

Technische Universität München

TUM School of Engineering and Design

**Entwicklung und Evaluation einer adaptiven
Mensch-Maschine-Schnittstelle für Nutzfahrzeuge**

Lasse Schölkopf, M.Sc.

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. rer. nat. Sonja Berensmeier

Prüfer*innen der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp
2. Prof. em. Dr. rer. nat. Heiner Bubb

Die Dissertation wurde am 14.06.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Engineering and Design am 07.08.2023 angenommen.

„Complex things do not have to be confusing.
Similarly, confusing things do not need to be complex.“
Donald A. Norman [1, S. 63]

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München in Kooperation mit der MAN Truck & Bus SE von 2019 bis 2023.

Zunächst bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp, der mir die Möglichkeit zur Promotion gab. Für die Übernahme des Zweitgutachtens und die wertvollen Ratschläge danke ich Prof. Dr. rer. nat. habil. Heiner Bubb. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Prof. Dr. Sonja Berensmeier.

Für das entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung des Promotionsvorhabens danke ich meinen Mentoren bei der MAN Truck & Bus SE, Dr. Britta Michel und Dr.-Ing. Holger Mohra. Die fortwährende Unterstützung und bereichernde Diskussionen waren entscheidend und eine große Hilfe. Meinen MAN-Kollegen Veronika Harsandi, Dr. Anna Sprung, Florian Kremser und Dieter Lutz gilt mein großer Dank für die tolle Zusammenarbeit. Besonderer Dank gilt meinen Kollegen Marian Hirsch und Svenja Escherle für deren großartige fachliche und mentale Unterstützung. Ich freue mich, in euch nicht nur Kollegen, sondern auch Freunde gefunden zu haben.

Meinem Gruppenleiter und Mentor Dr.-Ing. Frank Diermeyer danke ich für die produktiven Diskussionen und den stetigen Rückhalt in allen Phasen dieser Arbeit. Den Kollegen der Forschungsgruppe *AV: Safe Operation* danke ich für den tollen Zusammenhalt, den fachlichen Austausch und die unvergessliche Zeit am Lehrstuhl. Den Festangestellten des FTM, insbesondere Florian Biechl, Nina Julius und Christiane Schulte, danke ich für die unerlässliche Unterstützung und das Engagement.

Ein großer Dank gilt all meinen betreuten Studenten, ohne deren unermüdlichen Einsatz voller Enthusiasmus und Kreativität diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Besonders danke ich Alicia Kneuper, Maria Wolf, Camilla Gatto von der Heyde, Melanie Quinker, Anja Preitschaft, Thomas Boger, Martin Perstorfer und Jessica Schuster.

Meinen Eltern und meinem Bruder danke ich von Herzen. Ihr habt immer an mich geglaubt, mich in meinem Tun bekräftigt und stets unterstützt. Für euren fortwährenden Rückhalt und die Unterstützung bin ich für immer dankbar.

Mein größter Dank gilt meiner Freundin Melanie Marx. Du hast mich immer ermutigt, diese Arbeit anzufertigen, aber genauso, sie im richtigen Moment beiseitezulegen.

Garching, im Mai 2023

Lasse Schölkopf

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
Formelzeichen.....	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	2
1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage.....	3
1.3 Vorgehen der Arbeit.....	3
2 Theoretische Grundlagen und Begriffsdefinitionen	5
2.1 Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug.....	5
2.1.1 Menschliche Informationsverarbeitung	5
2.1.2 Aufgaben des Fahrers	8
2.1.3 Mensch-Maschine-Schnittstelle im Nutzfahrzeug.....	10
2.1.4 Evaluation von Mensch-Maschine-Schnittstellen.....	14
2.2 Adaptive Mensch-Maschine-Schnittstellen.....	17
2.2.1 Definition und Abgrenzung.....	17
2.2.2 Vorteile adaptiver MMS.....	19
2.2.3 Herausforderungen adaptiver MMS.....	21
3 Definition der Adaptivität.....	25
3.1 Stand der Forschung und Technik: Adaptivität und Systemkontext	25
3.1.1 Formen der Adaptivität.....	25
3.1.2 Ansätze der technischen Implementierung.....	29
3.1.3 Auswirkungen der technischen Implementierung auf das Nutzererlebnis	30
3.2 Fragestellung und Vorgehen.....	31
3.3 Explorative Aufgaben- und Alltagsanalyse.....	32
3.4 Quantitative Analyse	34
3.5 Zusammenfassung des Kontexts	35
3.6 Zusammenfassung und Diskussion.....	37
4 Auswahl der Bedienmodalität	39
4.1 Stand der Forschung und Technik: Bedienmodalitäten.....	39

4.1.1	Digitale Bedienmodalitäten	39
4.1.2	Optimierung berührungssensitiver Hardwarekonzepte.....	43
4.2	Fragestellung und Vorgehen.....	51
4.3	Identifikation geeigneter Hardwarekonzepte	52
4.3.1	Aufbau eines morphologischen Kastens	52
4.3.2	Abgeleitete Hardwarekonzepte.....	53
4.4	Expertenbewertung der Hardwarekonzepte	53
4.4.1	Identifikation und Gewichtung der Bewertungsgrößen	54
4.4.2	Bewertung der Hardwarekonzepte	54
4.5	Evaluation in Fahrstudie.....	55
4.5.1	Fragestellung und Hypothesen	55
4.5.2	Versuchsdesign und Versuchsablauf	57
4.5.3	Versuchsaufbau.....	58
4.5.4	Datenerhebung	59
4.5.5	Ergebnisse	59
4.5.6	Diskussion der Studie	61
4.6	Zusammenfassung und Diskussion.....	63
5	Konzeption und Evaluation des Interaktionskonzepts	65
5.1	Stand der Forschung: Gestaltung von Interaktionskonzepten.....	65
5.1.1	Mentale Modelle	65
5.1.2	Relevante Normen und Gestaltungsrichtlinien.....	68
5.2	Fragestellung und Vorgehen.....	69
5.3	Identifikation des initialen mentalen Modells	70
5.3.1	Entwicklung eines Fragebogens	71
5.3.2	Initiales mentales Modell der Nutzergruppe.....	72
5.3.3	Abgeleitete Erkenntnisse	73
5.4	Erste Iterationsschleife: Grobkonzept.....	74
5.4.1	Konzeption und Design.....	74
5.4.2	Evaluation des Grobkonzepts in einer Nutzerstudie	75
5.5	Zweite Iterationsschleife: Feinkonzept.....	77
5.5.1	Konzeption und Design.....	77
5.5.2	Heuristische Evaluation des Feinkonzepts	78
5.5.3	Erkenntnisse	78
5.5.4	Finales Interaktionskonzept	79

5.6	Zusammenfassung und Diskussion	80
6	Vergleich zwischen adaptiver und statischer Mensch-Maschine-Schnittstelle	81
6.1	Fragestellung und Hypothesen	81
6.2	Fahrsimulatorstudie	83
6.2.1	Versuchsdesign und Versuchsablauf	84
6.2.2	Versuchsaufbau	85
6.2.3	Datenerhebung	87
6.2.4	Ergebnisse	88
6.3	Diskussion der Fahrsimulatorstudie	95
6.3.1	Interpretation der Ergebnisse.....	95
6.3.2	Limitationen der Studie	98
6.3.3	Zusammenfassung und Fazit	100
7	Zusammenfassung und Ausblick	101
	Abbildungsverzeichnis	i
	Tabellenverzeichnis	vii
	Literaturverzeichnis	ix
	Vorveröffentlichungsliste	xxix
	Anhang	xxxix

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

Abkürzungsverzeichnis

AAM	Actual Agreement Methode
ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control System
AOI	Area of Interest
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
CAD	Computer Aided Design
CAN	Controller Area Network
DDS	Dreh-Drück-Steller
GUI	Graphical User Interface
LASR	Levels of Adaptive Sensitive Responses
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
Lkw	Lastkraftwagen
MM	Mentales Modell
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
MW	Mittelwert
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
Pkw	Personenkraftwagen
SD	Standard Deviation
SDLP	Standard Deviation of Lane Position
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
SUS	System Usability Scale
TLC	Time to Line Crossing
TTC	Time to Collision
UEQ	User Experience Questionnaire
UX	User Experience

Formelzeichen

Formelzeichen	Beschreibung
α	Signifikanzniveau
α_{bonf}	Nach Bonferroni angepasstes Signifikanzniveau
η^2_G	generalized eta squared
p	Signifikanz
p_{Holm}	Um Bonferroni-Holm korrigierte Signifikanz
χ^2	Chi-Quadrat

1 Einleitung

Ein Großteil der Güter unseres alltäglichen Lebens wird heute sowie in absehbarer Zukunft durch Nutzfahrzeuge auf der Straße befördert [2, S. 30]. So meldet das Statistische Bundesamt für das Jahr 2019 eine Beförderungsleistung von 311.869 Millionen Kilometern im Straßenverkehr [3, S. 7]. Entsprechend viel Zeit verbringen Lkw-Fahrer am Fahrerarbeitsplatz von Nutzfahrzeugen (Abbildung 1.1).



Abbildung 1.1: Lkw-Fahrerarbeitsplatz mit zusätzlich verbauten Bedienteilen für Aufbaufunktionen und rot markierten Bedienorten für Fahrzeugfunktionen [4]

Der Blick in einen Lkw-Fahrerarbeitsplatz zeigt schnell, dass dieser über mehr Funktionen und respektive Bedienteile verfügt als ein Pkw. Dazu tragen nutzfahrzeugspezifische Funktionen wie etwa anhebbare Liftachsen, Arbeitsscheinwerfer und Differentialsperren bei. Neben dieser Vielzahl an proprietären Fahrzeugfunktionen sind Nutzfahrzeuge mit zusätzlichen Bedienungsschnittstellen für sogenannte Aufbaufunktionen ausgestattet [5, S. 624-625], um etwa das Einstellen der Temperatur bei Kühlaufbauten oder das Kippen der Ladefläche bei Baustellenfahrzeugen zu ermöglichen. Die Zahl der Bedienelemente ist bereits heute so hoch, dass der gut einsehbare und bedienbare Bereich der Mittelkonsole nicht mehr ausreicht [6, S. 16] und Funktionen auf die Kniebereiche links und rechts hinter dem Lenkrad sowie über dem Fahrer in Richtung Dachhimmel ausgelagert werden.

Die Bedienung dieser vielen im Fahrerarbeitsplatz verteilten Funktionen an teilweise schlecht einsehbaren Bedienbereichen erfolgt, während es ein bis zu 40 Tonnen schweres und maximal 18 Meter langes Fahrzeuggespann sicher zu führen gilt. Es braucht nicht viel Phantasie, um sich vorzustellen, dass es sich hierbei um eine herausfordernde Aufgabe handelt, erst recht unter Zeitdruck [7, S. 275]. Eine erwartete Zunahme der Funktionen im Nutzfahrzeug [6, S. 17, 8, S. 1] verschärft die Situation, wodurch die Komplexität weiter zu steigen droht [9, S. 43].

Der resultierende Stress wird durch eine steigende technische Komplexität der Fahrzeuge weiter erhöht. Daher sollte der Fahrer bei der Bedienung des Fahrerarbeitsplatzes möglichst unterstützt werden. Die Bedienelemente sollten gut einsehbar und erreichbar platziert werden, um nicht von der Fahraufgabe abzulenken. Dem Anzeige- und Bediensystem eines Lkw wird deshalb bereits heute eine hohe Bedeutung zugemessen [5, S. 618]. So erfolgt die Gestaltung während des Entwicklungsprozesses anhand ergonomischer Gesichtspunkte [7, S. 273], aufgrund der stetig steigenden Anzahl an Funktionen sind jedoch neue Lösungsansätze erforderlich.

Neue Konzepte werden erst recht durch den Umstand benötigt, dass der zur Verfügung stehende Platz für weitere physische Bedienelemente wie Hubtaster und Kippschalter nicht nur limitiert ist [10, S. 82], sondern dieser zukünftig tendenziell verkleinert wird. Es wird argumentiert, dass eine Reduktion des Bauraums für den Armaturenräger aus Sicherheitsgründen von Vorteil wäre. So zeigt ein von Summerskill et al. [11] entwickeltes Konzept, dass mit einem reduzierten Armaturenräger eine weiter nach unten gezogene Windschutzscheibe möglich ist, wodurch in Konsequenz die Rundumsicht [11, S. 70] und dadurch die Sicherheit verbessert wird. In Kombination mit einem abgesenkten Fahrerhaus wird der Blickwinkel vergrößert. Sich unmittelbar vor dem Fahrzeug aufhaltende Verkehrsteilnehmer, wie beispielsweise Fahrradfahrer an einer Ampel, können so wahrgenommen werden. Diese Anforderung der direkten Sicht auf schwache Verkehrsteilnehmer gewinnt zunehmend an Bedeutung, etwa durch Zufahrtsbeschränkungen für Fahrzeuge, welche diese nicht erfüllen [12].

Ein Abkommen von der heute vorherrschenden Bedienphilosophie im Nutzfahrzeugbereich, wobei pro Fahrzeugfunktion ein dediziertes Bedienteil verbaut wird, ist daher langfristig unausweichlich. Weiter besteht durch die weiter zunehmende Komplexität des Fahrerarbeitsplatzes Handlungsbedarf, weshalb zukünftige Mensch-Maschine-Schnittstellen (MMS) den Fahrer bei seiner Arbeit unterstützen sollten.

1.1 Motivation

Abhilfe versprechen sich Automobilhersteller durch den Einsatz von Touchdisplays. Diese ermöglichen die Bündelung von zahlreichen Funktionen an einem Bedienort und vermögen die Anzahl an physischen Bedienelementen zu reduzieren [13, S. 1, 14, S. 2]. Das Verbauen neuer Funktionen am Fahrerarbeitsplatz erfolgt durch eine softwareseitige Parametrierung. Dadurch wird ein weiteres Problem der Nutzfahrzeugbranche gelöst. So ist der heutige Fahrerarbeitsplatz nicht nur aus Nutzer-, sondern auch aus Herstellersicht komplex. Um die vielfältigen Einsatzszenarien und damit einhergehende Ausstattungsvarianten abzudecken, entsteht eine hohe technische Variantenvielfalt im Entwicklungs- und Herstellungsprozess. So müssen die Bedienelemente für die im Lkw benötigten Funktionen individuell im Armaturenräger verbaut werden und etliche Ersatzteilvarianten für Reparaturen auf Lager gehalten werden. Aufgrund der damit einhergehenden Kosten ist eine Reduktion dieser Komplexität anzustreben [15, S. 196].

Zwar vermag die Integration von Fahrzeugfunktionen in ein Touchdisplay hierfür Abhilfe zu schaffen, jedoch kann mitunter die Gebrauchstauglichkeit darunter leiden. So muss durch tiefe Menüstrukturen navigiert werden, um die gewünschte Fahrzeugfunktion zu aktivieren. Damit verlagert sich die Komplexität der Bedienung, und das Ablenkungspotenzial kann steigen. Bestätigt wird dies dadurch, dass Bedienvorgänge in modernen Fahrzeugen mit Touchscreens wesentlich länger dauern als in älteren und noch mit physischen Tastern ausgestatteten Fahrzeugen [16]. Von dem Gefahrenpotenzial zeugt der vor dem Oberlandesgericht Karlsruhe

verhandelte Fall eines Tesla Fahrers, der beim Versuch, den Scheibenwischer über das touch-screenbasierte Bediensystem zu aktivieren, verunfallte [17]. Ablenkungen jeglicher Art von der Fahraufgabe gilt es insbesondere im Nutzfahrzeug zu vermeiden, weil Fahrfehler aufgrund der involvierten Fahrzeugmasse drastische Konsequenzen haben. So ist die Anzahl der durch Unfälle mit Lkw-Beteiligung getöteten Menschen in den letzten Jahren gestiegen [18, S. 2]. Dabei stellt die Ablenkung des Fahrers eine der häufigsten Unfallursachen dar [10, S. 82], woraus abgeleitet wird, dass die Gestaltung von Lkw-Fahrerarbeitsplätzen eine ablenkungsarme und effiziente Bedienung zum Ziel haben muss. Es werden daher neue Bedienkonzepte benötigt, um das Ablenkungspotenzial einzuschränken [19, S. 40].

Einen Lösungsansatz hierfür bieten adaptive Bedienkonzepte: Sie unterstützen den Nutzer, indem sie die Flut an Informationen filtern und nur aktuell relevante Funktionen anzeigen [19, S. 41, 20, S. 313]. Insbesondere bei limitiertem Platz sind adaptive Mensch-Maschine-Schnittstellen (MMS) von Vorteil [21, S. 1247]. Das Potenzial adaptiver MMS wurde im Pkw-Sektor bereits durch Forschungsprojekte und Dissertationen [9, 22–28] betrachtet, und erste Anwendungsbeispiele sind in Serienfahrzeugen zu finden [29, 30]. Die IBM Corporation prognostiziert, dass bis 2030 auch im Lkw-Sektor Systeme eingeführt werden, die dem Fahrer relevante Inhalte ausspielen [31, S. 5]. Bislang steht die Betrachtung des Lkw-Sektors als Anwendungsgebiet jedoch noch aus.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Ziel dieser Arbeit ist es, eine adaptive MMS für die Bedienung von Fahrzeugfunktionen im Nutzfahrzeug zu entwerfen, um den Fahrer zu entlasten und den am Fahrerarbeitsplatz verfügbaren Platz bestmöglich zu nutzen. Um eine hohe Nutzerfreundlichkeit und Gebrauchstauglichkeit zu gewährleisten, sollen Methoden aus der nutzerzentrierten Entwicklung kombiniert und angewandt werden. Weiter wird ein Vorgehen vorgestellt, wie eine MMS unter Berücksichtigung der Erwartungshaltung der Nutzer entwickelt werden kann, damit das System erwartungskonform ausfällt.

Um zu prüfen, inwiefern sich die adaptive MMS für den Einsatz im Nutzfahrzeug eignet, wird die entwickelte MMS anschließend evaluiert und mit einem herkömmlichen statischen Bediensystem verglichen. Die aus dieser Zielsetzung abgeleitete übergeordnete Forschungsfrage lautet demnach wie folgt:

„Eignet sich eine adaptive Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Bedienung von Fahrzeugfunktionen im Nutzfahrzeug?“

1.3 Vorgehen der Arbeit

Für die Beantwortung der zentralen Forschungsfrage wird ein zweistufiges Vorgehen gewählt (Abbildung 1.2), woran sich der Aufbau dieser Arbeit orientiert.

Nach dem Darlegen der für die folgenden Kapitel relevanten theoretischen Grundlagen in Kapitel 2 wird in Schritt 1 des Vorgehens (Kapitel 3-5) eine adaptive MMS anhand nutzerzentrierter Methoden und unter Berücksichtigung für das Nutzfahrzeug spezifischer Anforderungen entwickelt.



Abbildung 1.2: Zweistufiges Vorgehen zur Beantwortung der aufgestellten Forschungsfrage

In Kapitel 3 wird zunächst die Adaption des Systems definiert und festgelegt, auf welchen Faktor hin sich das System automatisch anpassen soll.

Adaptivität setzt voraus, dass die Funktionsbelegung geändert werden kann. Daher werden in Kapitel 4 geeignete digitale Bedienmodalitäten identifiziert und miteinander verglichen, um eine dynamische Funktionsanzeige im Lkw zu ermöglichen.

Die Entwicklung der adaptiven MMS wird in Kapitel 5 durch die Gestaltung eines für Lkw-Fahrer optimierten Interaktionskonzepts unter Berücksichtigung des mentalen Modells der Nutzergruppe abgeschlossen.

Im zweiten Schritt wird das System evaluiert und mit einer statischen MMS verglichen, wie sie derzeit im Nutzfahrzeug eingesetzt wird. Das Vorgehen und die Ergebnisse dieses Vergleichs werden in Kapitel 6 beschrieben und diskutiert.

Es folgt eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick in Kapitel 7.

2 Theoretische Grundlagen und Begriffsdefinitionen

Dieses Kapitel erläutert die theoretischen Grundlagen, welche für das zweistufige Vorgehen (Abbildung 1.2) relevant sind. Hierfür wird auf den Stand der Forschung und Technik bezüglich der Mensch-Maschine-Interaktion sowie adaptiver Systeme eingegangen. Weiter werden für spätere Kapitel relevante Definitionen eingeführt.

