbarem HAF-Modus, „Alles in Ordnung“ HAF-Modus mit HAF-Verfügbarkeit $t > 60$ s, Übernahmevorbereitung (HAF-Verfügbarkeit $t \leq 60$ s), Unmittelbare Übernahme (HAF-Verfügbarkeit $t \leq 10$ s).....	28
Abbildung 2.16:	Kombidisplay-Design der entwickelten MMS [13, S. 65, xiii] : „Alles in Ordnung“-HAF-Modus mit Manöveranzeige (oben), Übernahmevorbereitung (mittig), unmittelbare Übernahmephase (unten).....	30
Abbildung 2.17:	Tablet-Design der entwickelten MMS [13, S. xv]: „Alles in Ordnung“-HAF-Modus (oben), geöffnete Infobox während der Übernahmevorbereitung (mittig), unmittelbare Übernahmephase (unten).....	31
Abbildung 2.18:	Zusammenfassung der für die Modiwechsel relevanten Informationen der MMS auf Basis von LEHMER [11] und CZAPLARSKI [13] (eigene Darstellung). t = HAF-Verfügbarkeit in Sekunden. Die Varianten A, B, C beziehen sich auf die unabhängige Variable „Informationsanzeige“ der Fahrsimulatorstudie (Kapitel 4.2).....	32
Abbildung 4.1:	Dynamischer Lkw-Fahrsimulator am FTM [92]: Ansicht von oben mit Blick auf Simulator- und Operatorbereich (links); Ansicht der auf dem Bewegungssystem angebrachten Fahrerkabine und der Sichtsimulation (rechts).....	35
Abbildung 4.2:	Fahrerkabine des Simulators mit den Komponenten der entwickelten MMS.	36
Abbildung 4.3:	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).	38
Abbildung 4.4:	Schematischer Überblick zu Streckendesign und Szenarien-Abfolge in den drei Versuchsfahrten F1, F2, F3 (eigene Darstellung).....	39
Abbildung 4.5:	Skala nach NEUKUM ET AL. [100, S. 144] mit Instruktionen zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen.....	41
Abbildung 4.6:	Gestaltungsvarianten des Statusindikators: Symbole + Text (links), nur Symbole (mittig), nur Text (rechts).	43
Abbildung 4.7:	Gestaltungsvarianten der Spurmarkierung: Schwarz (links), farbig (mittig), keine Markierung (rechts).	43
Abbildung 4.8:	Gestaltungsvarianten der Navigationskarte: Abstrakte (links), detailliert (rechts).....	44
Abbildung 4.9:	Mix and Match Elemente für Fahrerkabine, Kombiinstrument und Tablet (v. l. n. r.).	45
Abbildung 4.10:	Schematische Darstellung des Versuchsablaufs der Fahrsimulatorstudie. ...	46
Abbildung 5.1:	Stichprobenzusammensetzung ($n = 30$).	48

Abbildung 5.2:	Ergebnisse (1 = gering, 5 = hoch) der Befragung zur Technikbereitschaft und deren drei Subskalen Technikakzeptanz, Technikkompetenzüberzeugungen und Technikkontrollüberzeugungen; $n = 30$	49
Abbildung 5.3:	Bewertung der Kritikalität (0 = nichts bemerkt, 10 = nicht kontrollierbar) in Übernahmesituationen je nach Displayvariante. Die Situationen S4 und S5 sind als „Übernahme: Rot“ und die Situationen S3 + S6 als „Übernahme: Orange – Rot“ zusammengefasst; $n = 30$	50
Abbildung 5.4:	Bewertung der Kritikalität (0 = nichts bemerkt, 10 = nicht kontrollierbar) in Situationen ohne nötige Übernahme (S1 + S2) und global über alle sechs Situationen (S1 – S6) je nach Displayvariante; $n = 30$	50
Abbildung 5.5:	Mittelwerte und Standardabweichungen der 7 Faktoren des DALI (0 = geringe Anforderungen, 5 = hohe Anforderungen) zu den drei Displayvarianten A, B und C; $n = 30$	52
Abbildung 5.6:	Boxplots der Ergebnisse zu den Skalen Zufriedenheit und Nützlichkeit des Akzeptanz-Fragebogens von VAN DER LAAN ET AL. [33] (-2 = negative Bewertung; 2 = positive Bewertung); $n = 30$	53
Abbildung 5.7:	Mittelwerte und Standardabweichungen der sechs Skalen des UEQ (-3 = negative Bewertung, 3 = positive Bewertung) zu den drei Displayvarianten A (keine Angabe), B (Zeitangabe) und C (Entfernungsangabe); $n = 30$	55
Abbildung 5.8:	Anzahl der Nennungen zum Informationsgehalt nach der Fahrt mit der jeweiligen Displayvariante A, B, oder C; $n = 30$	56
Abbildung 5.9:	Ergebnisse (-2 = Stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) zur Bewertung des Wohlbefindens während der automatisierten Fahrt und bei einer auftretenden Übernahme mit der jeweiligen Displayvariante A ,B oder C; $n = 30$	58
Abbildung 5.10:	Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) des Kombiinstruments; $n = 30$	63
Abbildung 5.11:	Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) der Informationseinheiten im Kombiinstrument; $n = 30$	64
Abbildung 5.12:	Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) des Tablets; $n = 30$	65
Abbildung 5.13:	Ergebnisse (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) zur Bewertung der Informationseinheiten im Tablet; $n = 30$	66
Abbildung 5.14:	Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) der LED-Leiste; $n = 30$	67
Abbildung 5.15:	Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) des HUD; $n = 30$	69
Abbildung 5.16:	Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) der Lenkradtasten; $n = 30$	71
Abbildung 5.17:	Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) der Kombination von Signaltönen und Ansagen; $n = 30$	72

Abbildung 5.18:	Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) des Aktivierungs-Sound (Signalton + Ansage „Autopilot aktiviert“) und des Deaktivierungs-Sound (Signalton + Ansage „Autopilot deaktiviert“); $n = 30$. 72
Abbildung 5.19:	Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) der Sounds zur Frühwarnung bzw. der Vorbereitung der Übernahme: Variante A: Ansage „Bitte bereiten Sie sich auf die Übernahme vor.“; Variante B: Ansage „Automation endet in 60 Sekunden“; Variante C: Ansage „Automation endet in 1300 Metern“; $n = 30$ 73
Abbildung 5.20:	Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) der Sounds zur Akutwarnung bzw. zur Anzeige einer unmittelbar nötigen Übernahme: Variante A: Ansage „Jetzt übernehmen“ + Signalton-Countdown (10 s); Variante B: Ansage „Automation endet in 10 Sekunden“ + Signalton-Countdown (10 s); Variante C: Ansage „Automation endet in 220 Metern“ + Signalton-Countdown (10 s); $n = 30$ 73
Abbildung 5.21:	Ranking der Displayvarianten A (keine Angabe), B (Zeitangabe) und C (Entfernungsangabe) bzgl. der Angabe zur verbleibenden HAF-Zeit; $n = 30$; Auf Platz 1 bewerten die VP die favorisierte Variante. 74
Abbildung 5.22:	Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) von Aspekten zu Modus-Anzeige und -Verständnis; $n = 30$ 76
Abbildung 5.23:	Bewertung (-2 = stimme gar nicht zu; 2 = stimme voll und ganz zu) von Aspekten zu Kontrollübergabe (Vertrauen) und Systemverständnis; $n = 30$. 76
Abbildung 5.24:	Bewertung der Zeitdauern der einzelnen Übernahmephasen; $n = 30$ 78
Abbildung 5.25:	Mix and Match – Fahrerkabine im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus: Absolute Auswahlhäufigkeiten der jeweiligen Elemente (Darstellung basierend auf Lehmer [11])...... 79
Abbildung 5.26:	Mix and Match – Fahrerkabine in Übernahmesituation: Absolute Auswahlhäufigkeiten der jeweiligen Elemente (Darstellung basierend auf Lehmer [11])...... 80
Abbildung 5.27:	Mix and Match – Kombiinstrument im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus: Absolute Auswahlhäufigkeiten der jeweiligen Elemente..... 81
Abbildung 5.28:	Mix and Match – Kombiinstrument in Übernahmesituation: Absolute Auswahlhäufigkeiten der jeweiligen Elemente. 81
Abbildung 5.29:	Mix and Match – Tablet im „Alles in Ordnung“-HAF-Modus: Absolute Auswahlhäufigkeiten der jeweiligen Elemente. 82
Abbildung 5.30:	Mix and Match – Tablet in Übernahmesituation: Absolute Auswahlhäufigkeiten der jeweiligen Elemente. 82
Abbildung 5.31:	Bewertung der Zeichenhöhen im Kombidisplay Teil 1/2..... 89
Abbildung 5.32:	Bewertung der Zeichenhöhen im Kombidisplay Teil 2/2..... 90
Abbildung 5.33:	Bewertung der Zeichenhöhen im Tablet Teil 1/3..... 90
Abbildung 5.34:	Bewertung der Zeichenhöhen im Tablet Teil 2/3..... 91
Abbildung 5.35:	Bewertung der Zeichenhöhen im Tablet Teil 3/3..... 91

Abbildung 6.1:	Überarbeitetes Gesamtkonzept für eine geplante Übernahme mit Entfernungsangabe. Bei einer ungeplanten Übernahme wird die Übernahmevorbereitung übersprungen. t = HAF-Verfügbarkeit in Sekunden.	105
Abbildung A.1:	Skala nach NEUKUM ET AL. [100, S. 144] mit Instruktionen zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen.....	xxii
Abbildung A.2:	Fünfstufige „Daumen“-Skala.	xxv
Abbildung A.3:	Schematischer Überblick zum Versuchsaufbau (eigene Gesamtdarstellung, Simulator-Darstellung in Anlehnung an [91, S. 42–45]).....	xxxv
Abbildung C.1:	Schematische Darstellung der Anbringung einer LED-Leiste in einem Fahrzeug-Cockpit zur Vermeidung von Blendungen und Spiegelungen [121, S. 29].	xlv
Abbildung C.2:	Die nach dem Konzept aus Abbildung C.1 prototypisch eingebaute LED-Halterung in einem Fahrzeug-Cockpit [121, S. 37].....	xlv
Abbildung D.1:	Gestaltungsvarianten des Statusindikators: Optimierte bestehende Variante (oben) vs. Anlehnung an Symbole aus der ISO 2575 [88] (unten).....	xlvi
Abbildung D.2:	Optimierte Kombidisplay-Anzeige.	xlvii
Abbildung D.3:	Optimierte Tablet-Anzeige.	xlviiii
Abbildung D.4:	Optimierte HUD-Anzeige.	xlviix

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Automatisierungsgrade der BAST (Stufen 0 bis 4) [6, S. 31] mit Erweiterung um Stufe 5 nach dem VDA [4, S. 15]; LF = Längsführung, QF = Querführung.6
Tabelle 2.2:	Aspekte der jeweiligen Konzeptstudien. („–“ = nicht vorhanden oder keine Angabe)22
Tabelle 4.1:	Varianten der unabhängige Variable Informationsangabe.....37
Tabelle 4.2:	Abhängige Variablen und deren Operationalisierung.....37
Tabelle 5.1:	Ergebnisse der Friedman-Tests zur Kontrollierbarkeit der Situationen; $n = 30$. * signifikant ($p \leq ,05$).51
Tabelle 5.2:	Post-hoc-Vergleiche der Displayvarianten nach CONOVER [109, S. 371 – 373] sowie Spearman’s Rangkorrelationskoeffizient zur Kontrollierbarkeit der Situationen Übernahme: Orange – Rot (S3 + S6) und alle Situationen; $n = 30$. * signifikant ($p_{Holm} \leq ,05$).51
Tabelle 5.3:	Ergebnisse des Friedman-Tests zu den Subskalen des DALI; $n = 30$. * signifikant ($p \leq ,05$).52
Tabelle 5.4:	Post-hoc-Vergleiche der Displayvarianten nach CONOVER [109, S. 371 – 373] sowie Spearman’s Rangkorrelationskoeffizient ρ zu den Subskalen Stress und Beeinträchtigung durch die Nebenaufgabe des DALI-Fragebogens; $n = 30$. * signifikant ($p_{Holm} \leq ,05$).53
Tabelle 5.5:	Ergebnisse des Friedman-Tests zu den Skalen Nützlichkeit und Zufriedenheit des Akzeptanz-Fragebogens von Van der Laan [33]; $n = 30$. * signifikant ($p \leq ,05$).54
Tabelle 5.6:	Post-hoc-Vergleiche der Displayvarianten nach CONOVER [109, S. 371 – 373] sowie Spearman’s Rangkorrelationskoeffizient (ρ) zu den Skalen Nützlichkeit und Zufriedenheit des Akzeptanz-Fragebogens von VAN DER LAAN [33]; $n = 30$. * signifikant ($p_{Holm} \leq ,05$).54
Tabelle 5.7:	Ergebnisse des Friedman-Tests zu den Subskalen des UEQ; $n = 30$. * signifikant ($p < ,05$).55
Tabelle 5.8:	Post-hoc-Vergleiche der Displayvarianten nach CONOVER [109, S. 371 – 373] sowie Spearman’s Rangkorrelationskoeffizient zu den Subskalen Effizienz und Steuerbarkeit des UEQ; $n = 30$. * signifikant ($p_{Holm} \leq ,05$).56
Tabelle 5.9:	Zusammenfassung der Angaben aus den Zwischenbefragungen zur Frage nach unzureichenden und überflüssigen Informationen; $n = 30$57