2.1 Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug

Dieser Abschnitt geht auf die menschliche Informationsverarbeitung, die Aufgaben des Fahrers sowie nutzfahrzeugspezifische Rahmenbedingungen der Interaktion ein. Weiter werden Ansätze zur Evaluation von MMS dargelegt.

2.1.1 Menschliche Informationsverarbeitung

Es werden im Folgenden grundlegende Modelle der menschlichen Informationsverarbeitung dargelegt, die für die Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug relevant sind. Die Modelle zeigen die sensorischen und kognitiven Fähigkeiten des Menschen sowie dessen Leistungsgrenzen auf.

Die Verarbeitung von Informationen folgt nach Bubb et al. [32, S. 68-69] einem dreistufigen Prozess und beginnt mit der *Informationsaufnahme*. Diese erfolgt über ein für die Art des Umweltreizes passendes Sinnesorgan. Basierend auf den aufgenommenen Informationen bildet sich der Mensch im nächsten Schritt, der *Informationsverarbeitung*, ein möglichst objektives Bild seiner Umwelt, des eigenen Handelns sowie der Aktionen außenstehender Akteure im Umfeld. Weiter werden beabsichtigte Handlungen als Reaktion auf die aufgenommenen und verarbeiteten Informationen abgeleitet. Die ausgewählte Handlung wird im Teilschritt der *Informationsumsetzung* in die Tat umgesetzt, etwa durch eine Ansteuerung von Muskelgruppen der Extremitäten oder der Kommunikation über Sprache [32, S. 68-69]. Dieser grundlegende Ablauf der Informationsverarbeitung wird im Folgenden anhand eines von Wickens et al. [33] aufgestellten Modells weiter erörtert.

Informationsverarbeitung nach Wickens

Ein im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion gängiges Modell stellt die in Abbildung 2.1 gezeigte menschliche Informationsverarbeitung nach Wickens et al. [33, S. 22-23] dar.

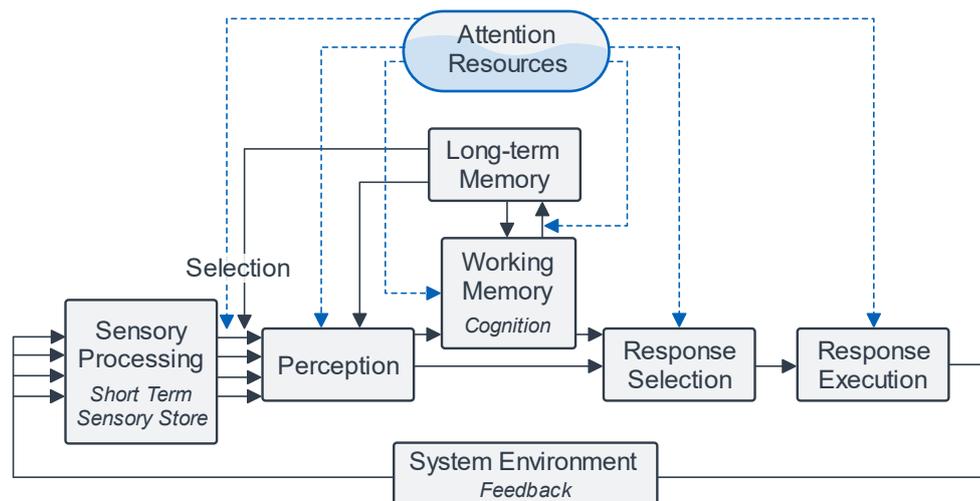


Abbildung 2.1: Modell der menschlichen Informationsverarbeitung mit begrenzten Ressourcen der Aufmerksamkeit nach Wickens et al. [33, S. 22]

Das Modell folgt dem von Bubb et al. [32, S. 68-69] genannten Ablauf der Informationsverarbeitung (Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung), unterteilt diese jedoch weiter und ergänzt die Aufmerksamkeit. So beginnt die Reizwahrnehmung mit einer Verarbeitung des Reizes und einer Zwischenspeicherung von bis zu einer Sekunde in einem sensorischen Kurzzeitspeicher [33, S. 22]. Die Autoren unterscheiden zwischen einem Sinneseindruck und dessen tatsächlicher Wahrnehmung, welche die Bedeutung der Information beinhaltet. Diese Interpretation von Reizen geschieht durch einen Abgleich mit im Langzeitgedächtnis abgespeicherten Erfahrungen mit vergleichbaren Reizen und unserem generellen Verständnis der Abläufe unserer Umwelt [33, S. 22]. Zum Beispiel assoziiert ein Fahrer das Erblicken einer ver-
eisten Fahrbahn mit drohender Gefahr.

Das Verstehen einer Situation kann direkt eine Reaktion auslösen, die zunächst ausgewählt und dann ausgeführt wird [33, S. 22]. Im vorliegenden Beispiel könnte der Fahrer sich etwa dazu entscheiden, die Geschwindigkeit zu verringern und den Fuß vom Gaspedal anzuheben. Wird nicht direkt der Auswahlprozess einer geeigneten Reaktion angestoßen, so kann die Information im Kurzzeitgedächtnis zwischengespeichert werden [33, S. 23]. Dies ermöglicht die Aufnahme weiteren Wissens über die Situation, wie beispielsweise dem Straßenverlauf nach der vereisten Fahrbahnstelle. Das Kurzzeitgedächtnis dient nicht nur dem Zwischenspeichern von Informationen, sondern auch dem Nachdenken, um anschließend wieder in den Prozess der Auswahl einer geeigneten Reaktion zu gelangen [33, S. 23].

Das Modell veranschaulicht zudem, dass die menschliche Aufmerksamkeit begrenzt ist und gelenkt werden muss. So müssen sich die Teilschritte der Informationsselektion, der Wahrnehmung, der Kognition sowie die Auswahl und Ausführung einer geeigneten Reaktion diese mentale Ressource teilen [33, S. 23]. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass der Mensch zwischen diesen Prozessen priorisieren muss und die simultane Ausführung von Aufgaben nur eingeschränkt bewältigen kann.

Das Modell erklärt jedoch nicht, weshalb manche Aufgaben besser parallel ausgeführt werden können als andere Kombinationen. So fällt eine Konversation mit dem Beifahrer während der Ausführung der Fahraufgabe leicht, wohingegen das gleichzeitige Folgen einer Vorlesung und Führen eines Gesprächs mit dem Sitznachbarn schwierig bis unmöglich einzustufen ist. Einen Erklärungsansatz hierfür bietet das nachfolgend vorgestellte Modell multipler Ressourcen.

Modell multipler Ressourcen nach Wickens

Unter bestimmten Bedingungen kann die Aufmerksamkeitsressource besser geteilt werden als in anderen. Ansätze für diese Differenzen bei der gleichzeitigen Ausführung von Aufgaben liefert das Modell multipler Ressourcen nach Wickens [34, 35], das in Abbildung 2.2 gezeigt wird.

In Abbildung 2.1 ist die Aufmerksamkeitsressource vereinfacht als ein singuläres Kontingent an Aufmerksamkeitsressourcen dargestellt. Das Modell multipler Ressourcen (Abbildung 2.2) teilt sie in vier Dimensionen auf. Diese bestehen aus jeweils diskreten und dichotomen Ausprägungen für die Phase der Verarbeitung (*Stages*), der Wahrnehmungsmodalität (*Modalities*), der visuellen Verarbeitung (*Visual Processing*) sowie den Verarbeitungs-codes (*Codes*) beziehungsweise Reaktionen (*Responses*) [34, S. 163].

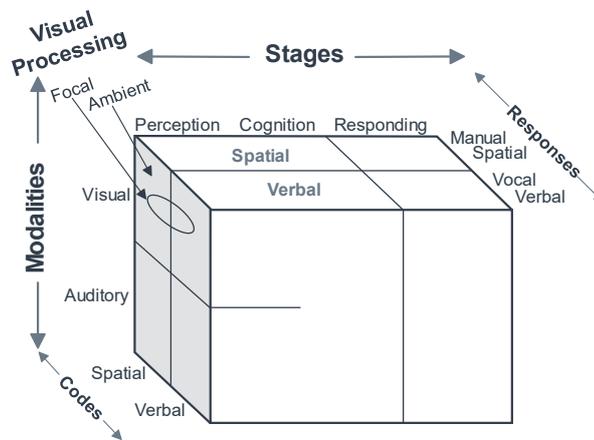


Abbildung 2.2: Vierdimensionales Modell multipler Ressourcen nach Wickens [34, S. 163, 35, S. 450]

Die erste Dimension *Stages* bezieht sich auf den Prozess der Informationsverarbeitung. Gemäß Wickens [34] greifen die Informationsaufnahme sowie die kognitive Verarbeitung der Informationen auf das Kurzzeitgedächtnis zurück, wohingegen die Reaktion die zweite unabhängige Phase darstellt [34, S. 163]. Während des Wahrnehmungsprozesses wird über die zweite Dimension der Modalität (*Modalities*) zwischen dem auditiven und visuellen Kanal unterschieden [34, S. 164-165]. So können gleichzeitig über den visuellen und auditiven Kanal Informationen aufgenommen, jedoch nur eingeschränkt mehrere Informationen gleichzeitig auf visuellem Weg erfasst werden. Der visuelle Kanal wird weiter in die fokale und periphere Wahrnehmung unterteilt und stellt die dritte Dimension (*Visual Processing*) dar [34, S. 165-166]. Über den fokalen visuellen Kanal kann etwa ein Verkehrsschild abgelesen werden, während im peripheren Sichtfeld verortete Verkehrsteilnehmer parallel wahrgenommen werden. Die vierte Dimension wird über die Verarbeitungs-codes (*Codes*) definiert und unterscheidet zwischen einer räumlichen oder verbalen Codierung [34, S. 166-167]. Die Bearbeitung räumlicher Aufgaben erfolgt in der Regel über die muskuläre Ansteuerung der Extremitäten, wohingegen verbal codierte Aufgaben unter Einsatz von Sprache bewältigt werden (*Responses*).

Aus dem Modell kann abgeleitet werden, dass Aufgaben besser gleichzeitig ausführbar sind, wenn diese über unterschiedliche Ausprägungen der vier Dimensionen definiert sind. Damit kann begründet werden, weshalb die Verlagerung der Interaktion mit dem Fahrzeug auf den auditiven Kanal über ein Sprachbediensystem von Vorteil ist [36, S. 32]. Das Bedienen eines auf den visuellen Kanal ausgelegten Infotainmentsystems während der Fahrt ist hingegen kritisch [9, S. 12]. Dies ist damit zu erklären, dass keine Konflikte zwischen den multiplen Ressourcen der Aufmerksamkeit auftreten.

Die Modelle nach Wickens [33–35] zeigen die Limitationen der Informationsverarbeitung auf und lassen schlussfolgern, dass die gleichzeitige Ausführung von Aufgaben nur eingeschränkt möglich ist. Ein durch die Modelle nicht berücksichtigter Aspekt ist die Erfahrung des Nutzers mit der vorliegenden Aufgabe. So fällt einem erfahrenen Berufskraftfahrer eine Konversation während der Fahrt leichter als einem Fahranfänger. Erklärungsansätze hierfür bietet das Dreiebenen-Modell nach Rasmussen [37], auf das für Ausführungen hinsichtlich des fertigkeitbasierten, regelbasierten und wissensbasierten Handelns verwiesen wird.

2.1.2 Aufgaben des Fahrers

Das Führen eines Fahrzeugs zählt zu einer der komplexesten Tätigkeiten, die der Mensch im Alltag verrichtet [8, S. 9]. So müssen nach Bubb et al. [32] während der Fahrt viele Informationen aufgenommen und bewertet werden, Entscheidungen getroffen und eine angemessene Reaktion selektiert sowie in die Tat umgesetzt werden [32, S. 68]. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.1.1 aufgezeigten Grenzen der gleichzeitigen Informationsverarbeitung wird ersichtlich, dass das Führen eines Fahrzeugs kein triviales Unterfangen ist. Dies trifft insbesondere für Nutzfahrzeuge zu, weil die hohen Fahrzeugmaße und die -masse eine vorausschauende Fahrweise und einen besonders aufmerksamen Fahrer erfordern.

Unterteilung der Fahraufgabe

Die Fahraufgabe setzt sich nach Bubb [38, S. 27-29, 39, S. 21] aus einer primären, sekundären und tertiären Fahraufgabe zusammen, wie aus Abbildung 2.3 hervorgeht.

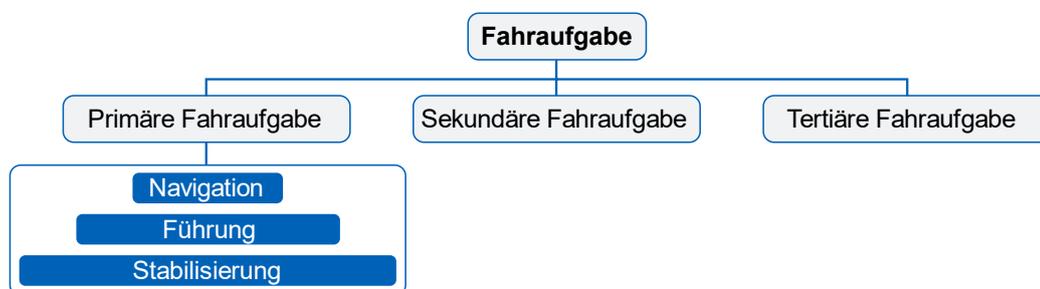


Abbildung 2.3: Unterteilung der Fahraufgabe nach Bubb [38, S. 27-29, 39, S. 21]

Primäre Fahraufgabe. Die primäre Fahraufgabe beinhaltet die für das auf Kurs halten des Fahrzeugs essenziellen Tätigkeiten [39, S. 21]. Nach Geiser [40, S. 77] und Bubb [39, S. 21] ist eine weitere Unterteilung in drei Ebenen möglich, wie nachfolgend erörtert wird.

Die Stabilisierungsaufgabe stellt nach Geiser die unterste Ebene dar [40, S. 77-78]. Der Fahrer stabilisiert dabei das Fahrzeug kontinuierlich und führt die Längs- und Querregelung mittels Gas- und Bremspedal sowie Lenkrad durch [40, S. 77-78]. Bubb reduziert die Aufgabe auf die Forderung, Berührungen mit statischen oder dynamischen Verkehrsteilnehmern und Objekten zu vermeiden [38, S. 27-29]. Gemäß Jentsch et al. [41] liegt der Planungshorizont der Fahrzeugstabilisierung bei unter einer Sekunde [41, S. 5]. Gleichzeitig liegt eine hohe Sicherheitsrelevanz vor, weil Fehler direkt zu Unfällen führen können [41, S. 5].

Die mittlere Ebene beinhaltet die Führungsaufgabe, worunter die Wahl des Geschwindigkeitsniveaus sowie der Trajektorie auf der Fahrbahn fällt [40, S. 78]. Weiter hat der Fahrer sicherzustellen, dass andere Verkehrsteilnehmer nicht zu riskanten Fahrmanövern gezwungen

werden [38, S. 27-29]. Nach Bubb liegt der Planungshorizont bei rund 200 Metern [38, S. 27-29] oder zwei bis drei Sekunden nach Jentsch et al. [41, S. 5].

Die Navigationsaufgabe bildet die oberste Ebene und wird über die Wahl des Weges vom Startpunkt bis zum Ziel der Fahrt unter Berücksichtigung räumlicher, zeitlicher sowie witterungsbedingter Einflüsse definiert [40, S. 78]. Nach Bubb muss der Fahrer hierfür festlegen, wie das verfügbare Straßennetz kombiniert werden soll, um das gewünschte Ziel der Fahrt zu erreichen [38, S. 27-29]. Die Zeitkritikalität sowie Sicherheitsrelevanz dieser Ebene fällt niedriger als bei der Stabilisierungs- und Führungsebene aus [41, S. 5].

Sekundäre Fahraufgabe. Die sekundäre Fahraufgabe wird nach Bubb durch Tätigkeiten definiert, die in Abhängigkeit von der primären Fahraufgabe anfallen [39, S. 22]. Hierunter fällt das Informieren anderer Verkehrsteilnehmer über einen Fahrstreifenwechsel durch das Betätigen des Blinkers oder Reaktionen auf Umwelteinflüsse, wie das witterungsbedingte Aktivieren des Scheibenwischers. Die Betätigung von Kupplung und Schaltknauf beim Gangwechsel eines manuellen Getriebes fällt ebenfalls unter die sekundäre Fahraufgabe [39, S. 23, 42, S. 56].

Tertiäre Fahraufgabe. Unter die tertiäre Fahraufgabe fallen Aufgaben, die nicht direkt mit der primären Fahraufgabe zusammenhängen [39, S. 23]. Hierzu gehören etwa komforterhöhende Einstellungen, wie die Bedienung der Klimaanlage oder des Radios [39, S. 21], oder das Entgegennehmen von Telefonaten über die Freisprecheinrichtung [39, S. 23, 42, S. 56]. Zwar sind durch die Bedienung von tertiären Aufgaben keine Auswirkungen auf die Fahrgüte zu erwarten, jedoch sollte das resultierende Ablenkungspotenzial von der primären und sekundären Fahraufgabe nicht unterschätzt werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Fahraufgabe in Unteraufgaben unterteilt werden kann, die sich bezüglich der Sicherheitskritikalität sowie des Zeithorizonts unterscheiden. Die Bedienelemente des Fahrzeugs lassen sich den entsprechenden Aufgaben zuordnen. So kann während des Gestaltungsprozesses vergegenwärtigt werden, welche Auswirkungen Fehlbedienungen haben [43, S. 8-12]. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf Fahrzeugfunktionen, die überwiegend in Abhängigkeit der primären Fahrtätigkeit bedient werden und somit der sekundären Fahraufgabe zuzuordnen sind. Daher liegt eine erhöhte Sicherheitsrelevanz im Vergleich zu Komfortfunktionen der tertiären Fahraufgabe vor.

Beanspruchte Sinneskanäle

Zur Erfüllung der im vorigen Abschnitt dargelegten Fahraufgabe nimmt der Fahrer kontinuierlich Informationen auf, die anschließend verarbeitet werden, um Reaktionen abzuleiten und auszuführen. Im Straßenverkehr ist der optischen Wahrnehmung die dominierende Rolle beizumessen [32, S. 68, 44, S. 4], weil ein Großteil der relevanten Informationen visuell kommuniziert wird. Aus Tabelle 2.1 geht hervor, dass die primäre Fahraufgabe neben dem visuellen den haptischen und auditiven Sinneskanal beansprucht.

Dennoch wird geschlossen, dass insbesondere der visuelle Kanal bei der Ausführung der Fahraufgabe stark belastet ist [45, S. 643]. Unter Berücksichtigung des in Abschnitt 2.1.1 eingeführten Modells multipler Ressourcen nach Wickens [34] wird argumentiert, dass eine Verlagerung von Informationen auf weitere Sinneskanäle vorteilhaft ist.

Tabelle 2.1: Bei der primären Fahraufgabe benötigte Kanäle der Sinneswahrnehmung nach Fortmüller [46, S. 23] und Zuordnung zur Fahraufgabe nach Jentsch [47, S. 24]

Ebene der Fahraufgabe	Information	Sinneswahrnehmung		
		visuell	haptisch	auditiv
Navigation	Kontrolle des gewählten Routenverlaufs	✓		
	Abstände und Streckenverlauf	✓		
Bahnführung	Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und Sollkurs	✓		
	Wahrnehmung anderer Verkehrsteilnehmer	✓		✓
Stabilisierung	Fahrgeschwindigkeit	✓		✓
	Spurabweichung	✓		
	Quer- und Giergeschwindigkeit	✓		
	Quer- und Längsbeschleunigung		✓	
	Gierbeschleunigung		✓	
	Neigungswinkel (Nicken, Wanken)	✓	✓	
	Lenkwinkel	✓		
	Lenkmoment		✓	
	Kräfte der Stell- und Bedienteile		✓	
	Fahrgeräusch			✓

2.1.3 Mensch-Maschine-Schnittstelle im Nutzfahrzeug

Die Gestaltung von MMS im Lkw orientiert sich in vielen Aspekten an Automobilen. Jedoch gibt es Unterschiede, die darauf zurückzuführen sind, dass das Führen eines Nutzfahrzeugs eine Arbeitstätigkeit darstellt [6, S. 12] und ein Lkw als Arbeitsmittel zu verstehen ist. Daraus ergeben sich nach Hilgers [6, S. 11-12] folgende wesentliche Anforderungen an die MMS von Nutzfahrzeugen:

- Eine sichere Bedienbarkeit muss jederzeit gegeben sein. Ablenkungen von der Fahraufgabe gilt es durch einen klaren und aufgeräumten Fahrerarbeitsplatz zu minimieren.
- Die Bedienung des Fahrzeugs muss effizient möglich sein. Der Fahrer sollte sich schnell in dem Fahrerarbeitsplatz zurechtfinden und Bedienfehler vermieden werden.
- Der Fahrer muss gefallen an dem Fahrerarbeitsplatz finden.

Die sichere und effiziente Bedienung ist im Pkw-Bereich ebenfalls von hoher Relevanz, jedoch wird besonders der User Experience als Differenzierungsmerkmal eine große Bedeutung zugemessen [19, S. 23]. Im Vergleich hierzu spielen bei Fahrerarbeitsplätzen von Nutzfahrzeugen

die wahrgenommene Qualität des Innenraums sowie Komfortfunktionen bislang eine untergeordnete Rolle [48, S. 2]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Käufer und Nutzer von Lkw in der Regel nicht ein und dieselbe Person sind. Meist werden Lkw von einem Unternehmen gekauft und den angestellten Fahrern zur Verfügung gestellt. Da sich jedoch auch Lkw-Fahrer bei der vom Speditionsunternehmen getroffenen Kaufentscheidung einbringen [6, S. 12], ist die Akzeptanz und User Experience nicht zu vernachlässigen. So liegt beispielsweise die haptische Anmutung von Stellteilen im Nutzfahrzeug aktuell auf einem niedrigeren Niveau und bietet Verbesserungspotenzial [48, S. 2].

Ein weiteres Differenzierungsmerkmal zwischen Lkw und Pkw ist die im Nutzfahrzeugsektor höher ausfallende Anforderung an die Lebensdauer von Fahrerarbeitsplätzen bei einer gleichzeitig höheren Verschmutzung [49, S. 64-65]. Weiterhin verbringen Lkw-Fahrer mehr Zeit hinter dem Steuer als im Pkw-Bereich üblich [48, S. 2]. Dementsprechend besteht bei der Gestaltung und Entwicklung von Bedienteilen die Anforderung einer hohen Lebensdauer und Robustheit [49, S. 65]. Weiterhin sollten die User Experience und damit einhergehend die Qualität der langen im Lkw verbrachten Zeit für die Fahrer erhöht werden.

Nutzfahrzeughersteller müssen eine Vielzahl von Einsatzszenarien mit ihren Fahrzeugen abdecken [50, S. 20]. Zum Beispiel werden Lkw im Baustellenverkehr, im Langstreckenverkehr oder als Kommunalfahrzeug eingesetzt. Diese unterschiedlichen Bereiche stellen jeweils individuelle Anforderungen an Nutzfahrzeuge, die dadurch mit speziellen Fahrzeugfunktionen ausgerüstet werden müssen. Die daraus resultierende hohe Anzahl an Fahrzeugfunktionen führt zu einer hohen Variantenvielfalt der Bedienteile am Fahrerarbeitsplatz und komplexen Produktionsprozessen. Dies wiederum führt zu einem überproportionalen Anstieg der Kosten [51, S. 161] bei gleichzeitig niedrigeren Stückzahlen als im Pkw-Bereich. Es ist anzumerken, dass bereits Pkw-Hersteller zu einem Spagat zwischen Varianz, Stückzahl und Kosten gezwungen sind [52, S. 82]. Eine hohe Variantenvielfalt stellt für Nutzfahrzeughersteller eine Herausforderung dar [15, S. 196], weil die Wirtschaftlichkeit des Produkts aus Betreibersicht einen hohen Stellenwert hat [15, S. 197]. Eine weitere Differenzierung zwischen Pkw und Nutzfahrzeug geht aus den abweichenden Fahrzeugfunktionen und der Anzahl hervor, wie im Folgenden ausgeführt wird.

Es wird zusammengefasst, dass Nutzfahrzeuge im Gegensatz zum Pkw primär als Arbeitsgerät zu verstehen sind und der User Experience bislang eine untergeordnete Rolle beigemessen wird. Weiter müssen Nutzfahrzeuge eine Vielzahl von Einsatzzwecken abdecken. Daraus resultieren viele Fahrzeugfunktionen, auf die nachfolgend näher eingegangen wird.

Fahrzeugfunktionen

Wie im vorigen Abschnitt dargelegt, müssen Nutzfahrzeuge eine Vielzahl an Einsatzzwecken abdecken können. In Summe verfügt ein Nutzfahrzeug über viele Fahrzeugfunktionen [6, S. 16], die in Abhängigkeit von der primären Fahraufgabe bedient werden müssen und somit der sekundären Fahraufgabe zuzuordnen sind (Abschnitt 2.1.2). Neben aus dem Pkw bekannten Assistenzsystemen werden Anfahrhilfen, Liftachsen, Warnleuchten und die Fahrniveauregulierung vom Fahrer bedient. Je nach Einsatzzweck wird das Fahrzeug weiter spezialisiert [2, S. 3, 15, S. 197] und um benötigte Funktionen erweitert. So werden Baustellenfahrzeuge für eine Erhöhung der Geländetauglichkeit, um Offroadfunktionen wie zuschaltbare Differentialsperren, einen Geländemodus für das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) sowie das Antiblockiersystem (ABS), eine Lenkbremse und Freischaukelfunktionen, erweitert. Neben proprietären Fahrzeugfunktionen kommen weitere Bedienelemente für durch Drittfirmen verbaute Aufbaufunktionen hinzu [5, S. 624-625], beispielsweise für abklippbare Ladeflächen, Signalleuchten

oder über den Nebenabtrieb angesteuerte Wasserpumpen für Feuerwehrfahrzeuge. Der Fülle und Varianz an Funktionen sind aufgrund hochspezialisierter und individueller Fahrzeugaufbauten [2, S. 5] kaum Grenzen gesetzt. Seitz [8] prädiziert, dass die Anzahl an Fahrzeugfunktionen im Nutzfahrzeugbereich in Zukunft noch weiter ansteigen wird [8, S. 1]. Dieser Trend einer steigenden Funktionsanzahl liegt gemäß Meixner [19] auch im Pkw-Bereich vor [19, S. 26].

Die hohe Anzahl an Fahrzeugfunktionen führt in Kombination mit dem limitierten Platz im Armaturenräger bereits heute dazu, dass Bedienelemente in unergonomische und schwer erreichbare Bereiche ausgelagert werden müssen [6, S. 16]. Hierzu zählen etwa die Kniebereiche links und rechts hinter dem Lenkrad sowie die Bereiche über der Windschutzscheibe angrenzend an den Dachhimmel. Die Bedienung der Fahrzeugfunktionen erfolgt bislang über physische Bedienelemente wie Hubtaster oder Kippschalter [6, S. 16]. Der Einzug von berührungsempfindlichen Touchscreens zeichnet sich jedoch ab [6, S. 17] und findet vereinzelt bereits heute im Nutzfahrzeug Anwendung [53].

Im Nutzfahrzeug wird der Interaktionsbedarf mit dem Fahrzeug stark durch den Nutzungskontext und die Tätigkeiten des Fahrers definiert, worauf im nächsten Abschnitt eingegangen wird.

Nutzungskontext und Arbeitsbedingungen

Während ein Pkw primär für die persönliche Mobilität genutzt wird, werden Nutzfahrzeuge fast ausschließlich gewerblich eingesetzt. Daher müssen bei der Betrachtung der Mensch-Maschine-Interaktion im Nutzfahrzeug der Arbeitsalltag von Lkw-Fahrern und der Nutzungskontext berücksichtigt werden.

Lkw-Fahrer sind in ihrem Arbeitsalltag einem hohen Zeitdruck bei einer gleichzeitig zunehmenden Verkehrsdichte ausgesetzt [7, S. 275], weshalb der Beruf als allgemein stressig gilt [54, S. 60, 55, S. 23]. Dieser Stress wird durch einen zunehmenden Wettbewerb [7, S. 275, 55, S. 23] sowie Termin- und Kostendruck [7, S. 275] erhöht. Dazu tragen engere Anlieferungsfenster für „Just in Time“ Produktionsprozesse bei [56, S. 707]. Verschärft werden die Arbeitsbedingungen durch ein im Branchenvergleich hohes Arbeitspensum, überdurchschnittlich viel Nacharbeit und unregelmäßige Arbeitszeiten [55, S. 28-30]. In der Branche umgangssprachlich „Rennfahrerlöhne“ genannte und leistungsbezogene Zuschläge verleiten die Fahrer zu noch längeren Arbeitszeiten, weil so das geringe Gehaltsniveau angehoben werden kann [57, S. 53]. In Anbetracht der aufgeführten Umstände ist es nicht verwunderlich, dass bei jedem fünften kontrollierten Fahrzeug ein Verstoß gegen die Lenk- und Ruhezeiten vorliegt [54, S. 9].

Der Arbeitsalltag und die Umweltbedingungen der Lkw-Fahrer hängen stark vom Einsatzsegment ab. Nach Ziegler [15] stellen der Fern-, Verteiler-, Baustellen- und Kommunalverkehr die primären Verkehrsarten dar [15, S. 198]. Von diesen hängt ab, wie oft der Fahrer Be- und Entladevorgänge durchführt, wie stark der Zeitdruck ausfällt, wie abwechslungsreich und lange die Fahrstrecken sind und ob im Fahrzeug übernachtet wird [15, S. 198-201]. Zudem fallen die notwendigen Bedienhandlungen und Tätigkeiten je nach Einsatzsegment unterschiedlich aus [58, S. 62]. Während dem Fahrer im Langstreckenverkehr in der Regel ein Fahrzeug für längere Zeit zugewiesen wird, sind häufige Fahrzeugwechsel in den Segmenten des Nahbereichs, wie Verteiler- und Baustellenverkehr, üblicher als im Fernverkehr [54, S. 55-56].

Der Nutzungskontext eines Fahrerarbeitsplatzes im Nutzfahrzeug wird zudem über während der Fahrt auftretende Umgebungsfaktoren, wie Vibrationen und Schwingungen, charakterisiert [55, S. 19, 59, S. 57]. Für eine Erhöhung des Komforts verfügen Nutzfahrzeuge deswegen über einen durch Druckluft angesteuerten, dämpfenden Schwingsitz [6, S. 14], wodurch sich der Fahrer

jedoch relativ zum Armaturenräger bewegt [60, S. 14-15] und die Interaktion mit Bedienelementen erschwert wird.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass Lkw-Fahrer einer Vielzahl von Stressfaktoren ausgesetzt sind. Die Interaktion mit dem Fahrzeug erfolgt unter Zeitdruck sowie unter Schwingungen und Vibrationen. Die Bedienung des Fahrzeugs sollte daher unter den geschilderten und sich negativ auf die Interaktion auswirkenden Umgebungsfaktoren gut und fehlerfrei möglich sein.

Nutzergruppe

Während im Pkw-Bereich ein breiter Querschnitt der Gesellschaft als Nutzergruppe definiert werden kann, handelt es sich bei Lkw-Fahrern um ein schärfer definiertes Nutzerprofil. Die Nutzergruppe der Berufskraftfahrer besteht aus überdurchschnittlich vielen männlichen [54, S. 45, 55, S. 9, 59, S. 54] und älteren Mitarbeitern [55, S. 9], deren Durchschnittsalter gemäß einer 2014 durchgeführten Querschnittsstudie bei 47 Jahren mit steigender Tendenz liegt [54, S. 36]. Bei einer Fortsetzung dieses demografischen Wandels sind körperliche, kognitive und sensorische Einschränkungen der Nutzergruppe zu antizipieren, wobei diese starken interindividuellen Variationen unterliegen [61, S. 115-120]. Mit der Fortführung dieses Trends ist zu rechnen, weil der Bedarf an jungen Berufseinsteigern bereits heute nicht annähernd gedeckt wird [54, S. 66].

Nach Houtman et al. [55] weist die Nutzergruppe im Branchenvergleich ein unterdurchschnittliches Schulbildungsniveau auf [55, S. 32] und besteht aus vielen beruflichen Quereinsteigern. So besitzen viele Fahrer eine andere oder keine abgeschlossene Berufsausbildung und steigen erst durch eine Nach- oder Umschulung in den Beruf ein [59, S. 52-53]. Für das gewerbliche Führen eines Nutzfahrzeugs ist jedoch eine Qualifikation zum Berufskraftfahrer verbindlich [54, S. 19], weshalb im Gegensatz zu Pkw-Fahrern von einem recht homogenen Wissensstand bezüglich des Umgangs mit Fahrzeugen sowie einem hohen Trainingsgrad auszugehen ist [8, S. 9].

Die Transportbranche hat einen Mangel an der beschriebenen Nutzergruppe zu beklagen und warnte bereits im Jahr 2014 vor einem akuten Fahrermangel [54, S. 27], der sich zu verschärfen droht [54, S. 66]. So waren im Jahr 2021 bereits ein Drittel aller Berufskraftfahrer 55 Jahre oder älter [62], weshalb in den kommenden Jahren mehr Fahrer in Rente gehen, als Menschen in den Beruf einsteigen. Hierzu tragen die im vorherigen Abschnitt dargelegten beanspruchenden Arbeitsbedingungen bei. Weiter liegt ein schlechtes Image und damit einhergehend ein geringes Ansehen des Berufsbildes in der Gesellschaft [54, S. 7, 55, S. 16] vor. Das Berufsbild bietet zudem eingeschränkte Weiterbildungs- und Karrieremöglichkeiten [55, S. 24], sowie ein vergleichsweise geringes Lohnniveau [55, S. 32, 57, S. 53-54, 62].

Abgeleitete Herausforderungen

Wie aufgezeigt, verfügen Nutzfahrzeuge aufgrund einer hohen Anzahl an Fahrzeugfunktionen über komplexe Fahrerarbeitsplätze mit teils unergonomischer Platzierung der Bedienelemente. Weiter wird ersichtlich, dass der Nutzungskontext im Nutzfahrzeug aufgrund der Bauart des Fahrzeugs sowie des gewerblichen Einsatzes als Arbeitsmittel vom typischen Einsatzszenario und den Umweltbedingungen eines Pkw abweicht. So führt der im Fahrzeug verbaute Schwingensitz insbesondere beim Baustellenverkehr dazu, dass die Bedienung von Fahrzeugfunktionen auch dann möglich sein sollte, wenn sich der Fahrer relativ zum Armaturenräger bewegt. Weiter erfolgt die Bedienung von Funktionen unter Zeitdruck und Stress, der aufgrund enger

Anlieferungsfenster für Waren und viel Verkehr vorherrscht. Die Bedienung sollte entsprechend fehlerfrei und gut unter nachteiligen Umweltbedingungen möglich sein. Insbesondere im Verteiler- und Baustellenverkehr sind Fahrzeugwechsel an der Tagesordnung, weshalb der Fahrerarbeitsplatz schnell verständlich und flottenweit möglichst konsistent gestaltet sein sollte. Weitere Unterschiede zwischen den Pkw- und Nutzfahrzeugsektoren sind bei der Nutzergruppe festzustellen. So weisen Lkw-Fahrer ein verhältnismäßig geringes Bildungsniveau auf, haben jedoch ein gutes Verständnis von ihrem Fahrzeug aufgrund einer abgeschlossenen Ausbildung zum Berufskraftfahrer. Daher wird die Übertragbarkeit von Studienergebnissen aus dem Pkw- auf den Lkw-Bereich angezweifelt [8, S. 9]. Durch Studien kann überprüft werden, inwiefern sich die Ergebnisse auf den Nutzfahrzeugsektor übertragen lassen.

2.1.4 Evaluation von Mensch-Maschine-Schnittstellen

Die Evaluation von Produkten unter Einbezug der Nutzergruppe ist ein fester Bestandteil nutzerzentrierter Entwicklungsmethoden wie dem nutzerzentrierten Entwicklungsprozess gemäß ISO 9241 [63] und kommt bei der Entwicklung von MMS im Fahrzeug zum Einsatz [64, S. 2]. Nach Lee et al. [65] ist es von Vorteil, den Nutzer bereits während früher Phasen des Gestaltungsprozesses mit in die Entwicklung einzubeziehen [65, S. 19]. So können Fehlentscheidungen und Probleme frühzeitig identifiziert werden, die bei einem späten Entdecken hohe Folgekosten mit sich ziehen würden [66, S. 189]. Im Folgenden wird auf gängige Konstrukte und Evaluationsmethoden eingegangen, die im Kontext der Entwicklung von MMS für den Einsatz im Fahrzeug und diese Arbeit relevant sind.

Sicherheit während der Fahrt

Die Vereinbarkeit der Bedienung einer MMS mit der Ausführung der in Abschnitt 2.1.2 eingeführten Fahraufgabe wird in der Regel durch Fahrsimulatorstudien mit Probanden geprüft [67, S. 146-147]. Studien im Fahrsimulator bieten, verglichen mit Realfahrzeugstudien, eine höchst kontrollierbare und sichere Testumgebung [68, S. 149]. Insbesondere die hohe Sicherheit durch verletzungsfreie Verkehrsunfälle in der virtuellen Welt ist für die Erprobung neuartiger, noch unerprobter MMS ein Vorteil, weil durch eine Fahrerablenkung gefährliche Fahrsituationen auftreten können. Zwar wird die kritische Prüfung der Übertragbarkeit von in Simulatoren erhobenen Ergebnissen auf die Realität [68] und eine Validierung des Simulators empfohlen [69, S. 5], jedoch sind bereits mit technisch simplen, statischen Simulatoren aussagekräftige Ergebnisse erzielbar [70, S. 418-419]. So konnte Pätzold [27] zeigen, dass bei der Untersuchung einer adaptiven MMS im Fahrsimulator vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können, wie bei einer Realfahrzeugstudie [27, S. 191]. Bei der Evaluation von MMS im Nutzfahrzeugbereich finden Fahrsimulatorstudien ebenfalls bereits Anwendung [8, 71–73] und ermöglichen eine hochfrequente und genaue Datenaufzeichnung.

Fahrsimulatoren erlauben eine Erfassung und Bewertung der Fahrgüte, woraus Rückschlüsse auf die Sicherheit getroffen werden können. Hierbei finden objektive Maße, wie die sogenannten Spurmaße zur Erfassung der Spurhaltefähigkeit, Anwendung [69, S. 4-5, 74, S. 47]. Hierfür kann die „Standard Deviation of Lane Position“ (SDLP) herangezogen werden, welche über die Standardabweichung „aller gemessener Abstände vom Mittelpunkt des Fahrzeugs zum linken oder rechten Spurrand“ [69, S. 6] definiert ist. Der Mittelwert und die quadrierten Abweichungen von diesem Abstand gehen in die Berechnung der Standardabweichung ein, weshalb der am Fahrzeug gewählte Bezugspunkt einen geringen Einfluss auf den Wert hat [74, S. 49]. Der Messwert

erlaubt direkte Rückschlüsse auf die Fahrerablenkung, wobei ein geringes Wertenniveau positiv zu bewerten ist [69, S. 7] und eine geringere Ablenkung indiziert.

Ein Ansteigen der Werte des SDLP erhöht die Wahrscheinlichkeit für anstehende Spurüberschreitungen [69, S. 7], wobei die Wahrscheinlichkeit einer solchen durch den Wert „Time to Line Crossing“ (TLC) weiter konkretisiert wird. Das von Godthelp et al. [75] beschriebene Maß drückt die Zeitspanne aus, nach der das Überfahren der rechten oder linken Fahrbahnmarkierung eintritt, wenn die aktuelle Geschwindigkeit und der Kurs beibehalten werden [69, S. 8]. Je geringer der TLC Wert ausfällt, desto unmittelbarer steht das Verlassen der Fahrspur bevor. Ein Wert von unter einer Sekunde ist als klein einzuschätzen [76, S. 20] und somit als kritisches Event (TLC_{krit}) anzusehen.