Tabelle 5.10:	Übersicht zu aufgetretenen Problemen, Fahrfehlern und Unfällen bei oder nach Übernahmesituationen (S3, S4, S5, S6).	59
Tabelle 5.11:	Ergebnisse zum Systemverständnis des Kombidisplays; $n = 30$	61
Tabelle 5.12:	Ergebnisse zum Systemverständnis des Tablets; $n = 30$	64
Tabelle 5.13:	Ergebnisse zum Systemverständnis der LED-Leiste; $n = 30$. t = verbleibende Zeit im HAF-Modus.	67
Tabelle 5.14:	Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge der VP zur LED-Leiste.	68
Tabelle 5.15:	Ergebnisse zum Systemverständnis der Elemente des HUD; $n = 30$	68
Tabelle 5.16:	Ergebnisse zum Verständnis der Elemente der Lenkradtasten; $n = 30$	70
Tabelle 5.17:	Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge der VP zu den Lenkradtasten.	71
Tabelle 5.18:	Kommentare der VP zum Gesamtkonzept.	75
Tabelle 5.19:	Bewertung der MMS anhand des Prinzips Eignung für den Gebrauch während der Fahrt [14, S. 10 – 15].	84
Tabelle 5.20:	Inkonsistenzen zwischen visuellen und akustischen Anzeigen in Vokabular und Anordnung der Informationseinheiten bei der Frühwarnung.	86
Tabelle 5.21:	Inkonsistentes Vokabular in den akustischen Ansagen.	86
Tabelle 5.22:	Kontrastverhältnisse der primär für Zeichen, Symbole und Hintergründe verwendeten Farben. Verwendete Farbkombinationen sind fett hervorgehoben, Unterschreitungen der Mindestkontrastanforderungen unterstrichen und farbig markiert.	87
Tabelle 5.23:	Displaymaße und gemessene Sehabstände.	88
Tabelle 5.24:	Sehwinkel und Zeichenhöhen entsprechend ihrer Eignung für Fahrerinformations- und Assistenzsysteme nach der DIN EN ISO 15008 [76, S. 17].	89
Tabelle 5.25:	Bewertung der MMS anhand des Prinzips Eignung für TICS-Aufgaben [14, S. 15 – 17].	92
Tabelle 5.26:	Bewertung der MMS anhand des Prinzips Eignung für den Fahrer [14, S. 17 – 19].	93
Tabelle 6.1:	Übersicht zur Beantwortung der drei Forschungsfragen mit Hypothesen (\times = Hypothese abgelehnt, \checkmark = Hypothese angenommen).	95
Tabelle 6.2:	Komponentenübergreifende Optimierungsmaßnahmen und -empfehlungen.	104
Tabelle 6.3:	Optimierungsmaßnahmen und -empfehlungen für die visuellen Anzeigen der MMS.	106
Tabelle 6.4:	Übersicht zu Informationseinheiten, die in den Komponenten im jeweiligen Modus angezeigt werden bzw. verfügbar sind (M = Manueller Modus; A = HAF-Modus; o (X) = im evaluierten Konzept enthalten; + (X) = kommt in Modus X dazu; - (X) = fällt in Modus X weg).	107

Tabelle 6.5:	Optimierungsmaßnahmen und -empfehlungen für die akustischen Anzeigen der MMS.	108
Tabelle A.1	Fragebogenstruktur.	xx
Tabelle A.2	Demographie-Fragebogen.	xxi
Tabelle A.3	Technikbereitschaft-Fragebogen nach NEYER ET AL. [99].	xxii
Tabelle A.4	DALI-Fragebogen nach PAUZIE [94].	xxiii
Tabelle A.5	Akzeptanz-Fragebogen nach VAN DER LAAN ET AL. [33, S. 3], deutschen Übersetzung von KONDZIOR [104].	xxiii
Tabelle A.6	UEQ nach LAUGWITZ, HELD & SCHREPP [95], [105].	xxiv
Tabelle A.7	Fragen zu Informationsgehalt, Wohlbefinden und Kommentaren.	xxv
Tabelle A.8	Fragen zum Systemverständnis und zur Bewertung des Kombidisplays.	xxvi
Tabelle A.9	Fragen zum Systemverständnis und zur Bewertung des Tablets.	xxvii
Tabelle A.10	Fragen zum Systemverständnis und zur Bewertung des HUD.	xxviii
Tabelle A.11	Fragen zum Systemverständnis und zur Bewertung der LED-Leiste.	xxix
Tabelle A.12	Fragen zum Systemverständnis und zur Bewertung der Lenkradtasten.	xxix
Tabelle A.13	Fragen zum Systemverständnis und zur Bewertung der Signaltöne und Ansagen.	xxx
Tabelle A.14	Fragen zum Statusindikator und zur Modusanzeige.	xxx
Tabelle A.15	Fragen zur Anzeige des Übernahmegrundes.	xxxi
Tabelle A.16	Fragen zu Farbwechsel, Ampelkonzept und Übernahmeanzeige.	xxxi
Tabelle A.17	Frage zur Rückfallebene.	xxxii
Tabelle A.18	Fragen zum Gesamtkonzept.	xxxii
Tabelle A.19	Fragen zur Bewertung der Gestaltungsvarianten.	xxxii
Tabelle A.20	Fragen und Anweisungen zum Mix and Match Designworkshop.	xxxiii
Tabelle A.21	Permutation der Displayvarianten A, B, C über die drei Versuchsfahrten F1, F2, F3.	xxxiii
Tabelle B.1	Überblick zu den neugestarteten Versuchsfahrten.	xliii
Tabelle B.2	Übersicht zu aufgetretenen Anzeigefehler, die nicht mit einem Neustart gehandhabt werden.	xliv
Tabelle B.3	Übersicht zu aufgetretenen Problemen und Fehlern der Simulation bzw. des Simulators.	xliv

Literaturverzeichnis

- [1] K. Bengler, K. Dietmayer, B. Färber, M. Maurer, und H. Winner, „Three Decades of Driver Assistance Systems – Review and Future Perspectives“, *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, Bd. 6, Nr. 4, S. 6–22, 2014.
- [2] H. Flämig, „Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransportes“, in *Autonomes Fahren*, M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, und H. Winner, Hrsg. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 377 – 398.
- [3] Fraunhofer IAO, „Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen – Industriepolitische Schlussfolgerungen“, 2015.
- [4] Verband der Automobilindustrie e.V., „Automatisierung – Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren“, *VDA Magazin - Automatisierung*, S. 3–21, 2015.
- [5] Statistisches Bundesamt (Destatis), „Verkehrsunfälle Zeitreihen 2016“, 2017.
- [6] T. M. Gasser, C. Arzt, M. Ayoubi, A. Bartels, L. Bürkle, J. Eier, F. Flemisch, D. Häcker, T. Hesse, W. Huber, C. Lotz, M. Maurer, S. Ruth-Schumacher, J. Schwarz, und W. Vogt, „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“, Bergisch Gladbach, 2012.
- [7] Daimler AG, „Autonom durch Nevada. Freightliner Inspiration Truck“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.daimler.com/innovation/autonomes-fahren/freightliner-inspiration-truck.html>. [Zugegriffen: 11-Sep-2018].
- [8] K. Kaur und G. Rampersad, „Trust in driverless cars: Investigating key factors influencing the adoption of driverless cars“, *J. Eng. Technol. Manag.*, Bd. 48, S. 87–96, 2018.
- [9] I. Wolf, „Wechselwirkung Mensch und autonomer Agent“, in *Autonomes Fahren*, M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, und H. Winner, Hrsg. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [10] J. C. F. De Winter, R. Happee, M. H. Martens, und N. A. Stanton, „Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: A review of the empirical evidence“, *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, Bd. 27, S. 196–217, 2014.
- [11] C. Lehmer, „Konzeption und Evaluation einer Mensch-Maschine-Schnittstelle für das hochautomatisierte Fahren im Lkw“, Technische Universität München, 2018.
- [12] N. T. Richardson, C. Lehmer, B. Michel, und M. Lienkamp, „Conceptual design and evaluation of a human machine interface for highly automated truck driving“, *Intell. Veh. Symp.*, S. 2072–2077, 2018.
- [13] M. Czaplarski, „Umsetzung und Evaluation einer Mensch-Maschine-Schnittstelle für das hochautomatisierte Fahren im Lkw“, Technische Universität München, 2018.
- [14] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Straßenfahrzeuge – Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und -assistenzsystemen – Grundsätze des Dialogmanagements und Konformitätsprüfungen (ISO 15005:2017); Deutsche Fassung EN ISO 15005:2017“. S. 22, 2017.

- [15] R. Parasuraman und V. Riley, „Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse“, *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, Bd. 39, Nr. 2, S. 230–253, 1997.
- [16] T. B. Sheridan, „Supervisory Control“, in *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, 3. Aufl., G. Salvendy, Hrsg. Cambridge: John Wiley & Sons, 2006, S. 1025 – 1052.
- [17] D. Manzey, „Systemgestaltung und Automatisierung“, in *Human Factors*, 2. Aufl., P. Badke-Schaub, G. Hofinger, und K. Lauche, Hrsg. Berlin Heidelberg: Springer, 2012, S. 333–352.
- [18] R. Parasuraman und C. D. Wickens, „Humans: Still Vital After All These Years of Automation“, *Hum. Factors*, Bd. 50, Nr. 3, S. 511–520, 2008.
- [19] D. A. Norman, „The ‚Problem‘ of Automation: Inappropriate Feedback and Interaction, Not ‚Overautomation‘“, San Diego, 1989.
- [20] N. B. Sarter und D. D. Woods, „How in the World Did We Ever Get into That Mode? Mode Error and Awareness in Supervisory Control“, *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, Bd. 37, Nr. 1, S. 5–19, 1995.
- [21] C. D. Wickens, „Designing for Situation Awareness and Trust in Automation“, *IFAC Integr. Syst. Eng.*, S. 365–370, 1994.
- [22] E. L. Wiener und R. E. Curry, „Flight-deck automation: promises and problems“, *Ergonomics*, Bd. 23, Nr. 10, S. 995–1011, 1980.
- [23] L. Bainbridge, „Ironies of automation“, *Automatica*, Bd. 19, Nr. 6, S. 775–779, 1983.
- [24] K. S. Bibby, F. Margulies, J. E. Rijnsdorp, R. M. J. Withers, und I. M. Makarow, „Man’s role in control systems“, *6th IFAC Congr. Bost.*, 1975.
- [25] J. S. Warm, R. Parasuraman, und G. Matthews, „Vigilance Requires Hard Mental Work and Is Stressful“, *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, Bd. 50, Nr. 3, S. 433–441, 2008.
- [26] F. Flemisch, J. Kelsch, C. Löper, A. Schieben, und J. Schindler, „Automation spectrum, inner / outer compatibility and other potentially useful human factors concepts for assistance and automation“, *Hum. Factors Assist. Autom.*, Nr. 2008, S. 1–16, 2008.
- [27] SAE International, „J3016 Surface Vehicle Recommended Practice: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles“. SAE International, S. 1–30, 2016.
- [28] B. M. Muir, „Trust in automation: Part I. Theoretical issues in the study of trust and human intervention in automated systems“, *Ergonomics*, Bd. 37, Nr. 11, S. 1905–1922, 1994.
- [29] Bibliographisches Institut GmbH, „Vertrauen“, *Duden*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Vertrauen>. [Zugegriffen: 08-Sep-2018].
- [30] J. D. Lee und K. A. See, „Trust in automation: Designing for Appropriate Reliance.“, *Hum. Factors*, Bd. 46, Nr. 1, S. 50–80, 2004.
- [31] 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 Syst. Humans.*, Bd. 30, Nr. 3, S. 286–297, 2000.
- [32] O. Carsten und M. H. Martens, „How can humans understand their automated cars? HMI principles, problems and solutions“, *Cogn. Technol. Work*, S. 1–18, 2018.
- [33] J. D. Van Der Laan, A. Heino, und D. De Waard, „A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics“, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, Bd. 5, Nr. 1, S. 1–10, 1997.

- [34] F. D. Davis, R. P. Bagozzi, und P. R. Warshaw, „User acceptance of computer technology: a comparison of two theoretical models“, *Management Science*, Bd. 35, Nr. 8, S. 982–1003, 1989.
- [35] M. R. Endsley, „Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems“, *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, Bd. 37, Nr. 1, S. 32–64, 1995.
- [36] M. R. Endsley und E. O. Kiris, „The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation“, *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, Bd. 37, Nr. 2, S. 381–394, 1995.
- [37] N. B. Sarter und D. D. Woods, „Autonomy, Authority, and Observability: Properties of Advanced Automation and their Impact on Human-Machine Coordination“, *IFAC Proc. Vol.*, Bd. 28, Nr. 15, S. 149–152, 1995.
- [38] A. Andre und A. Degani, „Do you know what mode you are in? An analysis of mode error in everyday things“, in *Human-automation Interaction: Research and practice*, M. Mouloua und J. M. Koonce, Hrsg. Mahlwah, 1997, S. 19–28.
- [39] M. R. Endsley und D. G. Jones, *Designing for Situation Awareness: An Approach to User-Centered Design*, 2. Aufl. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012.
- [40] M. Körber, L. Prasch, und K. Bengler, „Why Do I Have to Drive Now? Post Hoc Explanations of Takeover Requests“, *Hum. Factors*, Bd. 60, Nr. 3, S. 305–323, 2018.
- [41] M. A. Hörwick, „Sicherheitskonzept für hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme“, Technische Universität München, 2011.
- [42] T. Louw, N. Merat, und H. Jamson, „Engaging with highly automated driving. To be or not to be in the loop“, *8th Int. Driv. Symp. Hum. Factors Driv. Assessment, Train. Veh. Des. Salt Lake City, Utah, USA*, 2015.
- [43] T. M. Gasser, E. A. Schmidt, K. Bengler, U. Chiellino, F. Diederichs, L. Eckstein, F. Flemisch, E. Fraedrich, E. Fuchs, M. Gustke, R. Hoyer, M. Hüttinger, M. Jipp, F. Köster, M. Kühn, B. Lenz, C. Lotz-Keens, M. Maurer, M. Meurer, S. Meuresch, N. Müller, C. Reitter, A. Reschka, G. Riegelhuth, J. Ritter, K.-H. Siedersberger, W. Stankowitz, R. Trimpop, und E. Zeeb, „Bericht zum Forschungsbedarf. Runder Tisch Automatisiertes Fahren – AG Forschung“, 2015.
- [44] A. K. Huemer und M. Vollrath, „Ablenkung durch fahrfremde Tätigkeiten – Machbarkeitsstudie“, *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwes.*, Bd. 255, 2012.
- [45] Fraunhofer IAO und Horváth & Partners, „The Value of Time – Nutzerbezogene Service-Potenziale durch autonomes Fahren“, Stuttgart, 2016.
- [46] D. Damböck, M. Farid, L. Tönert, und K. Bengler, „Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren“, *Tagung Fahrerassistenz*, Bd. 5, Nr. 57, S. 1–12, 2012.
- [47] C. Gold, D. Damböck, L. Lorenz, und K. Bengler, „Take Over! How Long Does It Take To Get the Driver Back Into the Loop?“, in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 57th Annual Meeting*, 2013, S. 1938–1943.
- [48] C. Gold, R. Happee, und K. Bengler, „Modeling take-over performance in level 3 conditionally automated vehicles“, *Accid. Anal. Prev.*, Bd. 116, S. 3–13, 2018.
- [49] V. Melcher, S. Rauh, F. Diederichs, H. Widlroither, und W. Bauer, „Take-Over Requests for Automated Driving“, *Procedia Manuf.*, Bd. 3, S. 2867–2873, 2015.
- [50] J. Dokic, B. Muller, und G. Meyer, „European Roadmap Smart Systems for Automated Driving“, *Eur. Technol. Platf. Smart Syst. Integr.*, S. 1–39, 2015.