Die Kritikalität erhöht sich durch das eigentliche Überschreiten einer Fahrbahnmarkierung weiter, weil dies auf eine schlechte Ausführung der Fahraufgabe deutet und eine erhebliche Erhöhung des Unfallrisikos mit sich bringt. Bei dem nach der englischen Bezeichnung „Lane Exceedance“ (LANEX) benannten Maß wird die Anzahl an Spurüberschreitungen ermittelt und aufsummiert [74, S. 52]. Fahrten mit vielen LANEX-Events werden demnach als riskant eingeschätzt. Eine sensible Auslegung wertet bereits das Berühren der Fahrbahnmarkierung mit der Außenseite des Reifens als Überschreitung [69, S. 7]. Eine liberale Implementierung zählt erst ein LANEX-Event, wenn mehr als die Hälfte des Fahrzeugs die Spur verlassen hat [69, S. 7].

Wie in Abschnitt 2.1.2 dargelegt, beruht die Ausführung der primären Fahraufgabe hauptsächlich auf der visuellen Wahrnehmung von Informationen. Bubb et al. [32] schlussfolgern, dass aus Sicherheitsaspekten eine Minimierung der Blickabwendung für sekundäre und tertiäre Bedienungshandlungen erstrebenswert ist [32, S. 127]. Die Erfassung des Blickverhaltens erfolgt über kamerabasierte Systeme, die entweder vom Probanden getragen oder am Fahrerarbeitsplatz verbaut werden [77, S. 12-14]. Berücksichtigt werden muss, dass sich das Blickverhalten von Fahranfängern und erfahrenen Fahrern unterscheidet [78, S. 642-645] und dadurch die Vergleichbarkeit eingeschränkt ist.

Ein weiteres gängiges Maß ist das Zählen der sogenannten kritischen Blickabwendungen vom Fahrgeschehen anhand eines Schwellenwerts für die Dauer der Blickabwendung. Schweigert [44] schlägt die Verwendung eines Grenzwerts von zwei Sekunden vor [44, S. 40], womit er der Empfehlung der US-Bundesbehörde „National Highway Traffic Safety Administration“ (NHTSA) entspricht [79, S. 24821]. Einen konservativeren Grenzwert von 1,5 Sekunden wählt Theofanou [80, S. 29], wodurch früher eine potenziell gefährliche visuelle Ablenkung von der primären Fahraufgabe detektiert wird.

Einen weiteren Ansatz zur Beschreibung des Blickverhaltens stellt das Bilden von Summenmaßen dar [44, S. 69]. So kann durch das Aufsummieren von Blickzuwendungen zu bestimmten als relevant definierten „Areas of Interest“ (AOI) Aufschlüsse darüber geben, wie stark eine Bedienungsaufgabe visuelle Ressourcen des Menschen in Summe beansprucht. Die Norm ISO 15007 nennt die mittlere Blickdauer sowie die Anzahl an Blicken in Richtung einer AOI als weitere Maße [77, S. 6].

Gebrauchstauglichkeit

Ein wichtiges Kriterium von MMS im Fahrzeug stellt eine hohe Gebrauchstauglichkeit dar. Die Gebrauchstauglichkeit (im Englischen Usability) umfasst nach der Norm ISO 9241 Teil 110 drei Aspekte [81, S. 13]:

- Effektivität: Genaues und vollständiges Erreichen von Zielen
- Effizienz: Angemessenes Verhältnis von verwendeten Ressourcen und Ergebnis
- Zufriedenstellung: Benutzung des Systems stellt den Nutzer zufrieden

Eine hohe Gebrauchstauglichkeit wirkt sich positiv auf die Nutzung einer MMS aus, weil mit geringem Aufwand seitens der Nutzer Bedienungsaufgaben mit einer hohen Wahrscheinlichkeit gelöst werden [82, S. 619]. Zugunsten einer hohen Effektivität sollten möglichst wenig Bedienfehler auftreten. So werden bei Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit typischerweise Fehlerraten erhoben [83, S. 402]. Weiter wird argumentiert, dass eine geringe Bedienzeit mit einer hohen Effizienz zu bewerten ist. Folglich wird diese als ein Leistungskriterium bei Fahrstudien eingesetzt [84, S. 299] und als weiteres quantitatives Maß erhoben [83, S. 402].

Standardisierte Fragebögen zur Erfassung der Gebrauchstauglichkeit eignen sich insbesondere für den Vergleich verschiedener Systeme [82, S. 620]. Im automobilen Umfeld kommt hierfür beispielsweise der System Usability Scale (SUS) nach Brooke [85] zum Einsatz. Der SUS besteht aus 10 Items und einer 5-stufigen Likert-Skala. Die resultierende Bewertung zwischen 0 und 100 Punkten kann anschließend anhand von Wertebereichen eingeordnet werden [86, S. 121].

User Experience

Eine MMS kann den Nutzer nicht nur durch eine gute Bedienbarkeit bei der Ausführung von Aufgaben unterstützen, sondern auch positive Emotionen hervorrufen und begeistern. In Abgrenzung zur Gebrauchstauglichkeit umfasst die User Experience (UX) nach der Norm ISO 9241 Teil 210 die Wahrnehmung des Nutzers während der antizipierten Nutzung, der eigentlichen Interaktion mit dem Produkt sowie das retrospektive Empfinden [63, S. 11]. Es handelt sich nach Hartson et al. [87] somit um die Totalität aller vom Nutzer empfundenen Emotionen in Bezug auf das Produkt [87, S. 5]. Hassenzahl [88] ergänzt, dass es sich primär um ein evaluierendes Gefühl handelt, das „gut“ oder „schlecht“ ausfallen kann und subjektive Aspekte umfasst [88, S. 12]. Ein Produkt mit hoher UX adressiert die Bedürfnisse des Nutzers nach Autonomie, Kompetenz und Stimulation [88, S. 12] und gewinnt zunehmend als Differenzierungsmerkmal in der Automobilindustrie an Bedeutung [19, S. 23].

Nach Hassenzahl et al. [89] wird die wahrgenommene UX durch die pragmatische und hedonische Qualität sowie die Attraktivität definiert [89, S. 189]. Die pragmatische Qualität bestimmt, wie gut ein Produkt zur Manipulation der Umwelt geeignet ist [89, S. 188]. Damit entspricht die pragmatische Qualität weitgehend der Gebrauchstauglichkeit [87, S. 6] und kann als eine Art Grundanforderung für eine gute UX verstanden werden [88, S. 12, 90, S. 34]. Der zweite Aspekt der UX besteht aus der hedonischen Qualität. Der Begriff leitet sich aus dem griechischen (hēdoné) ab und steht für „Vergnügen“ sowie dem „Streben nach Sinnenlust und -genuss“ [91]. Auf ein Produkt übertragen, liegt eine hohe hedonische Qualität vor, wenn dieses mit Eigenschaften wie „beeindruckend“, „interessant“ oder „aufregend“ beschrieben werden kann [90, S. 35]. Die dritte Dimension der UX stellt die wahrgenommene Attraktivität des Produkts dar [89, S. 189] und wird somit über das subjektive Gefallen der ästhetischen Erscheinung beeinflusst.

Bei der User Experience handelt es sich um ein latentes Konstrukt, weshalb diese nicht unmittelbar beobachtet und direkt gemessen werden kann [87, S. 427]. Für eine Operationalisierung der UX wird aus diesem Grund auf standardisierte Fragebögen wie den AttrakDiff [89] oder den User Experience Questionnaire (UEQ) [92] zurückgegriffen.

Akzeptanz

Die Nutzerakzeptanz gilt als Schlüssel zum Erfolg, wenn eine neue Technologie erfolgreich im Fahrzeug eingesetzt werden soll [93, S. 11]. Nur wenn ein Fahrer ein neu eingeführtes System akzeptiert, wird er es nutzen. Dennoch liegt ein verhältnismäßig schlechtes Verständnis darüber vor, warum eine Technologie von Fahrern akzeptiert wird [93, S. 12]. Die Akzeptanz von Systemen im Fahrzeugkontext ist nach Adell [94] über das Ausmaß definiert, in welchem der Fahrer beabsichtigt, das System im Fahrzeug zu nutzen [94, S. 31]. Nach einem von Davis [95] entwickelten Technologieakzeptanzmodell setzt sich die Akzeptanz eines Produkts aus der vom Nutzer wahrgenommenen Nützlichkeit sowie Benutzerfreundlichkeit zusammen [95, S. 320]. Eine vergleichbare Unterteilung wird von Van der Laan et al. [96] vorgenommen, welche die Akzeptanz in Nützlichkeit und Zufriedenheit aufteilen [96, S. 8].

Analog zur im vorigen Abschnitt eingeführten User Experience handelt es sich bei der Akzeptanz um ein latentes und folglich nicht direkt messbares Konstrukt. Daher wird für eine Operationalisierung ebenfalls auf standardisierte Fragebögen zurückgegriffen, wie den von Van der Laan et al. [96] entwickelten Fragebogen zur Erfassung der Nutzerakzeptanz von Fahrzeugsystemen [96]. Dieser unterscheidet über zwei Subskalen zwischen der wahrgenommenen Nützlichkeit des Systems sowie der Zufriedenheit der Nutzer [96, S. 8]. Der Fragebogen wird für Fragestellungen im Nutzfahrzeugbereich [72, S. 63] und bei Untersuchungen adaptiver Bedienkonzepte eingesetzt [26, S. 90]. Ein weiterer Ansatz besteht in der Abfrage der Bereitschaft zur Nutzung eines Systems, weil diese nach Walter et al. [97, S. 481] und Adell [94, S. 31] als Nutzerakzeptanz angesehen werden kann.

2.2 Adaptive Mensch-Maschine-Schnittstellen

Dieser Abschnitt basiert in Teilen auf den Veröffentlichungen [98], [99] und [100].

Im Folgenden soll ein Verständnis für den Begriff der Adaptivität im Kontext von MMS geschaffen sowie mögliche Ausprägungen und Anwendungsgebiete vorgestellt werden. Es folgt eine Diskussion potenzieller Vor- und Nachteile, die mit Adaptivität einhergehen können.

2.2.1 Definition und Abgrenzung

Die Grundidee adaptiver oder intelligenter Systeme wird bereits seit 1990 in der Wissenschaft diskutiert [101, S. 7, 102] und erlebt aufgrund von Fortschritten in der Rechenleistung von Steuergeräten sowie der anhaltenden Digitalisierung einen Aufschwung. Dies ermöglicht die von Ablaßmeier [22] beschriebene Kernfunktionalität adaptiver MMS: Die automatische Anpassung an das Nutzerverhalten oder Kontextinformationen [22, S. 43-44]. Dabei ist das Ziel das Fokussieren der MMS auf relevante Inhalte [20, S. 313], sodass dem Nutzer die zum aktuellen Zeitpunkt benötigten Informationen und Funktionen bereitgestellt werden [19, S. 41]. Zimmermann et al. [103] ergänzen, dass das System den Nutzer entweder vor der Anpassung um Bestätigung bitten kann [103, S. 301] oder diese eigenständig ausführt.

Es ist festzuhalten, dass bei einer adaptiven MMS das System automatisch Teile oder das gesamte Interface an Kontextinformationen, das Nutzerverhalten oder definierte Situationen anpasst. Nach Rittger et al. [104] kann zwischen vier Stufen der Adaptivität unterschieden

werden, die in Abbildung 2.4 dargelegt und als „Levels of Adaptive Sensitive Responses“ (LASR) bezeichnet werden [105, S. 4866].

Grad der Adaptivität	Hoch				
	Niedrig				
LASR Level	0	1	2	3	4
	Keine Adaption	Gespeichert	Definiert	Gelernt	Interpretiert
Beschreibung	Funktion muss immer wieder neu selektiert werden	System ermöglicht Favorisierung und Wiederaufruf	Systemverhalten folgt für alle Nutzer geltenden vordefinierten Regeln	Systemverhalten passt sich Regeln individueller Nutzung an	System interpretiert Nutzerzustände und passt sich an
Beispiel: Fahrwerksmodus	Modus muss vom Fahrer manuell gewählt werden	Manuell gewählter Modus wird vom Fahrer als Favorit gespeichert	Modus wird vom System in Abhängigkeit vom Straßentyp vorgeschlagen	Modus wird vom System in Situationen angepasst, in welchen der Fahrer dies in der Vergangenheit tat	Modus wird vom System an Eigenschaft des Fahrers (z.B. erkannte Emotion) angepasst

Abbildung 2.4: LASR Level der Adaptivität nach Rittger et al. [104] mit Anwendungsbeispielen

Anzumerken ist hierbei, dass es sich nach der Definition von Ablaßmeier [22] erst ab LASR Stufe 2 um adaptive MMS handelt, weil erst hier eine vom System initiierte Veränderung der MMS stattfindet. Während bei LASR die Stufe 0 keine Veränderbarkeit vorgesehen ist, beschreibt LASR 1 die Anpassungsmöglichkeit durch den Nutzer, beispielsweise durch das Favorisieren von Funktionen.

Nach Definitionen von Findlater et al. [106, S. 90], Zimmermann et al. [103, S. 301] und Sarter [107, S. 494] ist diese durch den Nutzer initiierte Anpassung des Systems jedoch nicht als Adaptivität, sondern Adaptierbarkeit zu bezeichnen. Diese Möglichkeit der Individualisierung erlaubt es dem Nutzer, das System an seine Präferenzen und Bedürfnisse anzupassen und beispielsweise favorisierte Funktionen in den Direktzugriff zu konfigurieren. Es handelt sich folglich nicht um eine vom System ausgehende automatische Anpassung, sondern um eine manuelle Einstellung durch den Nutzer, die mit einem Bedienungsaufwand einhergeht. Es ist daher davon auszugehen, dass eine Adaptierung des Systems seltener vom Nutzer durchgeführt wird, als bei einer vom Algorithmus ausgehenden Adaptivität. Anzumerken ist, dass MMS oftmals Adaptivität mit Adaptierbarkeit kombinieren [103, S. 301]. Daraus folgt, dass eine MMS nicht nur einem, sondern mehreren LASR Leveln zuordenbar ist. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn ein Teilaspekt des Interfaces sich automatisch anhand vordefinierter Regeln anpasst (Level 2), jedoch auch eine Individualisierung durch den Nutzer (Level 1) vorgesehen ist. Mögliche Umsetzungsformen von Adaptivität sowie technische Umsetzungsmöglichkeiten einer automatischen Kontexterkenkung werden in Kapitel 3 diskutiert.

Nach Browne et al. [108] ist Adaptivität kein Selbstzweck und deren Einsatz nicht mit dem vagen Motiv der Verbesserung des Interfaces zu rechtfertigen [108, S. 15]. Stattdessen wird empfohlen zu prüfen, ob durch Adaptivität ein Vorteil erreicht werden kann und Nutzerbedürfnisse dadurch erfüllt werden [109, S. 8]. Um die im folgenden Kapitel dargelegten, durch Adaptivität erzielbaren Vorteile zu erreichen, ist es erforderlich festzulegen, hinsichtlich welcher Aspekte das Interface gewinnbringend dynamisch angepasst werden kann.

2.2.2 Vorteile adaptiver MMS

Die Einführung adaptiver MMS bietet maßgebliche Vorteile, die nachfolgend anhand von theoretischen Betrachtungen sowie Studienergebnissen diskutiert werden.

Theoretische Herleitung

Es wird eine weitere kontinuierliche Zunahme des Funktionsumfangs in Fahrzeugen erwartet [6, S. 17, 8, S. 1, 19, S. 26], wodurch die Komplexität des Fahrerarbeitsplatzes steigt [9, S. 43]. Das in Abschnitt 2.2.1 dargelegte Prinzip der Fokussierung auf derzeit relevante und Ausblenden irrelevanter Funktionen durch Adaptivität vermag diesem Trend der Überladung des Fahrerarbeitsplatzes entgegenzuwirken [110, S. 1].

Hinsichtlich der zu erwartenden Bedienzeiten ist eine Reduktion der gleichzeitig angezeigten Funktionen vorteilhaft. So wird in einer Publikation [98, S. 35] anhand des Hickschen Gesetzes [111] veranschaulicht, dass bei einer Reduktion von 50 auf 15 gleichzeitig angezeigte Bedienelemente eine Verbesserung der Bedienzeit von 1384 ms auf 976 ms zu erzielen ist. Dies wirkt sich positiv auf die Verkehrssicherheit aus, weil die benötigte Abwendung von der Fahraufgabe für die Bedienvorgänge geringer ausfällt.

Ein weiterer Vorteil der durch Adaptivität ermöglichten räumlichen Zentrierung von Bedienelementen ist, dass kürzere Armbewegungen zum Erreichen der Bedienelemente durchgeführt werden müssen. Gemäß dem Fitts'schen Gesetz [112] und dessen Erweiterung durch Welford [113] wirkt sich dies positiv auf die Bedienzeiten aus. Dies geht aus der Gleichung (2.1) hervor, wobei T für die zu erwartende Bedienzeit, a und b für konstante Koeffizienten, D für die Distanz bis zum anvisierten Bedienelement und W für die Breite des Ziels stehen. Durch eine Reduktion des erforderlichen Bedienwegs können somit niedrigere Bedienzeiten erreicht werden.

$$T = a + b \log_2 \frac{2D}{W} \quad (2.1)$$

Weiter ist durch adaptive MMS eine Reduktion der Bedienhandlungen möglich [104, S. 18]. So werden, verglichen mit tiefen Menüstrukturen in einem digitalen Bediensystem, die benötigten Funktionen auf erster Ebene im Direktzugriff angezeigt.

Durch Adaptivität kann eine Verortung vieler Funktionen auf einer verhältnismäßig kleinen, aber dafür digitalen Bedienfläche erfolgen. Dies ist von Vorteil, weil der am Fahrerarbeitsplatz zur Verfügung stehende Platz limitiert ist [10, S. 82]. In Kombination mit der geschilderten Vielzahl an Funktionen müssen derzeit Bedienelemente in ergonomisch suboptimale Bedienbereiche ausgelagert werden, wie etwa in den Kniebereich hinter dem Lenkrad oder eine am Dachhimmel verortete Konsole (Abbildung 1.1). Durch die mit Adaptivität einhergehende Reduktion der gleichzeitig angezeigten Funktionen lassen sich mehr Interaktionselemente im ergonomisch optimalen Greifraum verorten, etwa zentral im Bereich der Mittelkonsole.

Diese aufgeführten Vorteile verbessern primär die Gebrauchstauglichkeit und somit die pragmatische Qualität der MMS. Jedoch ist darüber hinaus eine Erhöhung der hedonischen Qualität erzielbar. So sehen Rittger et al. [104] ein hohes Differenzierungspotenzial der User Experience automobiler MMS durch den Einsatz von Adaptivität [104, S. 18]. Dies kann zum einen durch den subjektiv wahrgenommen höheren Grad der Innovation begründet werden. Zum anderen handelt es sich um ein Alleinstellungsmerkmal, weil bislang vergleichsweise wenige Fahrzeuge über adaptive MMS verfügen.

Weiterhin ist damit zu rechnen, dass Kunden in Zukunft vermehrt adaptive und intelligente Systeme im Fahrzeug erwarten, weil sie durch Consumer-Electronics-Anwendungen, wie Smartphones, bereits Teil des alltäglichen Lebens geworden sind.

Diese theoretisch hergeleiteten Vorteile adaptiver MMS werden zudem durch Ergebnisse durchgeführter Nutzerstudien belegt, die nachfolgend vorgestellt werden.

Studienergebnisse

Findlater et al. [21] zeigen in ihrer Studie, dass sich die Bedienzeit eines Textverarbeitungsprogramms durch den Einsatz von Adaptivität verringern lässt [21, S. 1252]. In der Nutzerstudie werden häufig genutzte Funktionen vom System in einen direkt erreichbaren Bereich konfiguriert, wodurch Bedienschritte entfallen. Weiterhin verbesserte sich die Zufriedenheit der Nutzer mit dem System [21, S. 1247] sowie die Akzeptanz [21, S. 1253]. Einschränkend ist anzumerken, dass diese Verbesserung gegenüber der statischen Variante nur bei kleinen Displaygrößen sowie einer hohen Erkennungsgüte des Algorithmus zu beobachten ist [21, S. 1253].

Diese Resultate werden durch eine von Wesson et al. [114] durchgeführte Studie zur Verbesserung der Usability von Smartphone-Applikationen durch Adaptivität bestätigt. Die Autoren zeigen, dass die wahrgenommene Gebrauchstauglichkeit, Nützlichkeit und Zufriedenheit der Nutzer mit einer Anwendung für Landkarten durch den Einsatz von Adaptivität gesteigert werden kann [114, S. 196].