- [51] J. Drüke, C. Semmler, und L. Bendewald, „The “HMI tool kit” as a Strategy for the Systematic Derivation of User-Oriented HMI Concepts of Driver Assistance Systems in Urban Areas“, in *UR:BAN Human Factors in Traffic*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018, S. 53–74.
- [52] S. Winkler, M. Powelleit, Kazazi, Juela, M. Vollrath, W. Krautter, A. Korthauer, J. Drüke, D. Töpfer, und C. Semmler, „HMI Strategy – Warnings and Interventions“, in *UR:BAN Human Factors in Traffic*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018, S. 75–102.
- [53] R. Lermer, „Konzeption und Bewertung eines fahrsituations- und fahrerleistungsadaptiven Warn- und Informationsmanagers“, Universität der Bundeswehr, 2010.
- [54] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., „Müdigkeit und hochautomatisiertes Fahren“, *Unfallforsch. kompakt*, Nr. 70, 2017.
- [55] F. Flemisch, A. Schieben, N. Schoemig, M. Strauss, S. Lueke, und A. Heyden, „Design of human computer interfaces for highly automated vehicles in the EU-project HAVEit“, *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, Bd. 6767 LNCS, Nr. PART 3, S. 270–279, 2011.
- [56] R. Asche, „Embedded Controller“, S. 209–217, 2016.
- [57] H. Bubb, „Das Regelkreisparadigma der Ergonomie“, in *Automobilergonomie*, H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, und M. Vollrath, Hrsg. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 27 – 66.
- [58] H. Bubb, „Automobilergonomie – Einführung“, in *Automobilergonomie*, H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, und M. Vollrath, Hrsg. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 1–26.
- [59] E. Donges, „Fahrerverhaltensmodelle“, in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 2. Aufl., H. Winner, S. Hakuli, und G. Wolf, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2012, S. 15–23.
- [60] E. Donges, „Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen“, *Automob-Ind*, Bd. 27, Nr. 2, 1982.
- [61] T. M. Gasser, A. Seeck, und B. W. Smith, „Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung“, in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 3. Aufl., H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 27–54.
- [62] RESPONSE 3, „Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS“. PReVENT – Preventive and Active Safety Applications, 2009.
- [63] H. Bubb und K. Bengler, „Fahrerassistenz“, in *Automobilergonomie*, H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, und M. Vollrath, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 525 – 582.
- [64] R. Bruder und M. Didier, „Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen“, in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 3. Aufl., H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 633 – 646.
- [65] H. Bubb, K. Bengler, J. Breuninger, C. Gold, und M. Helmbrecht, „Systemergonomie des Fahrzeugs“, in *Automobilergonomie*, H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, und M. Vollrath, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 259–344.
- [66] Volkswagen Österreich, „Der neue Touareg: das Head-up-Display“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.youtube.com/watch?v=JnKm5SuwvOo&ab_channel=VolkswagenÖsterreich. [Zugegriffen: 02-Aug-2018].

- [67] F. Utesch, „Unschärfe Warnungen im Kraftfahrzeug – Eignet sich eine LED-Leiste als Anzeige für Fahrerassistenzsysteme?“, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2014.
- [68] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN EN ISO 9241-210:2011-01 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (ISO 9241-210:2010); Deutsche Fassung EN ISO 9241-210:2010“. 2011.
- [69] H. Bubb, „Methoden der ergonomischen Fahrzeugentwicklung“, in *Automobilergonomie*, H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, und M. Vollrath, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 583 – 617.
- [70] H.-P. Schöner und B. Morys, „Dynamische Fahrsimulatoren“, in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 3. Aufl., H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 139 – 155.
- [71] J. C. F. de Winter, P. M. van Leeuwen, und R. Happee, „Advantages and Disadvantages of Driving Simulators: A Discussion“, in *Measuring Behavior 2012*, 2012, S. 47 – 50.
- [72] J. Nielsen, „How many test users in a usability study“, *Nielsen Norman Group*, 2012. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nngroup.com/articles/how-many-test-users/>. [Zugegriffen: 27-Juli-2018].
- [73] J. Nielsen, „Usability inspection methods“, *Conf. companion Hum. factors Comput. Syst. - CHI '94*, Bd. 25, Nr. 1, S. 413–414, 1994.
- [74] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN EN ISO 9241-110:2008-09 Ergonomics Of Human-System Interaction – Part 110: Dialogue Principles (ISO 9241-110:2006) English Version Of DIN EN ISO 9241-110:2008-09“. 2008.
- [75] J. Nielsen, „Heuristic Evaluation“, in *Usability Inspection Methods*, J. Nielsen und R. L. Mack, Hrsg. New York: John Wiley & Sons, 1994, S. 25–62.
- [76] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Straßenfahrzeuge – Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und -assistenzsystemen – Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug (ISO 15008:2017); Deutsche Fassung EN ISO 15008:2017“. S. 34, 2017.
- [77] Volvo Car Group, „Volvo Cars reveals safe and seamless user interface for self-driving cars“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/167739/volvo-cars-reveals-safe-and-seamless-user-interface-for-self-driving-cars>. [Zugegriffen: 15-Aug-2018].
- [78] Bosch Mobility Solutions, „EN | Bosch User experience for automated driving“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=2i-t0C7RQWM>. [Zugegriffen: 15-Aug-2018].
- [79] BMWi, „BMW i Vision Future Interaction“, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=LqCVfn7mwgw&frags=pl%2Cwn>. [Zugegriffen: 11-Sep-2018].
- [80] C. Brünglinghaus, „BMW i Vision Future Interaction: Ausblick auf das vernetzte Cockpit“, *Fahrzeugtechnik*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/fahrzeugtechnik/ergonomie---hmi/bmw-i-vision-future-interaction-ausblick-auf-das-vernetztes-cockpit/7074598>. [Zugegriffen: 12-Sep-2018].
- [81] Scania AB, „Traffic jam pilot app wins prestigious design award“, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.scania.com/group/en/traffic-jam-pilot-app-wins-prestigious-design-award-2/>. [Zugegriffen: 25-Sep-2018].

- [82] M.-M. Meinecke, L. Bendewald, A. Kleen, M. Johansson, T. Nyström, und J. Andersson, „Automation of heavy duty vehicles“, 2016.
- [83] Daimler AG, „Mercedes Future Truck 2025“, 2014. [Online]. Verfügbar unter: https://www.youtube.com/watch?v=mRkOGU3Gz9Y&ab_channel=DaimlerAG. [Zugegriffen: 12-Sep-2018].
- [84] Autogefühl, „Mercedes Future Truck 2025 autonomously driving truck premiere - Autogefühl“, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=o43nqvq4BOA>. [Zugegriffen: 12-Sep-2018].
- [85] R. Hoeger, H. Zeng, A. Hoess, T. Kranz, S. Boverie, M. Strauss, E. Jakobsson, A. Beutner, A. Bartels, T.-B. To, H. Stratil, K. Fürstenberg, F. Ahlers, E. Frey, A. Schieben, H. Mosebach, F. Flemisch, A. Dufaux, D. Manetti, A. Amditis, I. Mantzouranis, H. Lepke, Z. Szalay, B. Szabo, P. Luithardt, M. Gutknecht, N. Schoemig, A. Kaussner, F. Nashashibi, P. Resende, B. Vanholme, S. Glaser, P. Allemann, F. Seglő, und A. Nilsson, „The future of driving - HAVEit Final Report (D61.1)“, Regensburg, 2011.
- [86] A. Donath, „Drive Me: Volvo macht Rückzieher bei autonomen Autos“, *golem.de*, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.golem.de/news/drive-me-volvo-macht-rueckzieher-bei-autonomen-autos-1712-131687.html>. [Zugegriffen: 11-Sep-2018].
- [87] Bosch Mobility Solutions, „Automated driving“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/highlights/automated-mobility/automated-driving/>. [Zugegriffen: 15-Aug-2018].
- [88] ISO International Organization for Standardization, „ISO 2575:2010 Road vehicles — Symbols for controls, indicators and tell-tales“. 2010.
- [89] Daimler AG, „Design der Zukunft – der Future Truck 2025.“, *Mercedes-Benz*, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/design/design-der-zukunft-der-future-truck-2025/>. [Zugegriffen: 09-Sep-2018].
- [90] Daimler AG, „Mercedes-Benz Future Truck 2025: Weltpremiere der spektakulären Studie des Lkw von morgen – autonome Fahrt in eine faszinierende Zukunft“, *Global Media Site*, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/ko/de/9918575>. [Zugegriffen: 23-Sep-2018].
- [91] Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, „Vorlesungsfolien ‚Grundlagen der Fahrsimulation‘ Sommersemester 2017“, Technische Universität München, 2017.
- [92] Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, „FTM Bilder für Veröffentlichungen“. Technische Universität München, München, 2017.
- [93] A. Neukum und H.-P. Krüger, „Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen– Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien“, *VDI. Ber.*, S. 297–318, 2003.
- [94] A. Pausie, „A method to assess the driver mental workload: the Driving Activity Load Index (DALI)“, *IET Intell. Transp. Syst.*, Bd. 2, Nr. 4, S. 315–322, 2008.
- [95] B. Laugwitz, T. Held, und M. Schrepp, „Construction and evaluation of a user experience questionnaire“, in *Proceedings of the 4th Symposium of the Workgroup Human-Computer Interaction and Usability Engineering of the Austrian Computer Society (USAB'08)*, 2008, Bd. 5298, S. 63–76.
- [96] N. Richardson, B. Michel, A. Zimmermann, und F. Diermeyer, „Erfassung und Bewertung des Informationsbedarfs von Lkw-Fahrern während hochautomatisierter Fahrt“, in *9. VDI-Tagung - Der Fahrer im 21. Jahrhundert*, 2017, S. 1–13.
- [97] G. C. Urbaniak und S. Plous, „randomizer.org“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: www.randomizer.org. [Zugegriffen: 28-Mai-2018].

- [98] M. Pötschke, „Datengewinnung und Datenaufbereitung“, in *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse*, 1. Aufl., C. Wolf und H. Best, Hrsg. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften | Springer Fachmedien, 2010, S. 41 – 64.
- [99] F. J. Neyer, J. Felber, und C. Gebhardt, „Entwicklung und Validierung einer Kurzsкала zur Erfassung von Technikbereitschaft“, *Diagnostica*, Bd. 58, Nr. 2, S. 87–99, 2012.
- [100] A. Neukum, T. Lübbecke, H.-P. Krüfer, C. Mayser, und J. Steinle, „ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen“, in *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS 2008*, M. Maurer und C. Stiller, Hrsg. Karlsruhe: fmrt, 2008, S. 141–150.
- [101] S. G. Hart und L. E. Staveland, „Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research“, *Adv. Psychol.*, Bd. 52, Nr. C, S. 139–183, 1988.
- [102] A. Pauzie, „DALI Instructions“. S. 1–19, 2008.
- [103] Interaction Design Group, „NASA-TLX (Kurzfassung deutsch)“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://interaction-design-group.de/toolbox/wp-content/uploads/2016/05/NASA-TLX.pdf>. [Zugegriffen: 15-Juni-2018].
- [104] M. Kondzior, „Akzeptanzskala – Methode zur Erfassung der Akzeptanz eines Systems (deutsche Übersetzung)“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hfes-europe.org/accept/accept_de.htm. [Zugegriffen: 25-Mai-2018].
- [105] M. Schrepp, „User Experience Questionnaire Handbook“, Bd. 4. S. 1–12, 2018.
- [106] A. R. T. Donders, G. J. M. G. van der Heijden, T. Stijnen, und K. G. M. Moons, „Review: A gentle introduction to imputation of missing values“, *J. Clin. Epidemiol.*, Bd. 59, Nr. 10, S. 1087–1091, 2006.
- [107] J. R. van Ginkel, K. Sijtsma, L. A. van der Ark, und J. K. Vermunt, „Incidence of missing item scores in personality measurement, and simple item-score imputation“, *Methodology*, Bd. 6, Nr. 1, S. 17–30, 2010.
- [108] C. A. Bernaards und K. Sijtsma, „Influence of simple imputation and EM methods on factor analysis when item nonresponse in questionnaire data is nonignorable“, *Multivariate Behav. Res.*, Bd. 35, Nr. 3, S. 321–364, 2000.
- [109] W. J. Conover, *Practical Nonparametric Statistics*, 3. Aufl. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [110] W. J. Conover und R. L. Iman, „On Multiple-Comparisons Procedures“, *Tech. Rep. LA-7677-MS*, S. 1–14, 1979.
- [111] S. Holm, „A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure“, *Source Scand. J. Stat. Scand J Stat.*, Bd. 6, Nr. 6, S. 65–70, 1979.
- [112] P. D. Ellis, *The Essential Guide to Effect Sizes*, 1. Aufl. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [113] J. Cohen, „A Power Primer“, *Psychol. Bull.*, Bd. 112, Nr. 1, S. 155–159, 1992.
- [114] A. Pauzie, „DALI – E-Mail-Kommunikation mit Annie Pauzie vom 29. Januar 2018“. 2018.
- [115] J. Nielsen, „Severity Ratings for Usability Problems“, 1995. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.useit.com/papers/heuristic/severityrating.html%5Cnhttps://www.nngroup.com/articles/how-to-rate-the-severity-of-usability-problems/>. [Zugegriffen: 25-Aug-2018].
- [116] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Straßenfahrzeuge – Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und -assistenzsystemen – Anforderungen und Konformitätsverfahren für die Ausgabe auditiver Informationen im Fahrzeug (ISO 15006:2011); Deutsche Fassung EN ISO 15006:2011“. S. 20, 2012.