Neben diesen Studien aus dem Consumer-Electronics-Sektor wird der Einsatz adaptiver Interfaces im Fahrzeug untersucht. So prüft Garzon [28], welchen Einfluss eine kontextsensitive Personalisierung von Nutzerschnittstellen im Pkw auf das Benutzererlebnis hat. Hierfür schlägt das System dem Nutzer nach einer Lernphase Aktionen im Schnellzugriff vor, die häufig im aktuellen Kontext ausgeführt werden. Im Rahmen einer Nutzerstudie zeigt der Autor, dass auch bei MMS im Pkw Adaptivität zu einem verbesserten Benutzererlebnis führen kann. So berichtet Garzon [28] eine hohe wahrgenommene hedonische Qualität [28, S. 154-155], wodurch auf eine positive User Experience geschlossen wird. Weiter zeigt die Studie, dass die mentale Beanspruchung der Nutzer bei der Bedienung gesenkt werden kann [28, S. 152-153].

Eine von Walter [9] durchgeführte Nutzerstudie untersucht ebenfalls den Einfluss einer kontextsensitiven und personalisierten MMS im Pkw auf das Benutzererlebnis, wobei mehrere Ausprägungen der Adaptivität mit einem statischen Menü verglichen wurden. Neben dem subjektiven Empfinden der Probanden wurden Fahrdaten als abhängiges Maß geprüft. Adaptivität führte bei der Hälfte der Bedienaufgaben zu einer signifikant verbesserten Fahrgüte [9, S. 125] sowie zu verringerten Bedienzeiten [9, S. 124]. Die ebenfalls verbesserte subjektive Bewertung der Gebrauchstauglichkeit [9, S. 123-124] sowie eine gesenkte mentale Beanspruchung [9, S. 125-128] stehen im Einklang mit den Ergebnissen von Garzon [28].

Auch von Köhler [26] durchgeführte Nutzerstudien in einem Pkw-Fahrsimulator sowie einem Realfahrzeug zeigen, dass Adaptivität in Form eines Workload-Managers einen positiven Einfluss auf die mentale Beanspruchung und die Akzeptanz haben. So zeigen die Ergebnisse der durchgeführten Nutzerstudie, dass Adaptivität die Belastung senkt und die Konzentration auf das Fahrgeschehen erhöht [26, S. 89]. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass in beanspruchenden Fahrsituationen die Blickabwendungszeit signifikant reduziert wurde [26, S. 92]. Neben der belegten Verbesserung sicherheitskritischer objektiver Maße konnte Köhler zudem eine Verbesserung der Akzeptanz durch die Nutzergruppe belegen [26, S. 90].

Zusammenfassend zeigen die theoretische Herleitung und die dargelegten Studien, dass adaptive MMS einen positiven Einfluss auf subjektive sowie objektive Messgrößen haben. Aufgrund der genannten Vorteile ist die Notwendigkeit des Wechsels von statischen hin zu adaptiven MMS anerkannt [107, S. 494]. Bei adaptiven sowie personalisierbaren MMS für den Einsatz im Automobil handelt es sich daher um einen Zukunftstrend [19, S. 4]. Ob dieser Trend auf Nutzfahrzeuge übertragbar ist, wird in dieser Arbeit untersucht.

Die Einführung von Adaptivität in die Mensch-Maschine-Kommunikation bringt neben erzielbaren Vorteilen auch neue Herausforderungen mit sich [115, S. 45], die im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

2.2.3 Herausforderungen adaptiver MMS

Nach Alvarez-Cortes et al. [20] ist es beim Einsatz von Adaptivität erforderlich zu prüfen, ob die Vorteile die Nachteile überwiegen [20, S. 317]. Daher werden im Folgenden Herausforderungen vorgestellt, die sich in die Bereiche der Gebrauchstauglichkeit und Akzeptanz sowie der technischen Umsetzung unterteilen lassen.

Gebrauchstauglichkeit und Akzeptanz

Gemäß der in Norm ISO 9241 Teil 112 [116] aufgestellten Prinzipien für die Mensch-Maschine-Interaktion ist Konsistenz eine zentrale Anforderung für gebrauchstaugliche MMS [116, S. 18]. Dieses Prinzip wird von adaptiven Interfaces verletzt, die durch ihre Fähigkeit der dynamischen Anpassung inhärent inkonsistent sind [117, S. 508]. So ist bei einer statischen MMS jedem Bedienteil eine Funktion zugeordnet. Bei adaptiven MMS hat hingegen das in der Regel digitale Bedienteil je nach Kontext eine andere Funktion, wodurch das System komplexer in der Bedienung werden kann [1, S. 48]. Aus dieser per Definition inkonsistenten Verhaltensweise ergeben sich bei der Entwicklung adaptiver Interfaces neue Herausforderungen [104, S. 20], die bei der Gestaltung adressiert werden sollten.

So ist zu berücksichtigen, dass das Systemverhalten und Änderungen der MMS für die anvisierte Nutzergruppe nachvollziehbar und antizipierbar sein sollten. Dies ist insofern eine Herausforderung, als dass das Verhalten durch ein komplexes Regelwerk oder Modelle des maschinellen Lernens bestimmt wird und für den Nutzer meist unverständlich ist [118, S. 2119]. Ein Vertrauensverlust und eine geringe Akzeptanz können die Folge sein [118, S. 2119]. Daher empfehlen Graefe et al. [115] eine hohe Erklärbarkeit als Zielstellung festzulegen [115, S. 44].

Wenn eine vom System ausgehende Anpassung für den Nutzer nicht nachvollziehbar ist, kann es zu einem Gefühl des Kontrollverlusts [20, S. 317, 119, S. 301] und der Bevormundung kommen [27, S. 197]. Dieser negative Effekt kann vermindert werden, beispielsweise indem es dem Nutzer ermöglicht wird, die Adaptivität zu deaktivieren [109, S. 5]. Weiter ist es möglich, das Bewusstsein für den vollen Funktionsumfang des Systems zu senken, wenn lediglich mit den vom Interface vorgeschlagenen Funktionen interagiert wird [21, S. 1247].

Die Erwartungshaltung seitens der Nutzer an adaptive MMS ist hoch [120, S. 1]. Im Umkehrschluss ist die Frustration groß, wenn das System nicht so funktioniert, wie im Vorfeld erwartet wurde [120, S. 1]. Dies führt zu einer der größten Herausforderungen adaptiver MMS: Dem Erreichen von Nutzerakzeptanz [9, IX]. Insbesondere ein intransparentes [121, S. 121] oder für den Nutzer unverständliches Systemverhalten kann zu einem Vertrauensverlust und geringer Akzeptanz führen [118, S. 2119], sowie das System unberechenbar wirken lassen [119, S. 301].

Als Lösungsansatz schlagen Walter et al. [97] vor, das System möglichst transparent zu gestalten und das Vorwissen der Nutzergruppe zu berücksichtigen [97, S. 477]. In Kombination mit nachvollziehbaren Systemaktionen kann so Vertrauen in das System aufgebaut werden, wodurch die Akzeptanz durch die Nutzergruppe ermöglicht wird [97, S. 477]. Die Nachvollziehbarkeit der Aktionen und die Transparenz des Systems kann nach Graefe et al. [122] etwa über verständlich formulierte Systemerklärungen erhöht werden [122, S. 305].

Die in Abschnitt 2.2.2 dargelegten Vorteile und positiven Effekte von adaptiven MMS werden jedoch nicht in allen Nutzerstudien berichtet oder unterliegen Einschränkungen. So konnten Findlater et al. [106] entgegen dem Hickschen [111] und Fitts'schen Gesetz [112] eine Verschlechterung der Bedienzeit im Rahmen ihrer Nutzerstudie beobachten [106, S. 95]. Dies steht im Kontrast mit Studienergebnissen von Walter [9], die für einzelne Bedienaufgaben eine Verbesserung der Bedienzeit berichtet [9, S. 124]. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich die Modalitäten und Anwendungsbeispiele der beiden Studien stark voneinander unterscheiden. Während Findlater et al. [106] Adaptivität für eine über ein Zeigegerät bediente Office-Anwendung einführen, setzt Walter [9] eine adaptive MMS mit einem berührungssensitiven Display im Pkw um. Die unterschiedlichen Studienergebnisse deuten an, dass die Modalität, der Anwendungsfall sowie die konkrete Umsetzung beeinflussen, ob durch die Einführung von Adaptivität die Effizienz der Bedienung gesteigert oder verschlechtert wird.

Weiter sind einige der unter Kapitel 2.2.2 dargelegten positiven Folgen durch die Einführung von Adaptivität nur unter bestimmten Bedingungen erzielbar. So stellt sich die von Findlater et al. [21] berichtete Verbesserung der Effizienz und Zufriedenheit nur bei einer hohen Erkennungsgüte des Systems ein, insbesondere wenn die Bildschirmgröße klein ausfällt [21, S. 1252]. Einschränkungen unterliegt auch die von Walter [9] berichtete Verbesserung der Fahrgüte durch eine adaptive MMS. Nur bei zwei von vier Bedienaufgaben ist eine verringerte Spurabweichung messbar [9, S. 125]. Es wird resümiert, dass nicht alle Bedienaufgaben durch eine adaptive Umsetzung der MMS profitieren.

Ein von Pätzold [27] umgesetztes, sich an den Workload des Fahrers adaptierendes Konzept einer MMS für den Einsatz im Pkw unterstützt die Annahme, dass nicht immer mit einer Verbesserung zahlreicher Maße durch Adaptivität zu rechnen ist. So zeigt die Autorin im Rahmen einer Simulator- und Realfahrzeugstudie, dass eine adaptive Umsetzung der MMS vergleichbar gut wie eine statische Realisierung abschneidet [27, S. 195]. Es wird entgegen der Resultate von Walter [9], Köhler [26] und Garzon [28] keine Erhöhung subjektiver Maße wie der wahrgenommenen Gebrauchstauglichkeit oder Akzeptanz durch Adaptivität erzielt [27, S. 195]. Durch vom Nutzer ausgehende Adaptierbarkeit kann hingegen eine Verbesserung der User Experience [27, S. 146] und Gebrauchstauglichkeit [27, S. 145-146] sowie eine Absenkung des Workloads [27, S. 146-147] beobachtet werden. Pätzold [27] fasst ihre Studie mit der Erkenntnis zusammen, dass wiederum auch keine Verschlechterung durch Adaptivität erzielt wird und diese als Potenzial bei der Entwicklung von MMS zu verstehen ist [27, S. 191]. Das von Seitz [8] entwickelte und sich an den Workload der Fahrer adaptierende Informationssystem für Nutzfahrzeuge erfüllt im Rahmen einer Nutzerstudie ebenfalls nicht alle antizipierten Verbesserungen. So kann entgegen der aufgestellten Hypothesen keine Reduktion des Workloads in beanspruchenden Fahrsituationen erzielt [8, S. 99-100], die Fahrsicherheit nicht verbessert [8, S. 102-103] und die Informationsaufnahme nicht gesteigert werden [8, S. 103-104]. Zwar wird keine Verschlechterung der Werte beobachtet und das System subjektiv gut bewertet [8, S. 105], dennoch kann der Mehrwert für die Verkehrssicherheit angezweifelt werden.

Anhand der dargelegten Studien wird ersichtlich, dass die Einführung adaptiver MMS noch Herausforderungen mit sich bringt, die zu adressieren sind. So unterliegen die erzielbaren Vorteile Rahmenbedingungen, wozu eine hohe Erkennungsgüte und eine eingeschränkte Anzeigefläche zählen. Weiter hängen die Resultate vom Anwendungsfall, von der Nutzergruppe und weiteren noch unbekanntem Rahmenbedingungen ab. Vor diesem Hintergrund ist die Argumentation von Jentsch et al. [41] nachvollziehbar, die einen Einsatz adaptiver Interfaces nur für sicherheitsunkritische Funktionen im Fahrzeug empfehlen [41, S. 4-5].

Weiter wird anhand der sich teilweise widersprechenden Studienlage klar, dass die Übertragbarkeit von Studienergebnissen auf einen bislang unerforschten Anwendungsfall eingeschränkt ist. Dementsprechend ist es kaum möglich, a priori zu beurteilen, ob durch die Einführung einer adaptiven MMS im Nutzfahrzeug die Sicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Akzeptanz verbessert oder verschlechtert wird. Der in Kapitel 6 erfolgende Vergleich einer adaptiven mit einer statischen MMS ist folglich als explorative Forschung einzustufen.

Den zweiten herausfordernden Aspekt bei der Einführung adaptiver MMS stellt die technische Komplexität dar, wie das nachfolgende Teilkapitel darlegt.

Technische Komplexität

Donald Norman kommt in seinem Werk „Living with Complexity“ zu der zunächst trivial wirkenden, jedoch sinnfälligen Erkenntnis:

„The world is complex.“ [1, S. 13]

Dieser einzugestehende Grad an Komplexität ist auf MMS übertragbar, insbesondere wenn diese über adaptive Funktionslogiken verfügen. Adaptive MMS haben zum Ziel, dem Nutzer die Bedienung eines komplexen Systems durch ein Vorschlagen relevanter Inhalte und Ausblenden irrelevanter Funktionen zu vereinfachen. Gemäß Tesler's Law verfügt jedoch jedes System über einen gewissen Grad an Komplexität, der nicht weiter reduziert werden kann [123, S. 87]. Daraus kann eine Verlagerung abgeleitet werden: Es dem Nutzer einfacher zu machen, bedeutet oftmals, dass die Arbeit des Entwicklers und Designers komplexer wird [1, S. 46]. Dieser Zielkonflikt wird am Beispiel einer MMS-Entwicklung in Abbildung 2.5 veranschaulicht.

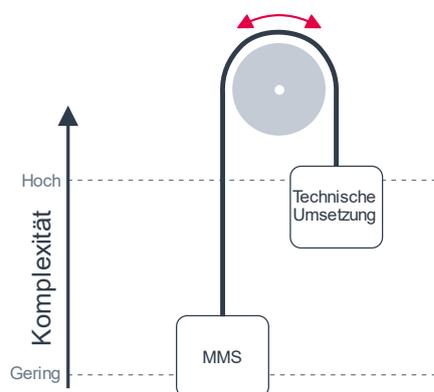


Abbildung 2.5: Veranschaulichung des Zielkonflikts zwischen der Komplexität der MMS und deren technischer Umsetzung, angelehnt an Tesler's Law [123, S. 87]

Dass diese Verlagerung der Komplexität insbesondere bei der Einführung von adaptiven MMS zu beobachten ist, zeigen aktuelle Umsetzungen. Hierzu zählt eine von Mercedes-Benz entwickelte adaptive MMS, die dem Nutzer durch adaptive Funktionsvorschläge die Bedienung

erleichtern soll [124]. Das Steuergerät verfügt über 8 CPU-Kerne sowie 24 GB Arbeitsspeicher [124], womit die technischen Anforderungen traditioneller statischer MMS übertroffen werden. Dies ist unter anderem auf die benötigten KI-Algorithmen zurückzuführen, die für höhere Adaptivitätslevel benötigt werden [104, S. 19]. Die Komplexität der technischen Umsetzung wird durch eine höhere Anzahl an Sensoren, die zur Erfassung des Fahrerzustands nötig sind, erhöht [104, S. 19]. Hinzu kommt die Verarbeitung von Fahrzeugdaten [8, S. 21].

Dieser hohe technische Aufwand sollte zugunsten der Gebrauchstauglichkeit betrieben werden, weil sich nur bei einer hohen Erkennungsgüte der Adaptivität positive Effekte auf die Gebrauchstauglichkeit einstellen [21, S. 1252].

Bei der Einführung adaptiver MMS ist folglich nicht nur die Komplexität aus Sicht des Nutzers zu berücksichtigen. Auch technische und wirtschaftliche Aufwandsabschätzungen werden empfohlen, insbesondere in Anbetracht der nicht ausschließlich positiven Effekte von adaptiven MMS auf die Gebrauchstauglichkeit und Akzeptanz. Um die Aufwände zu reduzieren, ist das Erwägen technisch simpler Umsetzungen möglich: So legt Walter [9] dar, dass eine Kontexterkenkung durch komplexe lernende KI-Modelle oder statische, regelbasierte und entsprechend simplere Algorithmen realisierbar ist [9, S. 35]. Eine detaillierte Übersicht über Möglichkeiten der technischen Realisierungen wird in Kapitel 3.1.2 gegeben.

Neue technische Anforderungen an die Ein- und Ausgabemodalität ergeben sich durch die dynamische Grundeigenschaft adaptiver MMS. So ist eine Umsetzung nicht mit herkömmlichen physischen Bedienelementen, wie etwa Druckknöpfen und Wippschaltern, realisierbar. Stattdessen werden digitalisierte Bedienelemente benötigt, welche die technische Komplexität der MMS weiter erhöhen und in Abschnitt 4.1.1 ausführlich diskutiert werden.

3 Definition der Adaptivität

Adaptive Systeme passen den anzuzeigenden Inhalt an [125, S. 1012]. Jedoch gilt es festzulegen, wodurch die systemseitige Anpassung ausgelöst werden soll, um den Nutzer optimal zu unterstützen. Bei der Festlegung, an welchen Nutzungskontext sich eine MMS adaptieren soll, handelt es sich nach Bauer und Key [101, S. 5] sowie Sarter [107, S. 494] folglich um einen wichtigen Schritt im Gestaltungs- und Entwicklungsprozess adaptiver MMS.

In diesem Kapitel soll erarbeitet werden, wie die Adaptivität des zu entwickelnden Systems aus Nutzersicht definiert werden sollte. Hierfür wird zunächst der Stand der Forschung bezüglich möglicher Formen der Adaptivität dargelegt. Anschließend wird das gewählte Vorgehen zur Festlegung der Adaptivität einer MMS für den Einsatz im Nutzfahrzeug vorgestellt. Es folgt eine Vorstellung der Resultate sowie die abgeleitete Adaptivität.

3.1 Stand der Forschung und Technik: Adaptivität und Systemkontext

Unter Adaptivität wird im Folgenden, gemäß der in Kapitel 2.2.1 eingeführten Definition, eine vom System initiierte Anpassung der MMS verstanden. Es werden zunächst mögliche Formen der Adaptivität dargelegt, bevor Ansätze der technischen Implementierung und deren Auswirkung auf das Nutzererlebnis diskutiert werden.

3.1.1 Formen der Adaptivität

Anhand des Stands der Technik kann abgeleitet werden, dass zwischen einer Adaption an den Fahrerzustand, das Nutzungsverhalten, den Nutzungskontext oder einer Kombination aus den genannten Kategorien unterschieden werden kann. Diese Einordnung soll nachfolgend durch mögliche Formen und Ausprägungen von Adaptivität erläutert werden.

Adaption an den Fahrerzustand

Die Adaption des Systems an den aktuellen Fahrerzustand stellt die erste Kategorie von Anpassungsmerkmalen dar. Der Fahrerzustand ist nach Langer et al. [126] durch für die Ausführung der Fahraufgabe relevante und zeitlich veränderliche Eigenschaften des Fahrers definiert und hat einen wesentlichen Einfluss auf das Unfallrisiko [126, S. 688]. Diese Eigenschaften können weiter in kurzfristig, mittelfristig und langfristig veränderbare Faktoren unterteilt werden, wie in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1: Für die Fahraufgabe relevante Eigenschaften des Fahrers nach Langer et al. [126, S. 688]

Zeitliche Veränderbarkeit	Beispiele
Kurzfristig	Aufmerksamkeit, Beanspruchung, Emotion
Mittelfristig	Ermüdung, Alkohol-/Drogeneinfluss, Gesundheitszustand
Langfristig	Konstitution, Persönlichkeit

Die automatische und robuste Erkennung des Fahrerzustands in Echtzeit mithilfe von Sensorik und Algorithmen ist herausfordernd und Untersuchungsgegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten [126, S. 689].

Auf Grundlage dieses maschinell geschätzten Fahrerzustands kann im nächsten Schritt eine Adaption der MMS erfolgen, wobei zahlreiche Konzepte die aktuelle Beanspruchung als Anpassungsmerkmal wählen. Dieser Ansatz wird in der Literatur als *Workload-Manager* bezeichnet und wird beispielsweise von Pätzold [27] angewandt. Die Autorin stellt ein adaptives Konzept zur Informationsdarlegung im Pkw vor, das in Abhängigkeit der aktuellen Komplexität des Fahr-szenarios den *Workload* abschätzt. Abhängig von der abgeschätzten Beanspruchung wird der Grad der Informationsfülle angepasst.

Eine weitere Möglichkeit der Anpassung der MMS an die aktuelle Beanspruchung ist das Unterdrücken von Benachrichtigungen während herausfordernder Situationen. So stellen Piechulla et al. [127] und Tchankue et al. [128] Konzepte vor, die den *Workload* anhand der aktuellen Fahr-situation ableiten. Bei einem hohen *Workload* leitet das MMS beispielsweise einkommende Anrufe an die Mailbox weiter und unterdrückt Nachrichten temporär, um den Fahrer nicht zu überfordern.

Einen vergleichbaren Ansatz verfolgt Seitz [8] mit einem adaptiven MMS für den Einsatz im Nutzfahrzeug [8]. Die Autorin untersucht hierfür zunächst im Rahmen einer Realfahrzeugstudie den *Workload* von Lkw-Fahrern während besonders beanspruchender Fahrsituationen, wie etwa dem Auffahren auf die Autobahn oder Tunnelfahrten [129]. Analog zu Piechulla et al. [127] sieht das Konzept ein Unterdrücken von Benachrichtigungen bei einem hohen *Workload* vor, wobei Seitz [8] den Fokus auf Fahrzeugmeldungen legt. Eine Folgearbeit von Köhler [26] setzt auf einen vergleichbaren Ansatz und unterdrückt in beanspruchenden Fahrsituationen Mitteilungen des Fahrzeugs. Der implementierte *Workload-Manager* schätzt ebenfalls die Beanspruchung anhand der aktuellen Fahrsituation, wobei der Anwendungsfall auf urbane Fahr-szenarien, insbesondere komplexe Kreuzungen, fokussiert ist.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich adaptive Systeme an den aktuellen Fahrerzustand anpassen können. Als Eingangsgröße verwenden die vorgestellten Konzepte kurzfristig veränderbare Eigenschaften des Fahrers, wie die aktuelle Beanspruchung. Diese wird in den vorliegenden Arbeiten indirekt erfasst, indem von der auf den Fahrer einwirkenden Komplexität der Fahrsituation auf die Beanspruchung geschlossen wird. Daraufhin wird der Informationsgrad oder das Systemverhalten vorteilhaft angepasst, mit dem Ziel, den *Workload* zu senken.

Adaption an das Nutzungsverhalten

Eine weitere Form der Adaption ist eine Anpassung an das Nutzungsverhalten. Das System baut basierend auf Informationen wie der typischen Nutzung des Systems, ein Benutzermodell auf [22, S. 44]. Der Aufbau des Modells kann entweder durch ein aktives Abfragen der

Nutzerpräferenzen oder durch ein passives Speichern der Nutzereingaben erfolgen [22, S. 44]. Das daraus resultierende Modell kann so die Nutzungswahrscheinlichkeiten individueller Funktionen für einen gegebenen Zustand oder Zeitpunkt abschätzen und diese prominent und schnell erreichbar anzeigen. Nach Walter [9] ist eine weitere Differenzierung zwischen statischen und dynamischen Modellen möglich. Während ein statisches Modell einmalig generiert wird, erweitert sich ein dynamisches fortwährend durch neue Eingangsdaten [9, S. 35]. Es ist zu definieren, ob die Vorschläge auf Basis des individuellen Nutzerverhaltens oder auf dem Verhalten der gesamten Nutzerschaft des Systems erfolgen [9, S. 33]. Eine sich an das Nutzungsverhalten anpassende Form der Adaption wird Recommender-System genannt [24, S. 47] und findet im Bereich von Consumer-Electronics-Geräten Anwendung. So verfügt das von Apple für Smartphones entwickelte Betriebssystem iOS über eine Funktion für App-Vorschläge [130]. Das respektive Konkurrenzsystem Android 13 von Google verfügt über eine vergleichbare Funktionalität [131]. Bei den in Abbildung 3.1 dargestellten Umsetzungen bekommt der Nutzer in Abhängigkeit des über die Zeit vom System erlernten Nutzungsverhaltens Vorschläge für typischerweise genutzte Applikationen.



Abbildung 3.1: Einstellungsmenü für adaptive App-Vorschläge im Betriebssystem Android 13 (links) und Vorschläge auf dem Homescreen unter iOS 12 (rechts)

Dieser Ansatz von Funktionsvorschlägen, basierend auf einem historischen aufgezeichneten Nutzungsverhalten, kann auf MMS im Fahrzeug transferiert werden, wie Arbeiten von Garzon [28], Walter [9] und Bader et al. [24] zeigen. Erste Serienanwendungen der Automobilhersteller Volvo [132], Mercedes [30] sowie Ford [29] zeigen, dass eine technische Umsetzbarkeit sowie Zulassung im Straßenverkehr möglich ist.

Als Kritikpunkt derartiger Systeme ist eine eingeschränkte Transparenz zu nennen, weil oftmals nicht nachvollziehbar ist, warum eine Funktion in einer gegebenen Situation vorgeschlagen wird. Es wird folglich empfohlen, die Transparenz derartiger Systeme zu berücksichtigen [122, S. 297], um in Konsequenz das Vertrauen in die Fähigkeiten des Systems zu verbessern [24, S. 54]. Zudem besteht die Gefahr, dass die Algorithmen für die Aufgaben des Nutzers irrelevante Bedienmuster lernen und durch das Vorschlagen situativ unpassender Funktionen die Effizienz der Bedienung reduzieren oder den Nutzer verwirren [28, S. 160].

Adaption an den Nutzungskontext

Die Anpassung eines Systems an den aktuellen Nutzungskontext ist nach Zimmermann et al. [103] eine weitere Form der Adaptivität [103, S. 301]. Unter dem Begriff Kontext ist nach Dey [133] jegliche Information zu verstehen, welche die aktuell vorliegende Situation des Systems

des Fahrerzustands systemseitige Anpassungen vornehmen. Die Festlegung, an welchen Faktor sich die MMS anpassen soll, ist ein wichtiger Schritt im Gestaltungsprozess. Bei der Festlegung sollte abgewogen werden, welche Form der Adaptivität dem Nutzer den größten Mehrwert bietet, weil Adaptivität nicht als Selbstzweck zu verstehen ist [108, S. 15].

3.1.2 Ansätze der technischen Implementierung

Die im vorangegangenen Kapitel aufgezeigten Formen der Adaptivität haben einen direkten Einfluss auf die technische Umsetzung. Dennoch gibt es grundlegende Eigenschaften, die bei der Implementierung aller genannten Formen der Adaptivität anwendbar sind. So ist eine Umsetzung anhand von einem statisch programmierten Regelwerk oder einer auf maschinellem Lernen beruhenden Implementierung möglich [9, S. 35], wie aus Abbildung 3.3 hervorgeht.

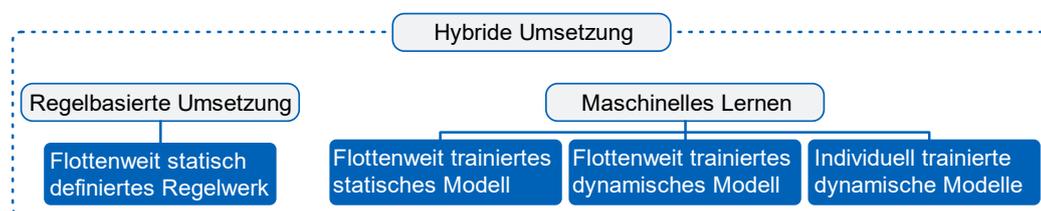


Abbildung 3.3: Ansätze der technischen Implementierung von adaptiven MMS im Fahrzeug

Bei regelbasierten Umsetzungen wird das Systemverhalten über ein Regelwerk definiert, das Variablen mittels boolescher Operatoren zu Bedingungen verknüpft, die einer „wenn-dann“-Formulierung entsprechen [8, S. 49]. Diese Regeln werden während der Entwicklung erstellt [104, S. 19] und als statisch bezeichnet, weil sie sich nicht selbstständig erweitern. Beispiele hierfür sind der in Abschnitt 3.1.1 vorgestellte und von Seitz [8] entworfene Workload-Manager sowie das kontextadaptive Bedienkonzept eines MacBook Pros von Apple Inc. (Abbildung 3.2). Nach Rittger et al. [104] fallen derartige regelbasierte Umsetzungen unter das LASR Level 2 und verfügen über eine „einheitliche, generische Intelligenz“ [104, S. 19]. Vorteile dieser Umsetzung sind eine hohe Nachvollziehbarkeit des Systemverhaltens [8, S. 78], weil sich das Verhalten über die Zeit nicht ändert und in jedem Fahrzeug identischen Regeln folgt. Als Nachteil ist ein je nach Anwendungsfall komplexes und unübersichtliches Regelwerk [8, S. 55] zu nennen, insbesondere wenn zahlreiche Eingangsgrößen und zu detektierende Situationen vorliegen.

Für komplexere Anwendungen oder die Verarbeitung von vielen Signalen empfiehlt Walter [9] daher den Einsatz von maschinellem Lernen [9, S. 35]. So setzen Wiedner et al. [139] einen lernenden Algorithmus zur Klassifikation von Fahrsituationen ein, um verschiedene Fahrszenarien sowie Verkehrsbedingungen auf Basis von Fahrzeugsignalen zu erkennen. Hierfür werden dem Algorithmus Trainingsdaten wie Geschwindigkeit und Lenkwinkel in Kombination mit der von Menschen bestimmten vorliegenden Fahrsituationen präsentiert. Die Autoren zeigen, dass bereits mit einem 100 Fahrstunden umfassenden Datensatz eine Erkennungsgüte von rund 85 % möglich ist, ohne auf für die Privatsphäre sensible Daten wie GPS- und Kamerasensoren zuzugreifen [139, S. 13015-13016]. Aus Abbildung 3.3 geht hervor, dass der Ansatz des maschinellen Lernens weiter untergliedert werden kann.

So kann ein statisches Modell exportiert werden, dessen Verhalten durch maschinelles Lernen anhand von Trainingsdaten während der Fahrzeugentwicklung definiert wurde. Dieses kann anschließend auf die gesamte Flotte eines Herstellers appliziert werden, woraus eine für alle Fahrzeuge und über die Zeit hinweg konsistente Erkennung der Situation resultiert. In

Abgrenzung hierzu sind dynamische Modelle möglich, die während der Laufzeit durch das Vorlegen neuer Nutzer- und Umweltdaten weiter trainiert werden. Hierdurch ändert sich das Verhalten über die Zeit, wenn sich das Nutzungsmuster ändert oder Fehlerkennungen des Systems durch den Nutzer korrigiert werden. Anwendungsbeispiele stellen etwa die in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen adaptiven MMS von Mercedes Benz [30], Volvo [132] und Ford [29] dar, die basierend auf gelerntem Nutzerverhalten Funktionsvorschläge ableiten. Es kann nicht nur anhand von Nutzungsdaten ein Modell flottenweit dynamisch trainiert werden, sondern auch pro Nutzer ein individuelles Modell aufgebaut werden. Um eine Zuordnung zu ermöglichen, wird eine Identifizierung des Nutzers benötigt. Dies kann beispielsweise durch das Einloggen in ein Nutzerprofil erfolgen, woraufhin das individuell trainierte Modell aus einem Backend heruntergeladen und durch neue Nutzungsdaten weiter trainiert wird. Gemäß der in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Taxonomie nach Rittger et al. [104] handelt es sich bei lernenden Systemen um LASR Level 3 und 4 [104, S. 19]. Vorteile lernender Algorithmen liegen in der Anwendbarkeit auf komplexe Szenarien unter Einbezug großer Datenmengen [9, S. 35]. Zudem kann ein Fehlverhalten über die Zeit hinweg durch neuen und sich wiederholende Nutzereingaben korrigiert werden. Außerdem können neue Nutzungsmuster erlernt werden, die zum Zeitpunkt der Entwicklung des Systems nicht relevant waren oder von den Entwicklern nicht bedacht wurden. Als Nachteil ist zu nennen, dass das Verhalten eingeschränkt interpretierbar und vorhersagbar ist [140, S. 22], weil es sich in der Regel um Black-Box-Modelle handelt [140, S. 19].

Wie aus Abbildung 3.3 hervorgeht, ist zudem ein hybrider Ansatz möglich. Bei diesem Vorgehen wird nach Walter [9] eine regelbasierte Implementierung mit einer dynamischen Umsetzung kombiniert [9, S. 35]. Beispielsweise ist ein auf das individuelle Nutzerverhalten gelerntes Modell mit flottenweit gültigen statischen Regeln kombinierbar. Ein derartiger Ansatz ist beispielsweise für sicherheitskritische Funktionen denkbar. So könnten durch statische Regeln dem Fahrer in bestimmten Situationen aus Sicherheitsaspekten hilfreiche Funktionen angezeigt werden, obwohl der individuelle Nutzer diese in der Vergangenheit in der vorliegenden Situation nicht genutzt hat und die Funktionsnutzung folglich nicht vom System erlernt wurde.

Es wird zusammenfassend festgestellt, dass zwei grundlegende technische Ansätze zur Implementierung existieren, die zu einer hybriden dritten Variante kombiniert werden können. Bei der Auswahl gilt es, die in Abschnitt 3.1.1 vorgestellten möglichen Formen der Adaptivität zu berücksichtigen, weil komplexere adaptive Systeme von lernenden oder hybriden Implementierungen profitieren.

3.1.3 Auswirkungen der technischen Implementierung auf das Nutzererlebnis

Die technische Implementierung adaptiver MMS hat einen wesentlichen Einfluss auf das Nutzererlebnis. So beeinflusst die Umsetzung, wie intelligent das System auf den Nutzer wirkt, oder ob es ihn durch immer wiederkehrende unpassende Vorschläge und Aktionen frustriert.

Ein wesentliches Gütekriterium der Kontexterkenkung ist die Erkennungsgüte. Diese definieren Gajos et al. [141] bei adaptiven MMS als den Anteil der Zeit, in der dem Nutzer die für die aktuelle Aufgabe benötigten Bedienelemente angezeigt werden [141, S. 1271]. Eine von Findlater et al. [21] durchgeführte Nutzerstudie zeigt, dass eine geringe Erkennungsgüte einen signifikanten und nachteiligen Einfluss auf die Performanz von Bedienungsaufgaben hat [21, S. 1248]. Die Ergebnisse werden durch die Resultate einer von Gajos et al. [141] durchgeführten Nutzerstudie bestätigt. Der Versuch zeigt, dass eine mit einer adaptiven MMS versehene Office Anwendung

effizienter bedient wird, wenn die Erkennungsgüte 70 % statt 50 % beträgt [141, S. 1274]. Zudem wird die Nutzerzufriedenheit und wahrgenommene Nützlichkeit des Systems durch eine schlechte Erkennungsrate negativ beeinflusst [141, S. 1273]. Hierbei sind Parallelen zum Warndilemma bei Fahrerassistenzsystemen zu erkennen. Dieses besteht aus den gegenläufigen Forderungen, die daraus bestehen, dass der Fahrer möglichst früh bei einer drohenden Gefahr gewarnt werden soll. Gleichzeitig steigt jedoch die Wahrscheinlichkeit von Falschalar-men, worunter die Akzeptanz eines Warnsystems leidet [142, S. 682].

Die Implementierung hat zudem Auswirkungen auf die Vorhersagbarkeit und Nachvollziehbarkeit des Systemverhaltens. Ein adaptives System ist nach Gajos et al. [141] nachvollziehbar, wenn der Nutzer dem Systemverhalten leicht mental folgen kann [141, S. 1271]. Insbesondere bei lernenden Systemen besteht die Gefahr eines aus Nutzersicht unvorhersehbaren und nicht nachvollziehbaren Verhaltens. Diesem kann nach Walter et al. [97] durch eine Erhöhung der Systemtransparenz entgegengewirkt werden [97, S. 476-477], beispielsweise durch eine systemseitige Erklärung, warum sich das System in einer gegebenen Situation auf bestimmte Weise verhalten hat [118, S. 2119].

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die technische Implementierung einer adaptiven MMS das Nutzererlebnis maßgeblich beeinflusst. Eine hohe Erkennungsgüte erhöht den Mehrwert adaptiver Systeme und führt zu höherer Nutzerakzeptanz. Zudem sollte die Nachvollziehbarkeit des Systemverhaltens bedacht und gegebenenfalls durch systemseitige Erklärungen unterstützt werden. Bei der Auswahl der Algorithmen ist die Abwägung vorzunehmen, ob eine regelbasierte oder auf maschinellem Lernen basierende Implementierung für den vorliegenden Anwendungsfall besser geeignet ist.

3.2 Fragestellung und Vorgehen

Eine adaptive MMS unterstützt den Nutzer nur dann bei der Aufgabenausführung, wenn sie auf die im Alltag tatsächlich auftretenden Situationen abgestimmt ist [117, S. 520]. Demnach handelt es sich bei der Festlegung der Adaptivität um einen wichtigen Schritt im Entwicklungsprozess adaptiver MMS [101, S. 5], der bislang durch überwiegend unstrukturierte Entscheidungsfindungen geprägt ist [101, S. 49]. Im Rahmen dieses Teilkapitels wird daher eine strukturierte Vorgehensweise zur Definition der Adaptivität angestrebt.

Der aufgeführte Stand der Forschung zeigt, dass drei Formen der Adaptivität möglich sind: Adaption an den Fahrerzustand, das Nutzungsverhalten oder den Nutzungskontext. Es soll deshalb identifiziert werden, welche Form der Adaption im Nutzfahrzeug vorteilhaft ist. Im Folgeschritt kann die Adaptivität weiter konkretisiert werden, etwa durch das Festlegen von zu erkennenden Situationen. Weiter sollte die Adaptivität so gestaltet werden, dass sie dem Nutzer einen möglichst hohen Mehrwert bei der Aufgabenausführung bietet und gleichzeitig nachvollziehbar agiert. Daher wird für Kapitel 3 folgende Forschungsfrage aufgestellt:

„Wie sollte die Adaptivität der MMS aus Nutzersicht im Nutzfahrzeug definiert werden?“

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird ein nutzerzentriertes Vorgehen gewählt, das in Abbildung 3.4 dargestellt ist. Die Teilschritte verfolgen das Ziel, eine hohe Nützlichkeit sowie spätere Nutzerakzeptanz des zu entwickelnden Systems zu erreichen. Weiter wird auf eine Umsetzbarkeit anhand heutiger bzw. in absehbarer Zukunft möglicher Technologien geachtet.

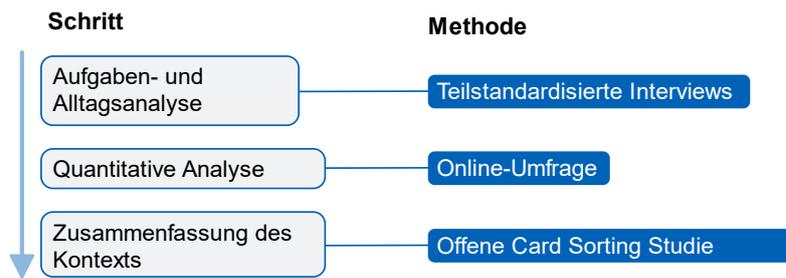


Abbildung 3.4: Schritte sowie methodische Teilschritte zur Definition der Adaptivität des Systems

Im ersten Schritt soll explorativ identifiziert werden, welche Aufgaben und Situationen im Alltag von Lkw-Fahrern typischerweise bewältigt werden. Weiter soll ein Auftreten von Bedienmustern und eine in Abhängigkeit des Fahrerzustands notwendige Bedienung von Funktionen geprüft werden. Die Erkenntnisse sollen in einem zweiten Schritt durch Einbezug einer größeren Stichprobe quantitativ überprüft werden. Der letzte Schritt sieht eine Zusammenfassung des Kontexts auf eine für den Nutzer leicht verarbeitbare Anzahl an Situationen vor. Die Schritte des Vorgehens werden in den folgenden Unterkapiteln detailliert ausgeführt.

3.3 Explorative Aufgaben- und Alltagsanalyse

Dieses Teilkapitel beruht auf der Veröffentlichung Schölkopf et al. [98], auf die für detailliertere Informationen verwiesen wird.