- [117] Web Accessibility in Mind, „Color Contrast Checker“, *WebAIM*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://webaim.org/resources/contrastchecker/>. [Zugegriffen: 11-Aug-2018].
- [118] Human Solutions GmbH und Forschungsinstitut Hohenstein GmbH & Co. KG, „Ergebnisse der deutschen Reihemessung SizeGERMANY“, Kaiserslautern, 2009.
- [119] Google LLC, „Google Maps: Orte, Verkehrslage, Geländedaten, Fahrradrouten und öffentliche Verkehrsmittel ansehen“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://support.google.com/maps/answer/3092439?co=GENIE.Platform%3DDesktop&hl=de>. [Zugegriffen: 24-Aug-2018].
- [120] P. Novacek, „Design Displays For Better Pilot Reaction“, *Avionics News*, October, S. 44–47, 2003.
- [121] D. Albers, L. Flohr, und D. Janetzko, „Konzeption, Entwicklung und Evaluation einer multimodalen Mensch-Maschine-Schnittstelle zur proaktiven Fahrerwarnung zum Schutz schwächerer Verkehrsteilnehmer“, München, 2018.
- [122] Continental Automotive GmbH, „Continental Head-up Display Augmented Reality HUD“, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <http://continental-head-up-display.com/de/>. [Zugegriffen: 24-Aug-2018].
- [123] Google LLC, „Material Design“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://material.io/design/>. [Zugegriffen: 02-Sep-2018].
- [124] R. Rosenthal und K. L. Fode, „The effect of experimenter bias on the performance of the albino rat“, *Behav. Sci.*, Bd. 8, Nr. 3, S. 183–189, 1963.
- [125] A. Field, *Discovering Statistics Using SPSS Discovering Statistics Using SPSS*, 3. Aufl. London: SAGE Publications, 2009.
- [126] S. Jamieson, „Likert scales: how to (ab)use them“, *Electron. J. Bus. Res. Methods*, Bd. 11, Nr. 1, S. 16–28, 2013.
- [127] J. Murray, „Likert Data: What to Use, Parametric or Non-Parametric?“, *Int. J. Bus. Soc. Sci.*, Bd. 4, Nr. 11, S. 258–264, 2013.
- [128] S. Shikano, „Einführung in die Inferenz durch den nichtparametrischen Bootstrap“, in *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse*, C. Wolf und H. Best, Hrsg. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften | Springer Fachmedien, 2010, S. 191–204.

Anhang

Anhang A	Fahrsimulatorstudie: Versuchsunterlagen	xx
Anhang B	Fahrsimulatorstudie: Weitere Ergebnisse	xxxvi
Anhang C	Referenzierte Konzepte	xliv
Anhang D	Design-Optimierung.....	xlvi

Anhang A Fahrsimulatorstudie: Versuchsunterlagen

Tabelle A.1 Fragebogenstruktur.

Fragebogen	Details
Vorbefragung (vor den Versuchsfahrten)	
Demographie	Tabelle A.2
Technikbereitschaft	Tabelle A.3
Zwischenbefragung (je Versuchsfahrt F1 / F2 / F3):	
Kontrollierbarkeit <i>(Wir je Situation abgefragt, also 6 Mal pro Fahrt)</i>	Abbildung A.1
DALI	Tabelle A.4
Akzeptanz	Tabelle A.5
UEQ	Tabelle A.6
Informationsgehalt Wohlbefinden Kommentare / Anmerkungen	Tabelle A.7
Abschlussbefragung (nach den 3 Versuchsfahrten):	
Systemverständnis und Bewertung der Komponenten	
Kombidisplay	Tabelle A.8
Tablet	Tabelle A.9
HUD	Tabelle A.10
LED-Leiste	Tabelle A.11
Lenkradtasten	Tabelle A.12
Signaltöne und Ansagen	Tabelle A.13
Statusindikator und Modusanzeige	Tabelle A.14
Übernahmegrund	Tabelle A.15
Farbwechsel, Ampelkonzept und Übernahmeanzeige	Tabelle A.16

Fragebogen	Details
Rückfallebene	Tabelle A.17
Gesamtkonzept	Tabelle A.18
Gestaltungsvarianten	Tabelle A.19
Mix and Match	Tabelle A.20

Tabelle A.2 Demographie-Fragebogen.

Demographie-Fragen	Antworten
Welchem Geschlecht fühlen Sie sich zugehörig?	<input type="radio"/> männlich / <input type="radio"/> weiblich / <input type="radio"/> sonstiges
Wie alt sind Sie?	_____ Jahre
Seit wie vielen Jahren sind Sie im Besitz Ihres Lkw-Führerscheins?	_____ Jahre
Wie häufig sind Sie mit dem Lkw unterwegs?	<input type="radio"/> nebenberuflich <input type="radio"/> hauptberuflich <input type="radio"/> früher hauptberuflich <input type="radio"/> sonstiges: _____
An wie vielen Tagen pro Woche sind sie mit dem Lkw unterwegs?	<input type="radio"/> 5-7 Tage pro Woche <input type="radio"/> 3-4 Tage pro Woche <input type="radio"/> 1-2 Tage pro Woche <input type="radio"/> weniger als 1 Tag pro Woche
Wie viele Kilometer fahren Sie durchschnittlich im Jahr?	<input type="radio"/> über 100.000km <input type="radio"/> 50.000 bis 100.000 km <input type="radio"/> 10.000 -50.000km <input type="radio"/> weniger als 10.000km
Welche Strecken fahren Sie?	<input type="radio"/> Fernverkehr <input type="radio"/> Verteilerverkehr <input type="radio"/> Baustelle <input type="radio"/> sonstiges: _____

Tabelle A.3 Technikbereitschaft-Fragebogen nach NEYER ET AL. [99].

Einleitungstext:

Die nachfolgenden Aussagen thematisieren Ihre ganz persönliche Haltung gegenüber und Ihren Umgang mit moderner Technik. Dabei geht es nicht um ein einzelnes Gerät, sondern um Ihre Einstellung bzw. um Ihr Erleben in der Anwendung moderner Technologien/Elektronik im Allgemeinen.

Antwort-Skala für die Fragen:

 stimmt gar nicht stimmt wenig stimmt teilweise stimmt ziemlich stimmt völlig

Technikbereitschaft-Fragen

-
- Hinsichtlich technischer Neuentwicklungen bin ich sehr neugierig.
 - Für mich stellt der Umgang mit technischen Neuerungen zumeist eine Überforderung dar.
 - Den Umgang mit neuer Technik finde ich schwierig – ich kann das meistens einfach nicht.
 - Es liegt in meiner Hand, ob mir die Nutzung technischer Neuentwicklungen gelingt – mit Zufall oder Glück hat das wenig zu tun.
 - Ich bin stets daran interessiert, die neusten technischen Geräte zu verwenden.
 - Im Umgang mit moderner Technik habe ich oft Angst zu versagen.
 - Wenn ich im Umgang mit Technik Schwierigkeiten habe, hängt es schlussendlich allein von mir ab, dass ich sie löse.
 - Wenn ich Gelegenheit dazu hätte, würde ich noch viel häufiger technische Produkte nutzen, als ich das gegenwärtig tue.
 - Ich habe Angst, technische Neuentwicklungen eher kaputt zu machen, als dass ich sie richtig benutze.
 - Das, was passiert, wenn ich mich mit technischen Neuentwicklungen beschäftige, obliegt letztlich meiner Kontrolle.
 - Ich finde schnell Gefallen an technischen Neuentwicklungen.
 - Ob ich erfolgreich in der Anwendung moderner Technik bin, hängt im Wesentlichen von mir ab.

nicht kontrollierbar	10	
gefährlich	9	Sicherheitskritische Situationen, bei denen die Anforderungen an Sie hoch sind und die Kritikalität der entstanden Situation von Ihnen als nicht mehr tolerierbar beurteilt wird.
	8	
	7	
unangenehm	6	Situationen, die einen deutlichen, aber von Ihnen als vertretbar bewerteten Aufwand erfordern.
	5	
	4	
harmlos	3	Situationen, in denen im Wesentlichen Komfortanforderungen verletzt sind. Zur Bewältigung ist kein oder nur ein geringer Aufwand von Ihnen notwendig.
	2	
	1	
nichts bemerkt	0	

Abbildung A.1: Skala nach NEUKUM ET AL. [100, S. 144] mit Instruktionen zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen.

Tabelle A.4 DALI-Fragebogen nach PAUZIE [94].

Einleitungstext:

Während des Experiments, das Sie gerade absolviert haben, wurden Sie auf verschiedene Weisen beansprucht. Mithilfe dieses Fragebogens wollen wir die von Ihnen empfundene Beanspruchung anhand von sieben Faktoren bewerten. Es geht dabei um Ihre persönliche Einschätzung. Im Folgenden werden die Faktoren kurz beschrieben. Bitte zögern Sie nicht Fragen zu stellen, sollte Ihnen etwas unklar sein.

DALI-Faktoren	Beschreibung
Gesamte Aufmerksamkeitsanforderungen	Mentale (nachdenken, entscheiden, ...), visuelle (sehen, beobachten, ...) und auditive (hören) Anforderungen, die während des Tests erforderlich waren, um die gesamte Tätigkeit auszuführen.
Visuelle Anforderungen	Visuelle Anforderungen (sehen, beobachten, ...), die während des Tests erforderlich waren, um die gesamte Tätigkeit auszuführen.
Auditive Anforderungen	Auditive Anforderungen (hören, ...), die während des Tests erforderlich waren, um die gesamte Tätigkeit auszuführen.
Taktile Anforderungen	Besondere Einschränkungen, die während des Tests durch Vibrationen oder Ähnlichem hervorgerufen wurden.
Stress	Stressniveau, das Sie während der gesamten Tätigkeit empfunden haben. z.B. Erschöpfung, Unsicherheitsgefühl, Irritation, Entmutigung, ...
Zeitliche Anforderungen	Druck und besondere Einschränkungen, die Sie aufgrund von zeitlichen Anforderungen empfunden haben.
Beeinträchtigung durch Nebenaufgabe	Beeinträchtigung des Fahrerzustandes und Konsequenzen für Ihre Fahrleistung, wenn gleichzeitig zur Fahraufgabe noch weitere Nebenaufgaben auszuführen waren. Z. B. Nutzung des Tablets.

Bewerten Sie bitte für jeden Faktor die Höhe der Beanspruchung, die Sie während des Tests empfunden haben, auf einer Skala von 0 (gering) bis 5 (hoch).

 0 (gering) 1 2 3 4 5 (hoch)

Tabelle A.5 Akzeptanz-Fragebogen nach VAN DER LAAN ET AL. [33, S. 3], deutschen Übersetzung von KONDZIOR [104].

Einleitungstext:

Nun bekommen Sie eine Liste mit Wortpaaren, wie bspw. nützlich und nutzlos. Bitte bewerten Sie spontan die Anzeige anhand einer fünfstufigen Skala. Beispiel: „1“ bedeutet sehr nützlich, „2“ bedeutet etwas nützlich, „3“ neutral, „4“ etwas nutzlos und „5“ sehr nutzlos.

	1	2	3	4	5	
Nützlich	<input type="checkbox"/>	Nutzlos				
Angenehm	<input type="checkbox"/>	Unangenehm				

	1	2	3	4	5	
Schlecht	<input type="checkbox"/>	Gut				
Nett	<input type="checkbox"/>	Nervig				
Effizient	<input type="checkbox"/>	Unnötig				
Ärgerlich	<input type="checkbox"/>	Erfreulich				
Hilfreich	<input type="checkbox"/>	Wertlos				
Nicht wünschenswert	<input type="checkbox"/>	Wünschenswert				
Aktivierend	<input type="checkbox"/>	Einschläfern				

Tabelle A.6 UEQ nach LAUGWITZ, HELD & SCHREPP [95], [105].

Einleitungstext:

Um das Anzeige-Bedienkonzept zu bewerten, nennen Sie bitte auch im folgenden Fragebogen die Ausprägung auf der Skala, die Ihrer Meinung entspricht. Der Fragebogen besteht aus Gegensatzpaaren von Eigenschaften, die das Anzeige-Bedienkonzept haben kann. Abstufungen zwischen den Gegensätzen sind durch Kreise dargestellt. Durch auswählen eines dieser Kreise können Sie Ihre Zustimmung zu einem Begriff äußern.

Beispiel:

attraktiv ○ ⊗ ○ ○ ○ ○ ○ unattraktiv

Mit dieser Beurteilung sagen Sie aus, dass Sie das Anzeige-Bedienkonzept eher attraktiv als unattraktiv einschätzen.

Entscheiden Sie möglichst spontan. Es ist wichtig, dass Sie nicht lange über die Begriffe nachdenken, damit Ihre unmittelbare Einschätzung zum Tragen kommt.

Bitte nennen Sie immer eine Antwort an, auch wenn Sie bei der Einschätzung zu einem Begriffspaar unsicher sind oder finden, dass es nicht so gut zum Anzeige-Bedienkonzept passt.

Es gibt keine „richtige“ oder „falsche“ Antwort. Ihre persönliche Meinung zählt!

	1	2	3	4	5	6	7	
unerfreulich	<input type="checkbox"/>	erfreulich						
unverständlich	<input type="checkbox"/>	verständlich						
kreativ	<input type="checkbox"/>	phantasielos						
leicht zu lernen	<input type="checkbox"/>	schwer zu lernen						
wertvoll	<input type="checkbox"/>	minderwertig						
langweilig	<input type="checkbox"/>	spannend						
uninteressant	<input type="checkbox"/>	interessant						
unberechenbar	<input type="checkbox"/>	voraussagbar						
schnell	<input type="checkbox"/>	langsam						
originell	<input type="checkbox"/>	konventionell						

	1	2	3	4	5	6	7	
behindernd	<input type="checkbox"/>	unterstützend						
gut	<input type="checkbox"/>	schlecht						
kompliziert	<input type="checkbox"/>	einfach						
abstoßend	<input type="checkbox"/>	anziehend						
herkömmlich	<input type="checkbox"/>	neuartig						
unangenehm	<input type="checkbox"/>	angenehm						
sicher	<input type="checkbox"/>	unsicher						
aktivierend	<input type="checkbox"/>	einschläfernd						
erwartungskonform	<input type="checkbox"/>	nicht erwartungs- konform						
ineffizient	<input type="checkbox"/>	effizient						
übersichtlich	<input type="checkbox"/>	verwirrend						
unpragmatisch	<input type="checkbox"/>	pragmatisch						
aufgeräumt	<input type="checkbox"/>	überladen						
attraktiv	<input type="checkbox"/>	unattraktiv						
sympathisch	<input type="checkbox"/>	unsympathisch						
konservativ	<input type="checkbox"/>	innovativ						



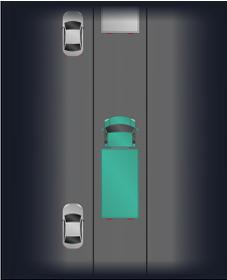
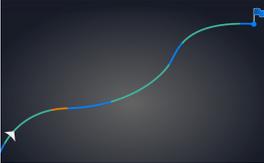
Abbildung A.2: Fünfstufige „Daumen“-Skala.