Eine adaptive MMS für den Einsatz im Fahrzeug soll den Nutzer bei der Ausübung seiner Tätigkeiten unterstützen und ihm passende Funktionsvorschläge unterbreiten [107, S. 494]. Deshalb wird eine explorative Untersuchung der Aufgaben der Fahrer im Alltag sowie deren Arbeitsabläufe durchgeführt. Weiter soll die Untersuchung erste Indikationen hinsichtlich möglicher Bedienmuster sowie der subjektiven Wichtigkeit einzelner Fahrzeugfunktionen aus Sicht der Lkw-Fahrer aufzeigen. Für explorative Untersuchungen eignen sich gemäß Bortz und Döring [143] Befragungen von Einzelpersonen [143, S. 50], die mit der Nutzergruppe von Lkw-Fahrern durchgeführt werden.

Durchführung von teilstandardisierten Interviews

Für die Interviews werden Berufskraftfahrer mit gültiger C oder CE Fahrerlaubnis über Probandendatenbanken der MAN Truck & Bus SE sowie des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik akquiriert. Bei der Selektion wird darauf geachtet, dass die drei Hauptverkehrsarten (Fern-, Verteiler- und Baustellenverkehr) vertreten sind. In einer auf eine Stunde angesetzten Videokonferenz werden die Fahrer mittels eines teilstandardisierten Interviews befragt. Nach einer Aufklärung über die Ziele der Befragung sowie die Datenschutzbestimmungen beginnt das Interview. Zunächst werden die Fahrer gebeten, ihren typischen Arbeitsalltag zu beschreiben und darin enthaltene Teilschritte sowie benötigte Funktionen zu benennen. Hierfür wird anhand eines Zeitstrahls der Arbeitstag von Arbeitsbeginn bis Feierabend visualisiert und vom Versuchsleiter während des Gesprächs mit virtuellen Notizzetteln befüllt. In Abbildung 3.5 ist eine ausgefüllte Vorlage abgebildet. Nach der Sammlung der Teilschritte wird die subjektive Beanspruchung für die Teilschritte abgefragt. Hierfür werden die Fahrer gebeten anzugeben, wie sehr sie sich im jeweiligen Arbeitsschritt konzentrieren müssen.

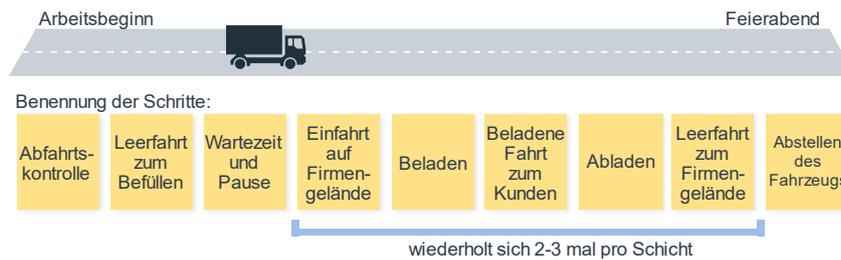


Abbildung 3.5: Exemplarischer Arbeitsalltag mit benannten Teilschritten eines Probanden im Verteilerverkehr [98, S. 39]

Die Fahrer werden vor dem Versuchstermin gebeten, ein Bild ihres Fahrerarbeitsplatzes aufzunehmen und zuzuschicken. Alle Bedienelemente des Fahrzeugs werden vom Versuchsleiter vor dem Interview mit virtuellen Notizzetteln bestückt, die eine Bewertungsskala der Nutzungshäufigkeit sowie der subjektiven Wichtigkeit für die Erfüllung des Arbeitsalltags beinhalten. Nach dem Erfragen des typischen Arbeitsalltags wird das Gespräch auf den vorbereiteten Fahrerarbeitsplatz gelenkt. Im Folgenden werden alle Bedienelemente durch den Fahrer hinsichtlich der subjektiven Wichtigkeit und Nutzungshäufigkeit bewertet und das Ergebnis dokumentiert, wie in Abbildung 3.6 zu sehen ist. Um mögliche Bedienmuster zu explorieren, werden die Teilnehmer anschließend gebeten aufzuzeigen, welche Funktionen sie typischerweise nacheinander oder gemeinsam betätigen.

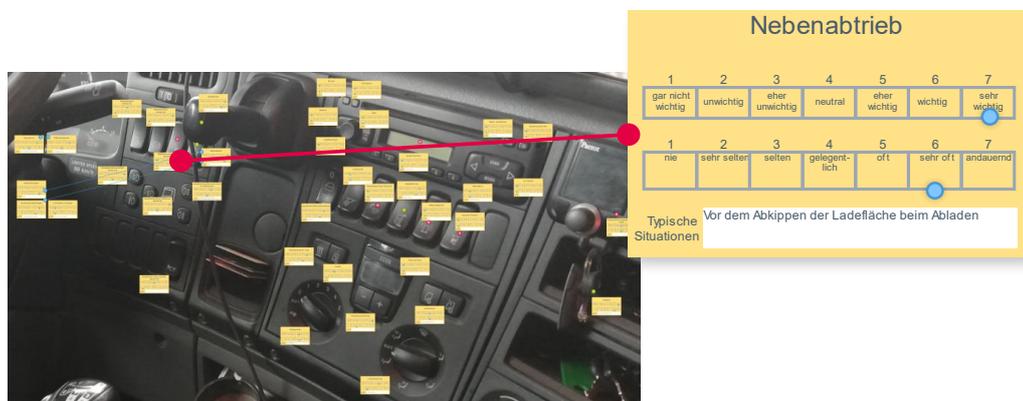


Abbildung 3.6: Fahrerarbeitsplatz eines Studienteilnehmers mit benannten und hinsichtlich Nutzungshäufigkeit sowie Wichtigkeit für den Arbeitsalltag bewerteten Funktionen am Beispiel des Nebenabtriebs

Abschließend erhalten die Probanden eine Aufwandsentschädigung von 15 € pro angefangene Stunde und werden verabschiedet.

Ergebnisse

An den Interviews nehmen fünf männliche Lkw-Fahrer mit einem mittleren Alter von 41,1 Jahren ($SD = 9,56$) teil. Das Probandenkollektiv weist eine durchschnittliche jährliche Fahrleistung von 90.500 km ($SD = 38.177$ km) auf. Die vorliegende Stichprobe ist demzufolge etwas jünger als das in einer groß angelegten Querschnittsstudie im Jahr 2014 ermittelte Durchschnittsalter von Lkw-Fahrern, das 47 Jahre betrug [54, S. 36]. Die Gesprächsprotokolle und ausgefüllten Arbeitsabläufe werden auf Gemeinsamkeiten geprüft. Es wird festgestellt, dass der Arbeitsalltag von

Lkw-Fahrern nach Arbeitsinhalten unterteilt werden kann. Die gefundenen Teilschritte werden nachfolgend als „Arbeitsphasen“ bezeichnet und sind in Abbildung 3.7 aufgeführt.



Abbildung 3.7: In qualitativen Interviews identifizierte neun Arbeitsphasen während des typischen Arbeitsalltags von N = 5 Lkw-Fahrern

Die Arbeitsphasen können je nach Verkehrsart, individuellem Arbeitsablauf oder etwaigen Fahrzeugwechselln einmalig oder mehrfach auftreten. Es ist zudem möglich, dass Arbeitsphasen in einem Anwendungsfall nicht auftreten. So ist die Phase „Nachtruhe“ nur im Langstreckenverkehr relevant.

Die explorative und qualitative Analyse der subjektiven Wichtigkeit von Funktionen lässt Unterschiede erahnen. So geben die Fahrer an, dass einige Funktionen nur in einzelnen Arbeitsphasen relevant sind, sonst jedoch nicht benötigt werden. Die Abfrage nach typischen Bedienmustern zeigt lediglich vereinzelt sich wiederholende Bedienabfolgen, die nach Aussage der Probanden unregelmäßig auftreten. Weiter berichten die Probanden von keiner vom Fahrerzustand abhängigen Bedienung von Funktionen.

3.4 Quantitative Analyse

Dieses Teilkapitel beruht auf einer betreuten Studienarbeit [144] sowie der Veröffentlichung Schölkopf et al. [98], auf die für detailliertere Informationen verwiesen wird.

Die Ergebnisse der explorativen Interviews indizieren, dass Lkw-Fahrer ihren Arbeitsalltag in neun Arbeitsphasen unterteilen. Weiter lassen sie vermuten, dass in den Arbeitsphasen unterschiedliche Fahrzeugfunktionen relevant sind. Dies soll in einem nächsten Schritt unter Einbezug einer größeren Stichprobe untersucht und gegebenenfalls validiert werden, um den Ansatz einer Adaption an den Kontext weiter zu prüfen.

Durchführung einer Online-Umfrage

Für die Online-Umfrage werden Lkw-Fahrer mit gültiger C oder CE Fahrerlaubnis über eine Probandendatenbank der Technischen Universität München akquiriert. Weiter wird die Umfrage in Online-Foren sowie Facebook-Gruppen für Lkw-Fahrer geteilt. Im Rahmen der Studienvorbereitung werden die Fahrzeugfunktionen durch den Input von N = 2 Industrieexperten zu übergeordneten Funktionsgruppen zusammengefasst, um die Anzahl an zu bewertenden Funktionen zu reduzieren. Die resultierenden 21 Funktionsgruppen können Tabelle A.1 im Anhang entnommen werden. Während des Versuchs werden die Fahrer gebeten, die Häufigkeit des Auftretens der neun in Abschnitt 3.3 identifizierten Arbeitsphasen anhand einer Likert-Skala von 1 (tritt nie auf) bis 7 (tritt immer auf) zu bewerten. Anhand einer Mehrfachauswahl für alle neun

Arbeitsphasen wird abgefragt, welche Fahrzeugfunktionen und Funktionsgruppen in der jeweiligen Situation benötigt werden.

Ergebnisse

Die Online-Umfrage resultiert in $N = 80$ verwertbaren Datensätzen. Es nehmen 73 männliche Lkw-Fahrer und 7 Fahrerinnen mit einem durchschnittlichen Alter von 44,3 Jahren ($SD = 11,94$) teil. Die Probanden geben eine durchschnittliche jährliche Fahrleistung von 83.512 km ($SD = 55.952$ km) an und fahren an durchschnittlich 4,5 Tagen pro Woche ($SD = 1,35$) einen Lkw.

Die Auswertung der Auftretenshäufigkeit der Situationen im Alltag zeigt, dass alle neun Arbeitsphasen aus Sicht der Fahrer relevant sind. Jedoch tritt die Phase „Nachruhe“ mit einem Mittelwert von 3,53 laut den Teilnehmern nur selten auf. Dies kann durch die Annahme erklärt werden, dass diese Arbeitsphase nur bei Einsätzen im Fernverkehr relevant ist. Eine Analyse der pro Arbeitsphase relevanten Fahrzeugfunktionen anhand eines Chi-Quadrat-Tests nach Pearson zeigt signifikante Differenzen von einer angenommenen Normalverteilung an [98, S. 40-42]. Daraus wird geschlussfolgert, dass die Fahrer in den neun Arbeitsphasen unterschiedliche Fahrzeugfunktionen als relevant erachten. Die pro Phase relevanten Funktionen und Funktionsgruppen können der zugehörigen Veröffentlichung entnommen werden [98, S. 41].

Die Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass zur Erfüllung der Nutzerbedürfnisse eine Adaption der MMS an den aktuellen Kontext sinnvoll ist. Der Kontext sollte als die aktuell vorliegende Arbeitsphase definiert werden, weil sich die benötigten Fahrzeugfunktionen zwischen den neun Phasen voneinander unterscheiden. Weiter liegen Erkenntnisse vor, welche Fahrzeugfunktionen in welcher Arbeitsphase vom Fahrer benötigt werden.

3.5 Zusammenfassung des Kontexts

Mit Blick auf das nachfolgend zu entwerfende Interaktionskonzept der adaptiven MMS ist festzustellen, dass eine weitere Zusammenfassung des Kontexts sinnvoll erscheint, weil sich die Anzahl an Arbeitsphasen am oberen Grenzbereich gängiger Gestaltungsempfehlungen bewegt. So sollten dem Nutzer maximal neun Auswahlmöglichkeiten gleichzeitig angeboten werden [84, S. 311], weil das Kurzzeitgedächtnis nach Miller [145] auf sieben plus oder minus zwei Elemente beschränkt ist [145, S. 90]. Weiter ist mit einer höheren Erkennungsrate der Arbeitsphasen zu rechnen, wenn die Unterschiede zwischen diesen maximiert werden und Überschneidungen entfallen. Es soll daher unter Einbezug der Nutzergruppe geprüft werden, ob die mittels des in Kapitel 3.3 und 3.4 beschriebenen Vorgehens identifizierten neun Arbeitsphasen weiter zusammengefasst werden können.

Durchführung einer Card Sorting Studie

Für die Zusammenfassung wird mit der anvisierten Nutzergruppe eine Card Sorting Studie durchgeführt. Diese Methode stammt aus dem Bereich der Informationsarchitektur und dient zur Organisation von Inhalten anhand der Vorstellungen der Nutzer [146, S. 72]. Für frühe Phasen eignet sich besonders ein offenes Card Sorting [147, S. 3], weshalb diese Variante ohne vorgegebene Kategorien gewählt wird. Es werden den Nutzern die Inhalte mit der Anweisung

vorgelegt, übergeordnete Kategorien zu bilden und die Inhalte anschließend einzusortieren. Die Studie wird über das Online-Tool UXtweak [148] realisiert und dauert rund 30 Minuten. Die Akquise der Teilnehmer erfolgt über eine Probandendatenbank der MAN Truck & Bus SE, die Kontaktdaten von Lkw-Fahrern mit gültiger C oder CE Fahrerlaubnis enthält. Es wird eine Stichprobengröße von 25-30 Personen angestrebt, weil dieser Umfang gemäß Wood und Wood [147] bei Card Sorting Studien bereits eine hohe Aussagekraft aufweist [147, S. 2] und eine Empfehlung nach Nielsen [149] mit 15 Probanden zu testen, übertrifft. Die Teilnahme erfolgt ohne Aufwandsentschädigung.

Zu Beginn der Studie bekommen die Teilnehmer die neun identifizierten Arbeitsphasen inklusive einer kurzen Beschreibung vorgestellt. Anschließend werden sie gebeten, Arbeitsphasen zu gruppieren, die ihrer Erfahrung nach Überschneidungen beinhalten. Die Anzahl der Kategorien ist frei wählbar. Nach einer erfolgreichen Kategorisierung werden die Lkw-Fahrer angewiesen, die zusammengefassten Gruppen zu benennen.

Ergebnisse

An der Card Sorting Studie nehmen insgesamt 30 männliche Lkw-Fahrer sowie eine weibliche Fahrerin teil. Die Stichprobe ist im Mittel 46,26 Jahre alt (SD = 12,19) und besitzt seit durchschnittlich 22,38 Jahren einen Lkw-Führerschein (SD = 12,21). Es geben n = 28 der befragten Fahrer an, zum Zeitpunkt der Studie hauptberuflich Lkw zu fahren. Zwei Personen fahren nebenberuflich Lkw und ein Teilnehmer fährt nicht beruflich Lkw. Im Mittel fährt das Probandenkollektiv 66.666 km im Jahr Lkw (SD = 29.601 km) an durchschnittlich 4,63 Tagen pro Woche (SD = 1,82).

Die Ergebnisse der offenen Card Sorting Studie sind Abbildung 3.8 zu entnehmen. Acht Teilnehmende teilten die neun Aufgaben jeweils in einzelne Kategorien ein, was keiner Reduktion entspricht. 17 Probanden gaben an, dass sie die Arbeitsphasen nach dem Tagesablauf und nicht nach dem Inhalt kategorisiert haben. Ab einer Stichprobengröße von über 25 [150, S. 589] beziehungsweise 30 [151] Teilnehmern wird zur Auswertung die Actual Agreement Methode (AMM) empfohlen, die im Folgenden angewandt wird. Dieses Vorgehen zeigt in einem Dendrogramm an, wie viel Prozent der Teilnehmer einer gegebenen Gruppierung anhand ihrer eigenen getroffenen Auswahl zustimmen. Abbildung 3.8 zeigt, dass gemäß der AMM Cut-Off-Werte bei 26 % und 40 % vorgeschlagen werden. Es wird entschieden, die Reduktion auf vier Phasen vorzunehmen, weil diese Gruppierung von 40 % der Nutzer gewählt wurde.

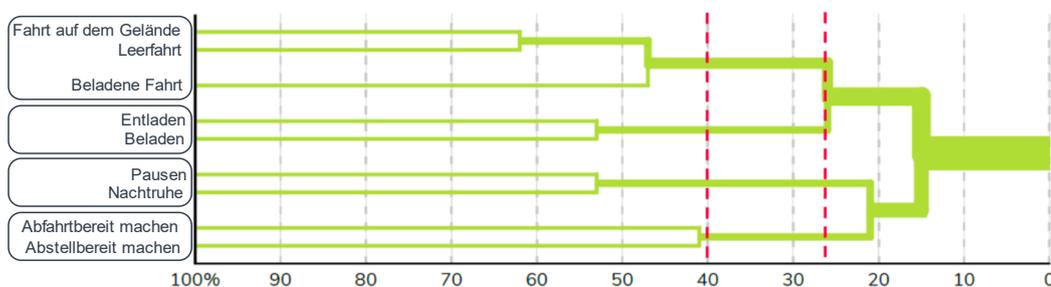


Abbildung 3.8: Dendrogramm der neun Arbeitsphasen mit zusammengefassten Kategorien nach der Actual Agreement Method anhand von Cut-Off-Werten bei 26 % und 40 %

Es resultiert die Zusammenführung der Situationen „Fahrt auf dem Gelände“, „Leerfahrt“ und „Beladene Fahrt“ zu einer Arbeitsphase. Eine weitere Phase besteht aus den Situationen „Beladen“ und „Entladen“, während „Pause“ und „Nachtruhe“ zu einer dritten Phase zusammen-

gefasst werden. Die letzte Phase besteht aus den Situationen „Abfahrtbereit machen“ und „Abstellbereit machen“. Basierend auf den Namensvorschlägen für die durch die N = 31 Fahrer neu gebildeten Oberkategorien wird in einem Workshop mit N = 3 MMS-Experten die in Abbildung 3.9 gezeigte Benennung festgelegt.



Abbildung 3.9: Aus der Card Sorting Studie mit N = 31 Lkw-Fahrern resultierende vier Arbeitsphasen zur Definition der Adaptivität

3.6 Zusammenfassung und Diskussion

In Kapitel 3.2 wurde die Frage aufgestellt, hinsichtlich welcher Faktoren sich die adaptive MMS anpassen sollte, um den späteren Nutzern des Systems eine größtmögliche Unterstützung während des Arbeitsalltags zu bieten.

Gemäß dem aufgezeigten Stand der Technik muss abgewogen werden, ob eine Adaption an den Fahrerzustand, das Nutzungsverhalten oder den Nutzungskontext dem Nutzer den größten Mehrwert bietet. Die durchgeführte explorative Aufgaben- und Alltagsanalyse mit N = 5 Lkw-Fahrern indizierte, dass die aus Lkw-Fahrern bestehende Nutzergruppe ihren Alltag gedanklich in neun Arbeitsphasen unterteilt. Im Rahmen der Befragungen wurden keine Indikationen auf regelmäßige Bedienmuster gefunden, weshalb keine Adaption an das Nutzerverhalten empfohlen wird. Weiter wurden keine Indizien gefunden, die auf eine vom Fahrerzustand abhängige Nutzung von Fahrzeugfunktionen hinweist. Basierend auf den Ergebnissen wird entschieden, eine Adaption an den Nutzungskontext weiterzuverfolgen.

Eine anschließend durchgeführte Online-Umfrage mit N = 80 Lkw-Fahrern konnte die Relevanz der identifizierten Arbeitsphasen bestätigen und zeigte auf, dass aus Nutzersicht während den Phasen unterschiedliche Fahrzeugfunktionen relevant sind. Zudem wurde eine Zuordnung von Fahrzeugfunktionen zu den Arbeitsphasen vorgenommen und diese als Kontext der adaptiven MMS definiert. Die neun Arbeitsphasen wurden aufgrund inhaltlicher Überschneidungen in einem dritten Schritt unter Einbezug von N = 31 Lkw-Fahrern in vier Phasen zusammengefasst und die adaptive MMS somit weiter vereinfacht.