Tabelle A.7 Fragen zu Informationsgehalt, Wohlbefinden und Kommentaren.

Fragen	Antworten
Gab es Situationen, in denen Sie sich unzureichend informiert gefühlt haben? Wenn ja, welche?	<input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Nein Kommentar: <hr/>

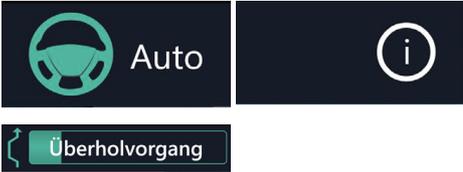
Fragen	Antworten
Gab es Informationen, die Ihnen überflüssig erschienen sind? Wenn ja, welche?	<input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Nein Kommentar: _____
Ich habe mich bei der hochautomatisierten Fahrt wohl gefühlt.	Abbildung A.2
Ich habe mich bei einer auftretenden Übernahme wohl gefühlt.	Abbildung A.2
Kommentar	_____

Tabelle A.8 Fragen zum Systemverständnis und zur Bewertung des Kombidisplays.

Fragen	Antworten
<p><i>Je Informationseinheit:</i> Bitte beschreiben Sie mit eigenen Worten, was Ihnen diese Informationseinheit sagt:</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Manuell</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Assist</p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  <p>Auto</p> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  <p>Überholvorgang</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  <p>Übernehmen!</p> </div> </div>	<p><i>Beantwortung durch den Versuchsleiter:</i> O: R (Richtig) O: F (Falsch) O: T (Teils) Kommentar: _____</p>

Fragen	Antworten
<i>Einleitungstext:</i> Nun geht es um die Gesamtbewertung des Kombiinstrumentes: Bitte geben Sie an, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen. Dabei wenden Sie bitte die Skala von "stimme gar nicht zu" bis sehr "stimme voll und ganz zu" an.	
Ich finde die Anzeige im Kombidisplay hilfreich für die Vermittlung des aktuellen Automationszustandes	Abbildung A.2
Ich finde die Anzeige im Kombidisplay hilfreich in Übernahme-situationen	Abbildung A.2
Wie bewerten Sie die Anzahl der Informationen im Kombidis-play?	O: Zu viele O: Genau richtig O: Zu wenig
Wenn zu viele: Was war zu viel? Wenn zu wenige: Was hat Ihnen gefehlt?	Kommentar: _____
Ich kann relevante Informationen zur Anzeige im Kombiinstru-ment leicht finden	Abbildung A.2
Ich halte es für sinnvoll den aktuellen Automationsstatus im Kombiinstrument anzuzeigen	Abbildung A.2
Ich halte es für sinnvoll den Umgebungsverkehr im Kombi-instrument anzuzeigen	Abbildung A.2
Ich halte es für sinnvoll die Manöveranzeige im Kombiinstru-ment anzuzeigen	Abbildung A.2
Ich halte es für sinnvoll die Navigationsanzeige im Kombi-instrument anzuzeigen	Abbildung A.2

Tabelle A.9 Fragen zum Systemverständnis und zur Bewertung des Tablets.

Fragen	Antworten
<i>Je Informationseinheit:</i> Bitte beschreiben Sie mit eigenen Worten, was Ihnen diese Informationseinheit sagt:	
	<i>Beantwortung durch den Versuchsleiter:</i> O: R (Richtig) O: F (Falsch) O: T (Teils) Kommentar: _____

Einleitungstext:
Nun geht es um die Gesamtbewertung des Tablets (Bild und Skala ausgedruckt): Bitte geben Sie an, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Ich finde die Anzeige im Tablet hilfreich für die Vermittlung des aktuellen Automationszustandes.	Abbildung A.2
Ich finde die Anzeige im Tablet hilfreich in Übernahme-situatio-nen.	Abbildung A.2

Fragen	Antworten
Wie bewerten Sie die Anzahl der Informationen im Tablet?	O: Zu viele O: Genau richtig O: Zu wenig
Wenn zu viele: Was war zu viel? Wenn zu wenige: Was hat Ihnen gefehlt?	Kommentar: _____
Ich kann relevante Informationen zur Anzeige im Tablet leicht finden.	Abbildung A.2
Ich halte es für sinnvoll den aktuellen Automationsstatus im Tablet anzuzeigen.	Abbildung A.2
Ich halte es für sinnvoll den Umgebungsverkehr im Tablet anzuzeigen.	Abbildung A.2
Ich halte es für sinnvoll die Manöveranzeige im Tablet anzuzeigen.	Abbildung A.2
Ich halte es für sinnvoll die Navigationsanzeige im Tablet anzuzeigen.	Abbildung A.2

Tabelle A.10 Fragen zum Systemverständnis und zur Bewertung des HUD.

Fragen	Antworten
<p><i>Je Informationseinheit:</i> Bitte beschreiben Sie mit eigenen Worten, was Ihnen diese Informationseinheit sagt:</p> 	<p><i>Beantwortung durch den Versuchsleiter:</i> O: R (Richtig) O: F (Falsch) O: T (Teils) Kommentar: _____</p>

Einleitungstext:

Nun geht es um die Gesamtbewertung des Head Up Displays (Bild und Skala ausgedruckt):
Bitte geben Sie an, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Ich finde die Anzeige im HUD hilfreich für die Vermittlung der Übernahme.	Abbildung A.2
Ich finde die Anzeige im HUD hilfreich in Übernahmesituationen.	Abbildung A.2
Wie bewerten Sie die Anzahl der Informationen im HUD?	O: Zu viele O: Genau richtig O: Zu wenig
Wenn zu viele: Was war zu viel? Wenn zu wenige: Was hat Ihnen gefehlt?	Kommentar: _____

Fragen	Antworten
Ich kann relevante Informationen zur Anzeige im HUD leicht finden.	„Daumen“-Skala (Abbildung A.2)
Ich halte es für sinnvoll die bevorstehende Übernahme im HUD anzuzeigen.	„Daumen“-Skala (Abbildung A.2)

Tabelle A.11 Fragen zum Systemverständnis und zur Bewertung der LED-Leiste.

Fragen	Antworten
Bitte beschreiben Sie mit eigenen Worten, welche Informationen Ihnen die LED Leiste gibt.	<i>Beantwortung durch den Versuchsleiter:</i>
	O: R (Richtig) O: F (Falsch) O: T (Teils) Kommentar: _____
Ich finde die LED Leiste hilfreich zur Vermittlung des aktuellen Automationsmodus.	Abbildung A.2
Ich halte es für sinnvoll den aktuellen Automationsmodus über die LED Leiste anzuzeigen.	Abbildung A.2
Ich finde die LED Leiste hilfreich in Übernahme-situationen.	Abbildung A.2
Wenn ja: Warum? Wenn nein: Warum?	Kommentar: _____

Tabelle A.12 Fragen zum Systemverständnis und zur Bewertung der Lenkradtasten.

Fragen	Antworten
Bitte beschreiben Sie mit eigenen Worten, welche Informationen Ihnen die Lenkradtasten Leiste geben.	<i>Beantwortung durch den Versuchsleiter:</i>
	O: R (Richtig) O: F (Falsch) O: T (Teils) Kommentar: _____
Ich finde die Lenkradtasten hilfreich für die Vermittlung des aktuellen Automationsmodus.	Abbildung A.2
Ich finde die Lenkradtasten hilfreich in Übernahme-situationen.	Abbildung A.2
Ich halte es für sinnvoll den aktuellen Automationsmodus über die Lenkradtasten anzuzeigen.	Abbildung A.2

Fragen	Antworten
Wenn ja: Warum? Wenn nein: Warum?	Kommentar: _____
Ich finde die Bedienung der Lenkradtasten (zur Aktivierung bzw. Deaktivierung des hochautomatisierten Systems) komfortabel.	Abbildung A.2

Tabelle A.13 Fragen zum Systemverständnis und zur Bewertung der Signaltöne und Ansagen.

Fragen	Antworten
<i>Aktivierung</i>	
Ich finde den Sound hilfreich für die Anzeige der Aktivierung des automatisierten Systems.	Abbildung A.2
Ich würde mir diesen Sound im Alltag wünschen.	Abbildung A.2
<i>Deaktivierung</i>	
Ich finde den Sound hilfreich für die Anzeige der Deaktivierung des automatisierten Systems.	Abbildung A.2
Ich würde mir diesen Sound im Alltag wünschen.	Abbildung A.2
<i>Frühwarnung, je Displayvariante A / B / C:</i>	
Ich finde den Sound hilfreich für die Vorbereitung der Übernahme.	Abbildung A.2
Ich würde mir diesen Sound im Alltag wünschen.	Abbildung A.2
<i>Akutwarnung, je Displayvariante A / B / C:</i>	
Ich finde den Sound hilfreich für die Anzeige einer unmittelbar nötigen Übernahme.	Abbildung A.2
Ich würde mir diesen Sound im Alltag wünschen.	Abbildung A.2
<i>Allgemein:</i>	
Ich finde die Kombination aus Signaltönen und Ansagen sinnvoll.	Abbildung A.2
Wenn nein: Warum?	Kommentar: _____

Tabelle A.14 Fragen zum Statusindikator und zur Modusanzeige.

Fragen	Antworten
Ich finde die Anzeige zum aktuellen Modus hilfreich.	Abbildung A.2
Wie viele Stufen möchten Sie im Statusindikator zeitgleich dargestellt bekommen?	<input type="radio"/> Manuell <input type="radio"/> FAS <input type="radio"/> HAF Kommentar: _____
Ich wusste jederzeit, in welchem Modus das System war	Abbildung A.2

Fragen	Antworten
Ich wusste jederzeit, welche Aufgaben/Funktionen bei mir und welche bei dem System liegen.	Abbildung A.2
Ich habe dem System die Kontrolle komplett abgegeben und es nicht mehr überwacht.	Abbildung A.2
Ich wusste auch in schwierigen Situationen, was das System macht und konnte die Handlungen des Systems gut nachvollziehen.	Abbildung A.2

Tabelle A.15 Fragen zur Anzeige des Übernahmegrundes.

Fragen	Antworten
In einigen Übernahmesituationen wurde Ihnen der Grund für eine bevorstehende Übernahme angezeigt. Empfinden Sie die Anzeige einer Erklärung sinnvoll? Und warum?	<input type="radio"/> ja <input type="radio"/> nein Kommentar: _____
Ich wusste, was bei einer Übernahme zu tun ist.	Abbildung A.2

Tabelle A.16 Fragen zu Farbwechsel, Ampelkonzept und Übernahmeanzeige.

Fragen	Antworten
Bei den Übernahmen wurden Ihnen verschiedene Farbwechsel angezeigt. Welche Farbwechsel sind Ihnen während den Fahrten aufgefallen?	Kommentar: _____
<i>Einleitungstext:</i> In einigen Situationen (Baustelle, Autobahnabfahrt) wurden Ihnen eine Übernahme mit der Abfolge Türkis – orange – rot angezeigt in anderen Situationen (bspw. fehlende Fahrbahnmarkierungen) wiederum in der Abfolge Türkis – rot.	
Welches Anzeigekonzept bevorzugen Sie? Bitte erklären Sie Ihre Entscheidung.	<input type="radio"/> türkis – orange - rot <input type="radio"/> türkis – rot <input type="radio"/> beide (je nach Situation) <input type="radio"/> keins der genannten Kommentar: _____
<i>Einleitungstext:</i> Die orangene Phase der Warnung startet 60 Sekunden bevor die Übernahme bevorsteht, die rote Phase startet 10 Sekunden bevor die tatsächliche Übernahme bevorsteht. Bitte bewerten Sie die Zeiträume und erklären Ihre Entscheidung.	
Orange Phase: 60 Sekunden vorher	<input type="radio"/> zu kurz <input type="radio"/> zu lang <input type="radio"/> passend Kommentar: _____

Fragen	Antworten
Sperrung Tablet: 20 Sekunden vorher	<input type="radio"/> zu kurz <input type="radio"/> zu lang <input type="radio"/> passend Kommentar: _____
Rote Phase: 10 Sekunden vorher	<input type="radio"/> zu kurz <input type="radio"/> zu lang <input type="radio"/> passend Kommentar: _____

Tabelle A.17 Frage zur Rückfallebene.

Frage	Antworten
<p><i>Einleitungstext:</i> Nach einer Übernahme waren Sie wieder vollständig für die Fahrzeugführung verantwortlich (Lenken und Bremsen). Es gäbe die Möglichkeit, dass sie bei einer Übernahme in den ACC/Tempomat-Modus zurückfallen. Stellen Sie sich vor, Sie sind auf der Autobahn und fahren hochautomatisiert. Das System gibt eine Übernahmeaufforderung aus. Sie Übernehmen die Fahraufgabe, wobei ACC nach wie vor aktiv bleibt.</p>	
Würden Sie lieber in das manuelle oder in das Fahren mit ACC zurückfallen? Bitte begründen Sie Ihre Entscheidung.	<input type="radio"/> Manuell <input type="radio"/> ACC Kommentar: _____

Tabelle A.18 Fragen zum Gesamtkonzept.

Fragen	Antworten
Was hat Ihnen besonders gut am Anzeige-Bedienkonzept gefallen?	Kommentar: _____
Was finden Sie am Anzeige-Bedienkonzept verbesserungswürdig?	Kommentar: _____

Tabelle A.19 Fragen zur Bewertung der Gestaltungsvarianten.

Frage	Antworten
Art der Navigationsanzeige: Bevorzugen Sie die eine Abstrakte oder eine detaillierte Navigationsanzeige?	<input type="radio"/> abstrakt <input type="radio"/> detailliert <input type="radio"/> weder noch Kommentar: _____

Frage	Antworten
Art der Icons und Text: Bevorzugen Sie die Anzeige in Form von Symbolen, Text oder beides zusammen?	<input type="radio"/> nur Symbole <input type="radio"/> nur Text <input type="radio"/> Beides zusammen Kommentar: _____
Art der Spurmarkierung: Welche Art der Spurmarkierung würden Sie sich wünschen?	<input type="radio"/> farbige Markierung <input type="radio"/> schwarze Markierung (wie im Versuch) <input type="radio"/> keine Markierung <input type="radio"/> Sonstige: _____ Kommentar: _____

Tabelle A.20 Fragen und Anweisungen zum Mix and Match Designworkshop.

Frage	Antworten
<i>Einleitungstext:</i>	
Wenn Sie sich Ihr ideales Anzeigekonzept für das automatisierte Fahren selber zusammenstellen könnten, wie würde dieses aussehen?	
Betrachten wir zunächst die hochautomatisierte Fahrt (ohne kritische Situation).	Kommentar: _____
Wo und wie sollen hierbei welche Informationen idealerweise angezeigt werden?	
Ordnen Sie hierzu bitte die Elemente nach Ihren Wünschen auf der Konzept-Skizze sowie auf den Platzhaltern für das Entertainment-Display (Tablet) und Kombidisplay an. Sie können dabei auch bewusst Elemente nicht benutzen. Gerne können Sie auch zeichnen oder schreiben.	
Wo und wie sollen nun welche Informationen bei einer Übernahme-Situation idealerweise angezeigt werden? Passen Sie bitte Ihr Konzept für eine Übernahme an.	Kommentar: _____

Tabelle A.21 Permutation der Displayvarianten A, B, C über die drei Versuchsfahrten F1, F2, F3.

VP	Eingewöhnungsfahrt	Fahrt F1	Fahrt F2	Fahrt F3
1	Eingewöhnungsfahrt	AF1	BF2	CF3
2	Eingewöhnungsfahrt	CF1	AF2	BF3
3	Eingewöhnungsfahrt	BF1	CF2	AF3
4	Eingewöhnungsfahrt	CF1	BF2	AF3
5	Eingewöhnungsfahrt	BF1	AF2	CF3
6	Eingewöhnungsfahrt	AF1	CF2	BF3

VP	Eingewöhnungsfahrt	Fahrt F1	Fahrt F2	Fahrt F3
7	Eingewöhnungsfahrt	AF1	BF2	CF3
8	Eingewöhnungsfahrt	BF1	AF2	CF3
9	Eingewöhnungsfahrt	BF1	CF2	AF3
10	Eingewöhnungsfahrt	AF1	CF2	BF3
11	Eingewöhnungsfahrt	CF1	BF2	AF3
12	Eingewöhnungsfahrt	CF1	AF2	BF3
13	Eingewöhnungsfahrt	AF1	CF2	BF3
14	Eingewöhnungsfahrt	AF1	BF2	CF3
15	Eingewöhnungsfahrt	BF1	CF2	AF3
16	Eingewöhnungsfahrt	CF1	AF2	BF3
17	Eingewöhnungsfahrt	BF1	AF2	CF3
18	Eingewöhnungsfahrt	CF1	BF2	AF3
19	Eingewöhnungsfahrt	BF1	CF2	AF3
20	Eingewöhnungsfahrt	BF1	AF2	CF3
21	Eingewöhnungsfahrt	CF1	AF2	BF3
22	Eingewöhnungsfahrt	AF1	BF2	CF3
23	Eingewöhnungsfahrt	AF1	CF2	BF3
24	Eingewöhnungsfahrt	CF1	BF2	AF3
25	Eingewöhnungsfahrt	BF1	AF2	CF3
26	Eingewöhnungsfahrt	BF1	CF2	AF3
27	Eingewöhnungsfahrt	CF1	AF2	BF3
28	Eingewöhnungsfahrt	AF1	BF2	CF3
29	Eingewöhnungsfahrt	CF1	BF2	AF3
30	Eingewöhnungsfahrt	AF1	CF2	BF3
31	Eingewöhnungsfahrt	AF1	CF2	BF3
32	Eingewöhnungsfahrt	BF1	CF2	AF3

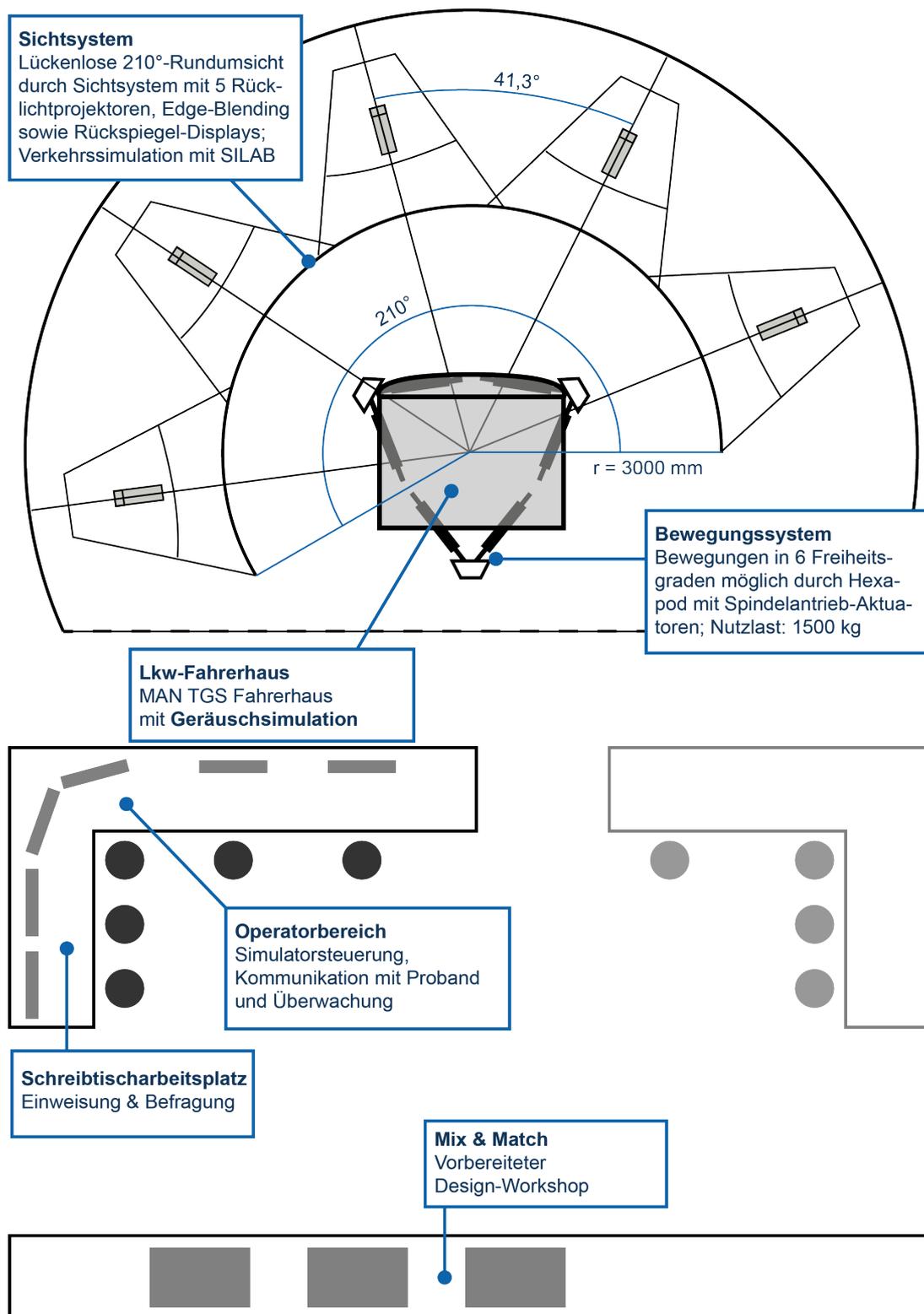


Abbildung A.3: Schematischer Überblick zum Versuchsaufbau (eigene Gesamtdarstellung, Simulator-Darstellung in Anlehnung an [91, S. 42–45])

Anhang B Fahrsimulatorstudie: Weitere Ergebnisse

Anmerkungen und Kommentare aus den Zwischenbefragungen

Übernahme

- Übernahme-Anzeige stresst (VP 2)
- Frühwarnungen zu bevorstehenden Übernahmen sind gut (VP 7, 18) bzw. angenehm (VP 10, 17)
- „Unerwartete Übernahmeaufforderung war schlecht“ (VP 18)
- VP 32 wünscht sich für alle Übernahmen eine Ankündigung (Frühwarnung).
- VP 12 findet 60 s zu früh; VP 5 findet die Frühwarnung akustisch zu früh angekündigt (schätzt dabei auf 3 min vor der Übernahme), da es bereits visuell ersichtlich sei.
- „Übernahmezeit kommt einem kürzer vor, als sie eigentlich [ist]“ (VP 14)
- VP 15 kommt die Übernahmezeit bei einer Angabe in Meter länger vor, als bei einer Angabe in Sekunden.
- 9 VP (VP 5, 13, 14, 19, 23, 27, 29, 31, 32) finden die Übernahmezeit bei einer Akutwarnung (10 s bzw. 220 m) zu kurz oder möchten früher informiert werden; z. B. 300 – 350 m (VP 23), 15 – 20 s (VP 5) vor der Übernahme
- VP 31 schlägt vor jeder Übernahme einen Schwierigkeitsgrad zuzuordnen und diesen anzuzeigen.
- VP 20 findet eine Übernahme-Vorbereitungszeit von 10 – 15 s ausreichend.
- VP 20 möchte eine gleichzeitige Anzeige von Entfernung bis zur Übernahme und verbleibender HAF-Zeit.
- VP 31 schlägt vor bei der Frühwarnung die Ansage mit der Information „... in 1300 m ...“ und bei der Akutwarnung die Ansage „Jetzt übernehmen!“ zu verwenden.

Überholen

- VP 1 findet das automatisierte Überholen beeindruckend, merkt aber an, dass der Lkw zu lange links bleibt.
- „Automatisierter Überholvorgang und [...] Erkennung von Überholverböten ist super!“

Autobahnausfahrt

- Ausfahrt war gut vorbereitet (VP 12)

LED-Leiste

- VP 17 findet die LED-Leiste „sehr sinnvoll“, da das rote Licht einen aufwecke.
- Etwas dunkler einstellen (VP 3)
- VP 7 schlägt vor, wärmere Farben zu nutzen, die an die Umgebung angepasst sind (z. B. bei Nacht dunkler als am Tag) und dass der Fahrer die Farben selbst definieren können soll.
- LED-Leiste blendet (VP 24)

Allgemein

- „Wenn’s so funktioniert, kann man das gut benutzen.“ (VP 1)
- Stimmiges Gesamtkonzept (VP 3, 7)
- VP 15 merkt an, dass Variante A einen „gewissen Befehlston“ hätte.
- VP 3 äußert, dass sie mit dem Tablet in der Hand ein ungutes Gefühl hat und lieber die Hände am Lenkrad hat. Ähnlich meint VP 27, dass es Überwindung kosten würde, sich durch die Beschäftigung mit dem Tablet mental vom Fahrgeschehen abzuwenden.
- VP 23 findet das Lesen auf dem Tablet schnell ermüdet.
- VP 27 tut sich mit der Tablet-Halterung schwer, da man das Tablet da „reinfriemel“ müsse.
- „Je mehr Informationen umso besser“ (VP 11).
- VP 24 meint, dass eine Müdigkeitserkennung vorhanden sein sollte, um ggf. einen bei der hochautomatisierten Fahrt eingeschlafenen Fahrer wieder zu wecken.

Anmerkungen zum Ampelkonzept

Bei der Frage danach, welches Ampelkonzept (Türkis – Orange – Rot oder Türkis – Rot) die VP bevorzugen, entscheiden sich 13 für das dreistufige Konzept und geben die folgenden Begründungen an:

- VP 2 meint, dass ein Wechsel von Türkis auf Rot Panik erzeugen würde.
- 2 VP (VP 2, 14) finden die Analogie zur dreistufigen Ampel gut.
- VP 7 findet das dreistufige Konzept entspannter.
- 3 VP (VP 9, 17 und 28) geben an, sich damit (besser) einstellen bzw. vorbereiten zu können.
- VP 10 schätzt die verschiedenen Eskalationsstufen.
- VP 13 meint, es sollte immer (in jeder Situation) die Abstufungen geben.
- VP 19 bevorzugt das dreistufige Konzept, aufgrund der für eine Reaktion mehr zur Verfügung stehenden Zeit.

- VP 21 interpretiert die Farben als Modus-Anzeige und Handlungsaufforderungen: Türkis als Automatik-Modus, Orange als Vorbereitung auf die Übernahme und Rot als Handlungsaufforderung die Hände ans Lenkrad zu nehmen.
- VP 27 verbindet mit Rot Probleme und verbindet mit einem sofortigen Wechsel auf Rot einen Systemausfall.
- VP 30 findet einen direkten Wechsel von Türkis auf Rot ungeeignet, wenn man mit anderen Tätigkeiten beschäftigt ist, führt jedoch an, dass man sich „sowieso nicht 100 Prozent verlassen“ kann.

Keine VP entscheidet sich für die ausschließliche Verwendung des zweistufigen Konzepts. 17 VP geben an, je nach Situation beide Konzepte haben zu wollen:

- Von den 17 VP geben 9 (VP 4, 5, 8, 12, 16, 18, 20, 22, 32) an, generell das dreistufige Konzept zu bevorzugen.
- Bei akuten (Gefahren-)Situationen bzw. unmittelbar nötige Übernahmen, geben 9 VP (VP 4, 5, 12, 18, 20, 22, 24, 29, 32) explizit an, den direkten Wechsel von Türkis auf Rot zu bevorzugen.
- VP 11 meint, dass durch die Nutzung beider Konzepte die Situationen unterschieden werden können und eingeschätzt werden kann, wie schnell reagiert werden muss.
- VP 20 findet die Orange Phase als Ankündigung wichtig, bevorzugt aber bei Gefahrensituationen direkt die Rote Phase.
- VP 22 zieht, wie VP 2 und 14 (siehe oben), beim dreistufigen Konzept die Analogie zur Ampel.
- VP 25 findet die Vorwarnung (mit Orange) gut, meint aber, dass das nicht immer geht.

Anmerkungen zu den Übernahmezeiten

Die Zeitdauer der roten Phase (Akutwarnung) bewerten 12 VP mit 10 s vor der Übernahme als passend. Die Mehrheit (18 VP) bewertet sie jedoch als zu kurz:

- VP 13 meint, die rote Phase verursacht Panik.
- VP 16 findet 10 s zur Orientierung knapp.
- VP 17 hätte gerne 1 Minute Zeit in der roten Phase um sich „besser und stressfreier“ vorbereiten zu können.
- VP 18 findet die Zeitdauer der roten Phase passend, aber merkt an, dass damit viel Stress verbunden ist.
- VP 19, 21 und 23 möchten 20 s Zeit, um sich auf die Situation einzustellen.
- VP 20 findet die rote Phase bei Ablenkung bzw. Konzentration auf andere Dinge (z.B. Tablet) zu kurz.
- VP 27 hätte gerne 20 – 30 s Zeit in der roten Phase. Die Farbe rot verbindet die VP mit kritischen Systemmeldungen und bewertet sie daher als schwierig.

- VP 29 möchte, ähnlich wie VP 17, immer mindestens 1 Minute Übernahmezeit haben.
- VP 31 fände eine Zeitdauer von etwa 15 s ideal.

Anmerkungen zur Rückfallebene

18 VP würden es bevorzugen, wenn Teilfunktionen wie der Abstandsregeltempomat (ACC) nach der Deaktivierung des Autopiloten aktiv bleiben. Genannte Gründe:

- ACC erleichtert das Fahren bzw. die Übernahme (VP 2, 10).
- Sinnvoll Teilfunktionen aktiv zu lassen (VP 4).
- Höhere Sicherheit (VP 10, 11, 16, 17, 24), z. B. bei Stausituationen
- Bessere Wirtschaftlichkeit (VP 10, 15), z.B. hinsichtlich Kraftstoffverbrauch
- ACC vermindert gefährliche (menschliche) Fehleinschätzungen, wie z. B. den Abstand zum Vorderfahrzeug (VP 11, 32).
- Mehr Zeit zur Einstellung auf Situation bzw. auf den Verkehr (VP 21).
- Fahrer muss bei der Übernahme „erst mal nur lenken“ (VP 29).
- Tempomat ist bequem (VP 30).

11 VP (VP 5, 9, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 23, 25, 31) möchten lieber manuell weiterfahren. Genannte Gründe:

- Der Fahrer soll selbst entscheiden, ob der Tempomat nach der Deaktivierung des HAF-Modus verwendet wird (VP 9 und 19).
- Um sich einen Überblick zu verschaffen ist der manuelle Modus besser geeignet (VP 12).
- VP 13 bezeichnet den manuellen Modus als „definierten Bereich“, von welchem bekannt ist, welche Systeme aktiv bzw. inaktiv sind und aus welchem Einzelsysteme wieder aktiviert werden können.
- Der Fahrer soll die komplette Kontrolle nach der Übernahme haben und sich nicht fragen müssen, welche Systeme noch aktiv sind und welche nicht (VP 14).
- VP 20 und 31 halten die Nutzung von ACC nach der Übernahme in Situationen wie z. B. Baustellen ungeeignet.
- VP 18 und 23 finden den manuellen Modus angenehmer.

2 VP (VP 8 und 25) möchten situationsabhängig beide Rückfallebenen haben. VP 25 schlägt etwa vor, bei voraussehbaren Situationen den ACC aktiviert zu lassen, bei akuten Übernahme-situationen jedoch direkt in den manuellen Modus ohne Tempomat zu wechseln.

Positive Anmerkungen und Lob

- Gesamtkonzept/-design (VP 2, 11, 12, 15, 22, 25, 28, 31)
- LED-Leiste (VP 2, 3, 18, 23): „Nicht zu übersehen“ (VP 23)
- Übernahmevorbereitung (VP 3)
- Doppel-Tasten-Bedienung (VP 3, 23)
- Kombidisplay-Anzeige (VP 4, 16): „Statusindikator und andere Anzeigen groß, deutlich, gut zu erkennen und logisch“ (VP 16)
- Akustische Ansagen (VP 4, 18)
- Übersichtlichkeit (VP 5, 7, 9, 14, 19, 24, 25, 32)
- Allgemeine Verständlichkeit und Logik (VP 7, 16)
- Anzeige im Head-up-Display (VP 8, 16, 23): Wichtige Infos „vorne“ (VP 16)
- Bedienung allgemein (VP 9)
- Redundante Anzeige der verbleibenden Zeit bzw. Entfernung bis zur Übernahme (VP 13)
- Kartendarstellung (VP 14)
- Farbkonzept (VP 14, 23, 30, 32): „Eindringlich“ (VP 23), „3 Farben finde ich gut“ (VP 30)
- Automatischer Überholvorgang (VP 17, 20)
- Situationsangemessenheit (VP 21)
- Alle wichtigen Informationen vorhanden (VP 22, 25)
- Vogelperspektive auf Umgebungsverkehr (VP 27)
- Systemrückmeldungen: Anzeige, ob Fahrer sich auf „System verlassen kann“ (VP 30)

Negative Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge

Allgemein

- Redundante Anzeige in Tablet und Kombi nicht nötig (VP 1)
- Frühere Warnung bei Übernahme (VP 2)
- Informationen zu Vorderfahrzeug (z. B. Abstand, Geschwindigkeit) sollten angezeigt werden (VP 3, 14, 20, 24)
- Übernahmegrund immer anzeigen (VP 5, 29)
- Erkannte Verkehrszeichen sollten angezeigt werden (VP 3, 15)
- Anzeige der Fahrtzeit (VP 14), um persönliche Route zu planen
- Totwinkel-Warnung (VP 17)

- Informationen zur vorausliegenden Situation geben: z. B. „Baustelle voraus in 100 m“ (VP 24)

LED-Leiste

- Dunkler bei Nacht (VP 3)
- Allgemein nicht nötig (VP 4)
- Nicht zur Anzeige des Automationsstatus nutzen (VP 7)
- Zu grell mit zu viel Lichteintrag in Fahrerkabine (VP 13)

Sounds (Signaltöne und Ansagen)

- Stimme auswählbar (VP 3)
- Kürzer und prägnanter (VP 4)
- Signaltöne in Gefahrensituationen aggressiver gestalten (VP 8)
- Ansage sollten früher kommen, damit Fahrer weniger gestresst ist (VP 17)
- Signaltöne „abschaltbar gestalten“ (VP 24)

Head-up-Display

- Allgemein überflüssig (VP 14)
- Verbleibende HAF-Zeit während Übernahm anzeigen (VP 21)

Umgebungsverkehr

- Anzeige überflüssig (VP 14)
- Größerer Radius (kleinerer Maßstab) des Umgebungsverkehrs anzeigen (VP 27)

Assistenzsysteme-Modus

- Nicht notwendig (VP 17)

Lenkradtasten

- Tasten könnten auf Lenkrad-Speichen angebracht werden, damit nicht so weit nach innen gegriffen werden muss (VP 20)

Begründungen und Anmerkungen zur Wahl der Displayvarianten

Variante A (keine Angabe)

- „Indifferente Angabe. Als ob es den Lkw nicht interessieren würde, wann übernommen wird“ (VP 14).
- Unangenehm aufgrund Informationsmangel (VP 15).

Variante B (Zeitangabe)

- Besser einschätzbar (VP 1, 15, 16, 20, 22, 23, 25, 29, 31, 32)
- Schwieriger einschätzbar (VP 9, 13, 14)

Variante C (Entfernungsangabe)

- Entfernungsangaben sind „lang genug“, Zeitangaben waren „zu kurz“ (VP 2)
- Zeit ist von Geschwindigkeit abhängig (VP 4, 8, 19, 20, 22)
- Besser einschätzbar (VP 4, 8, 17, 24, 27)
- Einfacherer Abgleich mit Realität durch Entfernungsangaben (VP 13)
- Entfernung schwer in Zeit umrechenbar (VP 15, 28)
- Schwieriger einschätzbar als Zeitangaben (VP 22,
- „Lkw-Fahrer kennen sich mit Entfernungsangaben besser aus als mit Zeitangaben“ (VP 24)

Weitere Anmerkungen

- VP 10 fände eine Kombination bzw. gleichzeitige Angabe von Entfernung- und Zeitangabe am Besten
- VP 18 gibt an, während der Fahrt Zeitangaben besser gefunden zu haben, bei der Bewertung bevorzugt die VP jedoch Entfernungsangaben, da bereits aus Navigationsanzeigen gewohnt.
- VP 24 findet „alles besser wie ganz ohne Infos“.
- VP 27 kann Entfernungsangaben besser einschätzen, findet aber Zeitangaben bei Übernahmen entspannter, da sie bei hochautomatisierter Fahrt kein gutes Gefühl für die Geschwindigkeit hat. Sie schlägt vor, dass der Fahrer einstellen kann, ob Zeit oder Entfernung angezeigt wird.
- Keine Angabe der verbleibenden HAF-Zeit erzeugt laut VP 28 Zeitdruck, da sofort gehandelt werden müsse.

Neustarts, Probleme und Fehler bei der Versuchsdurchführung

Tabelle B.1 Überblick zu den neugestarteten Versuchsfahrten.

VP	Fahrt	Displayvariante	Situation	Grund für Neustart
17	F1	B	S3	VP fährt schnell in Baustelle und verursacht einen Unfall. Simulation hängt sich auf.
20	F1	B	–	TL startet Kombidisplay-Anwendung versehentlich zweimal. Display wird nicht korrekt dargestellt.
23	F2	C	S2	HAF-Modus deaktiviert sich selbstständig und der Lkw setzt den Gang auf N, obwohl der Gangwahlschalter auf D steht. Eine automatisierte oder manuelle Weiterfahrt ist auch nach einem Neustart der Simulation nicht möglich.
	F3	B	S2	Automatisierter Überholvorgang wird nicht ausgeführt. Nach einer manuellen Durchführung des Manövers wird der Umgebungsverkehr falsch dargestellt.
24	F1	C	S4	Anzeige des Kombidisplays stürzt beim Wechsel in den manuellen Modus ab.
	F2	B	S5	Anzeige des Kombidisplays stürzt ab.
27	F1	C	S3	Tablet hängt sich in der orangen Phase auf.
	F3	B	S2	VP greift beim Überholvorgang manuell ein, da das Ego-Fahrzeug ansonsten mit einem anderen Fahrzeug kollidiert wäre. Anschließend wird der Umgebungsverkehr fehlerhaft dargestellt.
31	F2	C	S3	Kombidisplay verliert Verbindung zu WLAN-Router.

Tabelle B.2 Übersicht zu aufgetretenen Anzeigefehler, die nicht mit einem Neustart gehandhabt werden.

VP	Fahrt	Displayvariante	Situation	Problem- / Fehlerbeschreibung
6	F1	A	–	Tablet hängt sich auf. Der Datensatz von VP 6 wird aufgrund des frühen Komplettausfalls des Tablets aus der Analyse ausgeschlossen.
18	F2	B	–	Am Ende der Versuchsfahrten F2 und F3 wird ein Anzeigefehler auf dem Tablet erkannt, welcher während der Fahrt aber weder von der VP noch vom Versuchsleiter bemerkt wird.
	F3	A	–	
24	F1	C	S6	Kombidisplay verliert (WLAN-)Verbindung.
	F2	B	S2	Kombidisplay verliert (WLAN-)Verbindung. Anwendung wird vom Versuchsleiter während der Fahrt neugestartet, sodass lediglich die Positionierung des Ego-Fahrzeugs in der Navigationskarte nicht korrekt dargestellt wird.
31	F1	A	S2	Kombidisplay verliert (WLAN-)Verbindung. Anwendung wird vom Versuchsleiter während der Fahrt neugestartet, sodass lediglich die Positionierung des Ego-Fahrzeugs in der Navigationskarte nicht korrekt dargestellt wird.

Tabelle B.3 Übersicht zu aufgetretenen Problemen und Fehlern der Simulation bzw. des Simulators.

VP	Fahrt	Displayvariante	Situation	Problem- / Fehlerbeschreibung
7	F2	B	S3	Deaktivierung des HAF-Modus ist über die Bremse nicht möglich.
8	F2	A	S2	Überholvorgang wird nicht automatisiert ausgeführt. Die VP schert nach Aufforderung des TL aus, ohne den HAF-Modus zu deaktivieren. Der Autopilot beendet den Vorgang anschließend selbstständig
22	F2	B	S2	Der Autopilot verreit im Überholmanöver die Lenkung, sodass der Lkw nach rechts ins Schleudern gerät. Die VP bringt den Lkw wieder unter Kontrolle und bewertet die Kritikalität der Situation mit einer 9.
26	F2	C	–	Simulator-Kurzschluss mit Funkensprung beim Hochfahren des Bewegungssystems. Der Versuch wird abgebrochen und aus der Auswertung ausgeschlossen.

Anhang C Referenzierte Konzepte

Blendungsfreie Anbringung einer LED-Leiste im Fahrzeugcockpit

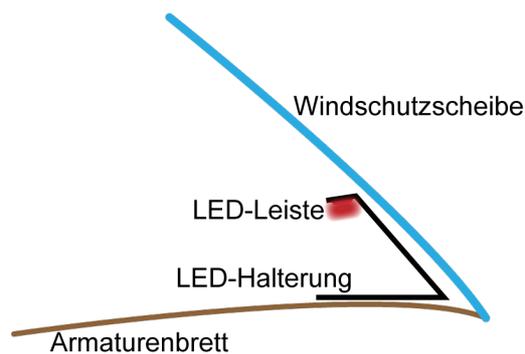


Abbildung C.1: Schematische Darstellung der Anbringung einer LED-Leiste in einem Fahrzeug-Cockpit zur Vermeidung von Blendungen und Spiegelungen [121, S. 29].



Abbildung C.2: Die nach dem Konzept aus Abbildung C.1 prototypisch eingebaute LED-Halterung in einem Fahrzeug-Cockpit [121, S. 37].

Anhang D Design-Optimierung

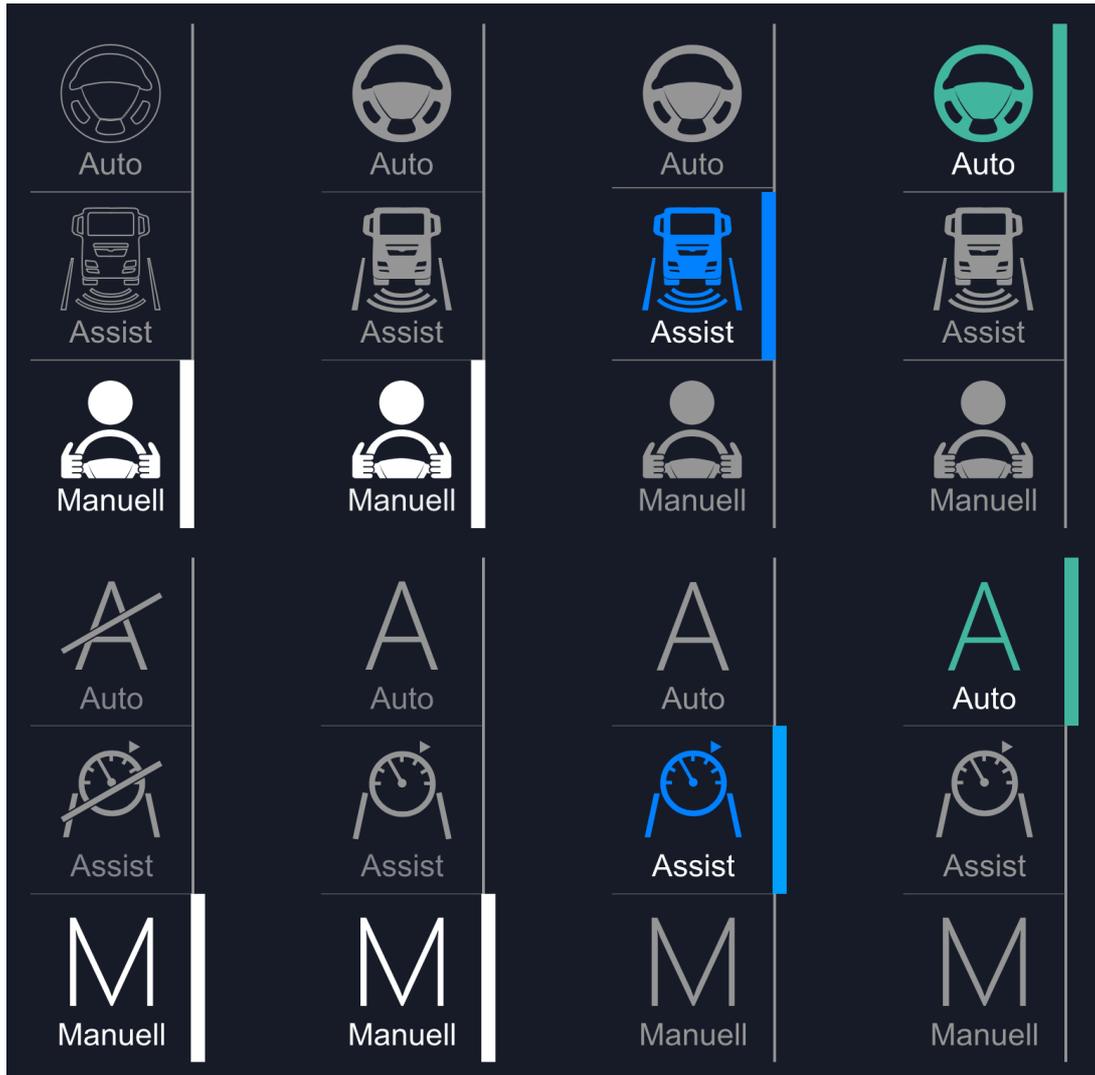


Abbildung D.1: Gestaltungsvarianten des Statusindikators: Optimierte bestehende Variante (oben) vs. Anlehnung an Symbole aus der ISO 2575 [88] (unten).

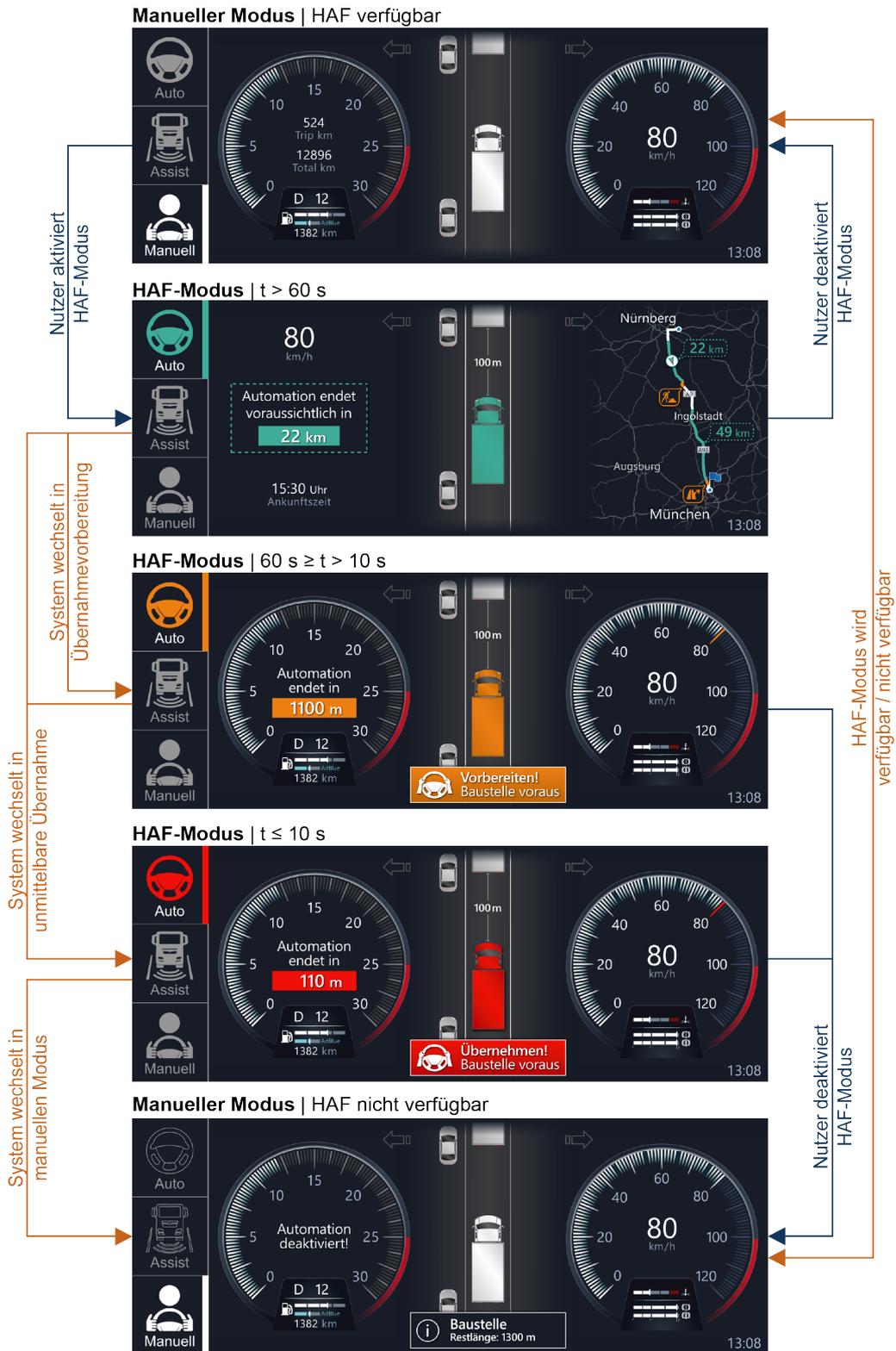


Abbildung D.2: Optimierte Kombidisplay-Anzeige.

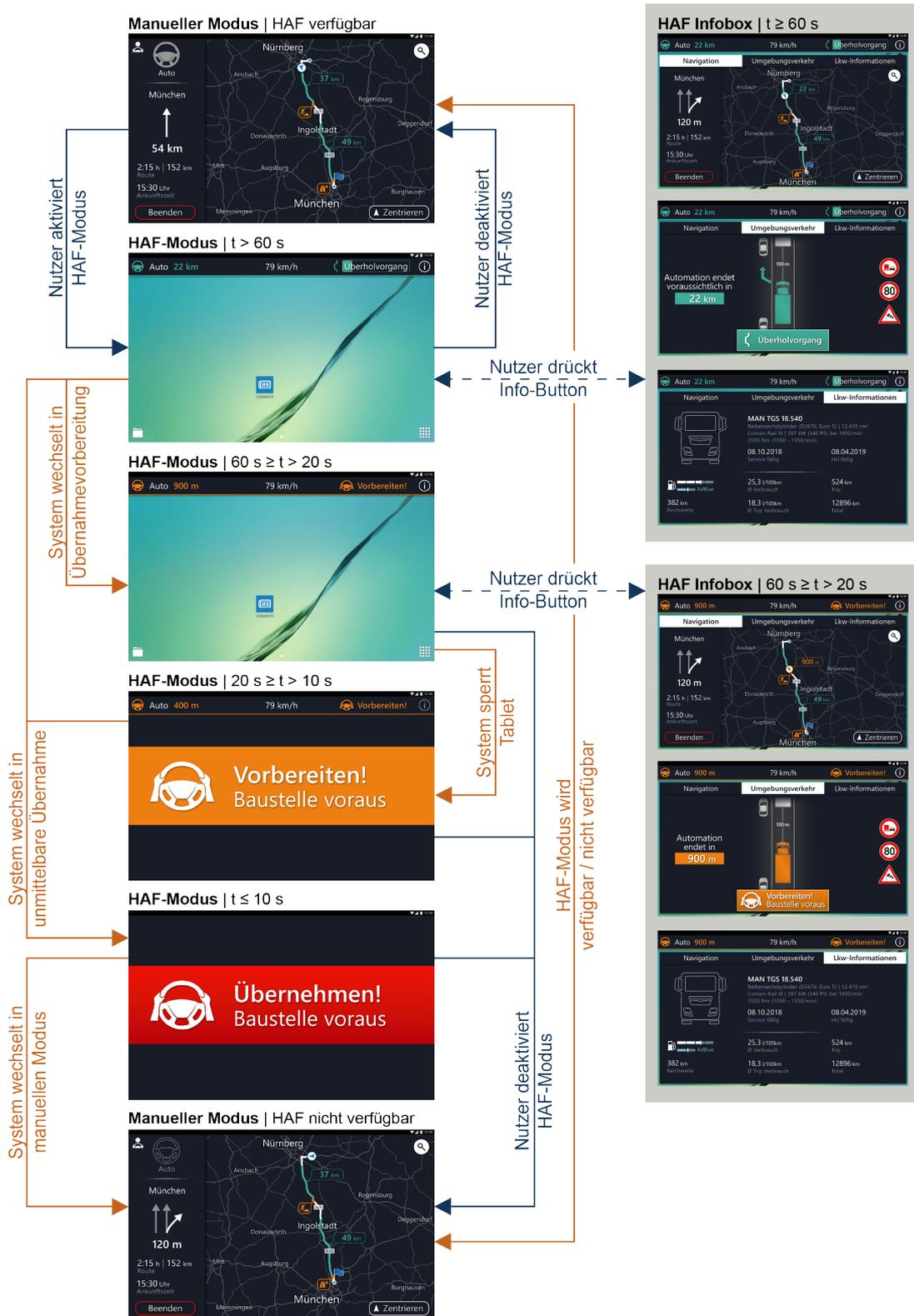


Abbildung D.3: Optimierte Tablet-Anzeige.

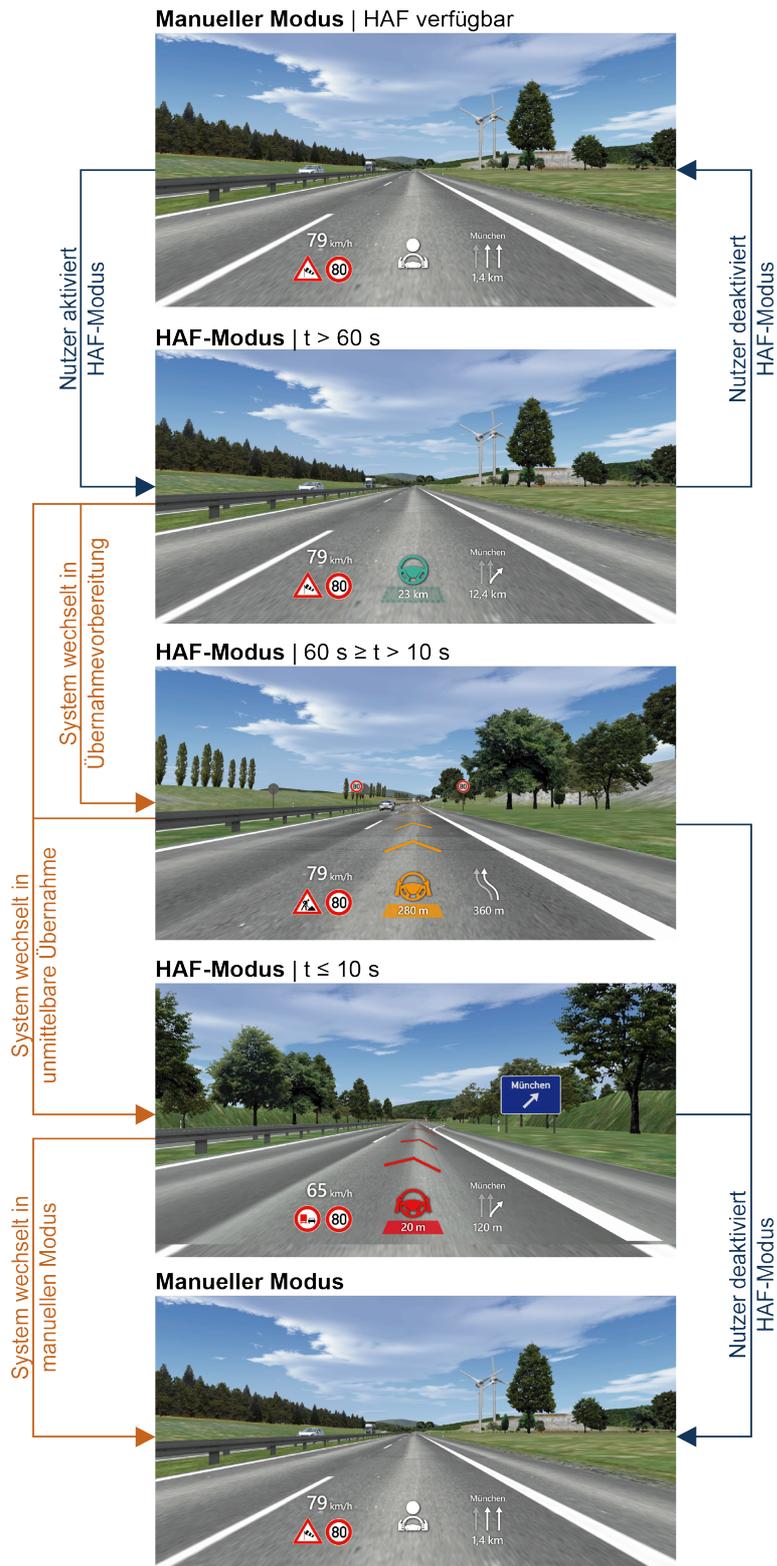


Abbildung D.4: Optimierte HUD-Anzeige.