Die in Kapitel 3.2 aufgestellte Forschungsfrage wird damit beantwortet, dass eine Adaption an den Kontext erfolgen sollte. Der Kontext wird über die aktuell vorliegende Arbeitsphase im Alltag eines Lkw-Fahrers definiert. Dieser Ansatz wird durch ein von Volvo Truck [152] umgesetztes Interaktionskonzept unterstützt. Der Nutzfahrzeughersteller entwarf eine manuell umschaltbare Anzeige des digitalen Tachographen, die den Informationsbedarf an die Tätigkeiten der Fahrer anpasst [152]. Die Umschaltung geschieht bei diesem Konzept jedoch manuell durch den Fahrer und erfüllt folglich nicht die Definition einer adaptiven MMS.

Einschränkend wird erwähnt, dass die identifizierten Arbeitsphasen die Hauptverkehrsarten Verteiler-, Fern- und Baustellenverkehr abdecken. Es wird die Prüfung einer Übertragbarkeit auf Spezialanwendungsfälle wie Feuerwehr- oder Abfallsammelfahrzeuge in Folgeuntersuchungen empfohlen. Eine Anpassung oder Erweiterung der vier Arbeitsphasen kann hierbei notwendig

sein, insbesondere weil im Nutzfahrzeugbereich individuelle Arbeits- und Bedienabläufe auftreten [58, S. 62].

Es wurden für die Arbeitsphasen relevante Fahrzeugfunktionen identifiziert, die dem Fahrer jeweils angezeigt werden sollten. Die Zuordnung sollte in Folgeuntersuchungen unter Einbezug einer größeren Stichprobe über einen längeren Zeitraum validiert werden, weil die vorliegende Arbeit aufgrund zeitlicher und ökonomischer Restriktionen dies nicht zu leisten vermag. In diesem Zusammenhang kann das Auftreten von sich wiederholenden Bedienabläufen geprüft werden, etwa durch das Aufzeichnen von Bedienhandlungen. Untersuchungen im Pkw-Bereich zeigen, dass die von Probanden berichtete Funktionsnutzung von dem tatsächlichen Nutzungsverhalten abweichen kann [153, S. 61]. Dieses Vorgehen würde zudem das Identifizieren von Bedienmustern ermöglichen und gegebenenfalls den zusätzlichen Einsatz einer Adaption an das Nutzerverhalten rechtfertigen.

Aus dem Stand der Technik können weitere Anforderungen an die Adaptivität abgeleitet werden. So wurde festgestellt, dass die Erkennungsgüte einen wesentlichen Einfluss auf die Effizienz der Bedienung sowie die Akzeptanz durch die Nutzergruppe hat. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Gestaltung einer adaptiven MMS aus Sicht der Mensch-Maschine-Interaktion, weshalb keine Entwicklung der Situationserkennung erfolgt. Die technische Implementierung beeinflusst jedoch die Erkennungsgüte des Systems, wodurch das Nutzererlebnis maßgeblich beeinflusst wird. Deshalb sollte die Umsetzung in Folgearbeiten erfolgen und Faktoren wie die Gebrauchstauglichkeit, Akzeptanz und Nützlichkeit des Systems unter Berücksichtigung der Erkennungsgüte validiert werden.

Es lassen sich dennoch erste Anforderungen an die Erkennungsrate aus der Literatur ableiten. So wird basierend auf den Ergebnissen von Gajos et al. [141] hypothetisiert, dass eine adaptive MMS über eine Erkennungsgüte von mindestens 70 % verfügen sollte. Bei einer Unterschreitung steigt das Risiko, dass die Adaptivität keinen Mehrwert gegenüber einer statischen Umsetzung bietet und sogar zu einer ineffizienteren Bedienung und geringeren Nutzerakzeptanz führt. Der Stand der Technik zeigt, dass durch Fortschritte im Bereich des maschinellen Lernens die Klassifikation von Situationen kontinuierlich verbessert werden kann. So wurden von Wiedner et al. [139] Fahrsituationen und Verkehrsbedingungen anhand von Algorithmen des maschinellen Lernens und Fahrzeugdaten erkannt, die einen vergleichbaren Komplexitätsgrad wie die identifizierten Arbeitsphasen darstellen. Hervorzuheben ist, dass die Autoren bereits mit einem 100 Stunden umfassenden Datenset die Minimalanforderung einer Erkennungsgüte von 70 % mit über 84 % deutlich übertreffen [139, S. 13015]. Folgearbeiten sollten daher mögliche Implementierungen unter Einsatz maschinellen Lernens oder hybrider Ansätze umsetzen und die Implementierung in Nutzerstudien auf deren Akzeptanz und Nachvollziehbarkeit prüfen.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass eine Adaptivität des Systems an den aktuellen Kontext sinnvoll ist. Der Kontext wird über vier Arbeitsphasen definiert, woraufhin dem Fahrer relevante Fahrzeugfunktionen angezeigt werden sollen. Die Erkennung wird aufgrund der hohen Anzahl an Fahrzeugsignalen durch Algorithmen des maschinellen Lernens empfohlen, um eine möglichst hohe Erkennungsgüte zu erreichen.

Adaptivität setzt voraus, dass die Funktionsbelegung der MMS dynamisch geändert werden kann. Um eine solche flexible Belegung im Nutzfahrzeug zu ermöglichen, wird im folgenden Kapitel auf geeignete digitale Bedienmodalitäten eingegangen.

4 Auswahl der Bedienmodalität

Dieses Kapitel legt zunächst den Stand der Forschung und Technik bezüglich digitaler Bedienmodalitäten dar. Anschließend wird das gewählte Vorgehen zur Auswahl einer für das Nutzfahrzeug geeigneten digitalen Bedienmodalität aufgezeigt sowie die Resultate der Teilschritte vorgestellt und diskutiert.

4.1 Stand der Forschung und Technik: Bedienmodalitäten

Bei Bedienkonzepten wird zwischen direkter und indirekter Interaktion unterschieden [154, S. 16]. Die indirekte Interaktion zeichnet sich dadurch aus, dass die Ein- und Ausgabegeräte unterschiedlich sind [155, S. 582]. Beispiele hierfür sind die Bedienung eines Computers mittels Maus und Tastatur [156, S. 178] oder eines Infotainmentsystems über einen Dreh-Drück-Steller (DDS) im Bereich der Mittelkonsole [157, S. 610]. Bei der direkten Interaktion hingegen erfolgen Nutzereingabe und Systemrückmeldung lediglich über ein und dasselbe Anzeige- und Bedienteil. Ein Beispiel hierfür sind Touchscreens [157, S. 609] sowie physische Hubtaster mit integrierten LEDs zur Rückmeldung des Funktionszustands oder Kippschalter, die den Funktionszustand über die Position des Stellteils rückmelden.

Während beide Kategorien Vor- und Nachteile aufweisen, wird im Rahmen dieser Arbeit der Fokus auf Bedienmodalitäten der direkten Interaktion gelegt. Diese ermöglichen schnellere Betätigungen [157, S. 618, 158, S. 849, 159, S. 203] und entsprechen dem Bedienparadigma einer direkten Bedienung, das den Nutzern durch physische Bedienteile wie Hubtaster oder Kippschalter bekannt ist. Im Folgenden wird auf digitale Hardwarekonzepte der Kategorie der direkten Interaktion eingegangen.

4.1.1 Digitale Bedienmodalitäten

Die Entwicklung eines adaptiven Bediensystems erfordert, dass in Abhängigkeit der aktuellen Situation dynamisch die Belegung von Funktionen geändert werden kann. Folglich ist eine Abkehr von physischen Hubtastern mit statisch eingravierten oder -gelaserten Funktionssymbolen notwendig. In diesem Abschnitt sollen mögliche digitalisierte Alternativen anhand des Stands der Forschung und Technik vorgestellt und diskutiert werden.

Eine mit geringem technischem Aufwand umsetzbare Lösung stellen physische Hubtaster in Kombination mit Displays dar. Dieses Prinzip wurde bereits 1980 von Bernotat und Gärtner beschrieben [158, S. 848]. Hierbei werden jeder Taste mehrere Funktionen zugewiesen und die aktuelle Funktion des Bedienelements dem Nutzer mittels einer umschaltbaren Beschriftung

kommuniziert. Dieser erstmalig im Luftfahrtbereich beschriebene Ansatz kommt auch in Automobilen zur Anwendung (Abbildung 4.1).



Abbildung 4.1: Anwendungsbeispiel von physischen Tasten mit zugeordnetem Display des Automobilherstellers Audi AG [160]

Bei diesem Hardwarekonzept ist es empfehlenswert, dass der Nutzer bei der korrekten Zuordnung zwischen Taste und Beschriftung bzw. Symbol auf dem Display unterstützt wird. Im Bereich von Anzeige- und Bedienkonzepten spielen hierfür die Gestaltgesetze nach Wertheimer [161] eine wesentliche Rolle [42, S. 62]. Insbesondere das postulierte Gesetz der Nähe [161, S. 311-313] findet bei diesem Bedienprinzip Anwendung. Die Tasten und deren Beschriftung bzw. Symbol sollten möglichst nah zueinander positioniert werden, um als zugehörig wahrgenommen zu werden.

Die örtliche Übereinstimmung von Anzeige der Beschriftung bzw. Symbol und physischer Hubtaste kann mit dem folgenden technischen Prinzip weiter erhöht werden. Dieses Hardwarekonzept wird nachfolgend als „Displaytaster“ bezeichnet und integriert ein frei programmierbares LCD- oder OLED-Display in einen herkömmlichen mechanischen Hubtaster [162, 163]. Der Platzbedarf sinkt [163, S. 38] verglichen mit der in Abbildung 4.1 gezeigten physisch getrennten Anordnung von Ein- und Ausgabegerät, während weiterhin eine gute blinde Auffindbarkeit sowie die Bestätigung beim Betätigen erhalten bleiben. Dieses Hardwarekonzept findet in Consumer-Electronics-Produkten Anwendung (Abbildung 4.2). Weiter kommen Displaytaster in Fahrzeugmodellen wie dem „Juke“ der Nissan Motor Corporation [164] zum Einsatz.



Abbildung 4.2: Anwendungsbeispiel von Displaytastern aus dem Consumer-Electronics-Bereich des Herstellers Elgato [165]

Der Trend in Fahrzeugen geht in Richtung berührungsempfindlicher Oberflächen [166, S. 1]. Diesen greift das folgende Konzept auf und ersetzt den mechanischen Aufbau der Displaytaster durch kapazitive Bedienflächen. Weiterhin wird ein Display direkt hinter der Bedienfläche hinterlegt. Dieses in Abbildung 4.3 dargestellte Hardwarekonzept kann somit als „mehrere kleine, voneinander physisch abgegrenzte Touchscreens“ beschrieben werden.

Diese nachfolgend „kapazitive Tasten“ genannte Bedienhardware besteht in Abgrenzung zu Displaytastern aus unbeweglichen Teilen. Während kapazitive Tasten meist in einer planen Fläche eingelassen sind, um im ausgeschalteten Fahrzeug ein flächiges und ungestörtes Design zu erreichen, können die Bedienflächen, wie in Abbildung 4.3 gezeigt, durch physische Stege abgegrenzt werden. So werden die Bedienfelder durch den Tastsinn lokalisierbar. Die Möglichkeit

der Interaktion ist aufgrund des eingeschränkten bedienbaren Bereichs auf das Aktivieren und Deaktivieren von Funktionen limitiert. Komplexere Interaktionen wie beispielsweise das Parametrieren einer Funktion würde den Zusammenschluss mehrerer kapazitiver Tasten erfordern. Dieses Konzept findet in der Automobilindustrie, zum Beispiel in dem von der Mercedes-Benz AG entwickelten AMG GT Coupé [167], Anwendung.



Abbildung 4.3: Anwendungsbeispiel kapazitiver Tasten mit hinterlegtem Display des Automobilherstellers Mercedes-Benz AG [167]

Der Zusammenschluss von kapazitiven Tastern zu einem vollflächigen berührungssensitiven Display stellt das letzte digitale Hardwarekonzept dar, das im alltäglichen Sprachgebrauch „Touchscreen“ genannt wird (Abbildung 4.4). Durch die zunehmende Digitalisierung und eine starke Nachfrage seitens der Nutzer [168, S. 117] erfreut sich dieses Konzept einer hohen Verbreitung im Bereich der Consumer-Electronics-Geräte und Automobilen [13, S. 1], wobei der erste Einsatz in einem Fahrzeug bereits 1986 erfolgte [169]. Weiter findet dieses Prinzip zunehmend in sicherheitskritischen Applikationen wie Flugzeugen [170, S. 9, 171, S. 66] und Nutzfahrzeugen [6, S. 17] Anwendung.

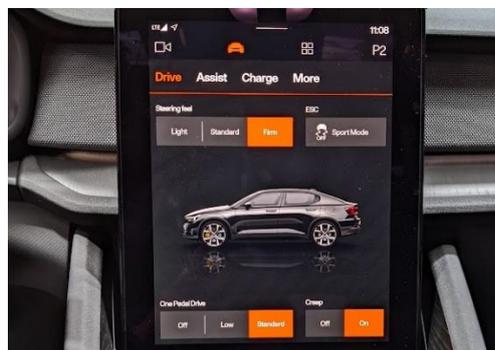


Abbildung 4.4: Anwendungsbeispiel eines Touchscreen des Automobilherstellers Polestar [172]

Die vorgestellten digitalen Bedienmodalitäten unterscheiden sich anhand der Art der Eingabe. Der Nutzerinput kann durch physische Hubtasten oder berührungssensitive Bedienflächen registriert werden. Die der letzteren Kategorie angehörigen Touchscreens sowie kapazitiven Tasten verfügen aufgrund ihrer Bauart über Herausforderungen [16], auf die nachfolgend eingegangen wird.

Herausforderungen berührungssensitiver Hardwarekonzepte

Nachfolgend sollen die größten Limitationen berührungsempfindlicher Hardwarekonzepte vorgestellt werden, bevor in Abschnitt 4.1.2 Lösungsansätze diskutiert werden.

Wie in Abschnitt 2.1.2 dargelegt, erfordert die Ausführung der Fahraufgabe eine hohe visuelle Aufmerksamkeit. Um bei der Bedienung von Fahrzeugfunktionen den visuellen Sinneskanal zu entlasten, damit mehr visuelle Aufmerksamkeit auf die Straße gerichtet werden kann [173, S. 1-

12], sollten Kontrollelemente im Fahrzeug durch den Tastsinn wahrnehmbar sein [166, S. 14]. Touchscreens verletzen genau diese Anforderung [174, S. 22], weil die Interaktionselemente im Gegensatz zu physischen Bedienelementen nur visuell lokalisiert werden können [175, S. 80], wie in Tabelle 4.1 aufgezeigt wird.

Tabelle 4.1: Anhand des Stands der Wissenschaft abgeleiteter visueller Workload der vorgestellten digitalen Hardwarekonzepte ohne technische Erweiterungen

Digitale Modalität	Auffindbarkeit ohne Blickabwendung	Haptisches Feedback bei Betätigung
Touchscreen	Nicht gegeben	Nicht gegeben
Kapazitive Tasten	Nicht gegeben	Nicht gegeben
Hubtaste mit eingebautem Display	Vorhanden	Vorhanden
Hubtaste mit direkt zugeordnetem Display	Vorhanden	Vorhanden

Der resultierende hohe visuelle Workload [176, S. 7] führt deshalb zu Sicherheitsbedenken und Zweifeln an der Eignung für automobiler Anwendungen [16, 174, S. 22]. Dies steht im Einklang mit den in Abschnitt 2.1.1 aufgeführten Modellen der Informationsverarbeitung, nach denen die gleichzeitige Ausführung über denselben Sinneskanal ablaufenden Aufgaben zu vermeiden ist. Eine von Zhao et al. [177] durchgeführte Realfahrzeugstudie, in deren Rahmen ein physisches mit einem touchbasierten Klimabedienteil ohne Feedback verglichen wurde, bestätigt dies. So konnten die Autoren bei der Bedienung des Touchscreens neben einer signifikant schlechteren Fahrgüte vor allem eine deutlich höhere visuelle Ablenkung feststellen [177, S. 11-12]. Als wesentlicher Nachteil von berührungsempfindlichen Bedienmodalitäten ist deshalb die erhöhte visuelle Ablenkung festzustellen. Im Umkehrschluss ist eine Erhöhung der Blindbedienbarkeit anzustreben.

Anzeige- und Bedienelemente sollten im Fahrzeug so verbaut werden, dass eine gute Erreichbarkeit sowie einwandfreie Ablesbarkeit gewährleistet werden [178, S. 105]. Bei direkten Eingabemodalitäten, die zugleich Ein- als auch Ausgabemedium sind, stellt dies einen Zielkonflikt dar [179, S. 51]. Zugunsten einer guten Einsehbarkeit und geringen Blickabwendung ist eine hohe Position in der Instrumententafel wünschenswert, während der optimale Greifraum eine niedrigere Verortung erfordert. In Folge wird bei der Positionierung ein Kompromiss eingegangen, der in der Regel zum Vorteil der Sicherheit ausfällt. In der Folge ist bei der häufigen Bedienung eines Touchscreens eine Ermüdung des Arms möglich [157, S. 621].

Der Einsatz berührungssensitiver Bedienmodalitäten im Fahrzeug polarisiert die Nutzer und ist kein emotionsfreies Thema. Zum einen werden in modernen Fahrzeugen Touchscreens erwartet und von Kunden gewünscht [168, S. 117]. Hingegen vermissen andere Nutzergruppen physische Bedienelemente in ihren Fahrzeugen so stark, dass Hersteller die Möglichkeit zur Nachrüstung von Hubtastern zur Steuerung der Fahrzeugfunktionen anbieten [180]. Die Akzeptanz berührungssensitiver Bedienteile durch die angepeilte Nutzergruppe ist folglich zu berücksichtigen. Insbesondere, weil Lkw-Fahrer zunehmend in den Entscheidungsprozess beim Kauf von Nutzfahrzeugen eingebunden werden [6, S. 12].

Wie in Abschnitt 2.1.3 dargelegt, verfügen Nutzfahrzeuge über Schwingsitze, wodurch eine Vertikalbewegung des Fahrers relativ zum Instrumententräger möglich ist [6, S. 14]. Dies wirkt sich ungünstig auf die Bedienung berührungssensitiver Modalitäten aus, weil die treffgenaue Bedienung von Touchscreens durch Schwingungen erschwert wird [181, S. 91, 182, S. 993],

insbesondere wenn keine Möglichkeit zur Stabilisierung des Arms über eine Auflage möglich ist [179, S. 51]. Weiter sollten die durch das Befahren von schlechten Straßen entstehenden Fahrzeugbewegungen adressiert werden, da diese die Interaktion mit Touchscreens erschweren [181, S. 85]. Mit einer Zunahme der Fahrzeugbewegungen erhöht sich neben der Bedienzeit [16, 183, S. 498] die Blickabwendungszeit von der Fahraufgabe sowie die mentale Beanspruchung [183, S. 499]. Es ist jedoch auch im Nutzfahrzeug mit einem zunehmenden Einsatz von berührungssensitiven Bedienelementen zu rechnen [6, S. 17, 49, S. 65], weil diese Vorteile wie eine flexible Gestaltung ermöglichen. Weiter können die dargelegten Schwächen durch eine technische Erweiterung minimiert werden, wie im nächsten Abschnitt dargelegt wird.

4.1.2 Optimierung berührungssensitiver Hardwarekonzepte

Wie im vorangegangenen Abschnitt erörtert, weisen berührungssensitive digitale Modalitäten ein hohes Potenzial der Blickabwendung auf. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.1.1 eingeführten Theorie multipler Ressourcen nach Wickens [34, 35] wird deshalb empfohlen, die Interaktion auf weitere Sinneskanäle zu verteilen, insbesondere bei der Bedienung von Fahrzeugfunktionen [43, S. 5]. Im Besonderen ist die fehlende Haptik von berührungssensitiven Modalitäten zu kritisieren. Aus diesem Grund wird nachfolgend erörtert, wie der Tastsinn des Fahrers in die Interaktion einbezogen werden kann, um die Blindbedienbarkeit berührungssensitiver Bedienmodalitäten zu erhöhen. Weiter ist im Nutzfahrzeug mit erhöhten Schwingungen und Vibrationen am Fahrerarbeitsplatz zu rechnen [6, S. 14], wie in Abschnitt 2.1.3 dargelegt. Daher wird aufgezeigt, wie die Bedienbarkeit unter den zu erwartenden Fahrzeugbewegungen verbessert werden kann.

Erhöhung der Blindbedienbarkeit

Berührungssensitive Bedienmodalitäten besitzen ein hohes visuelles Ablenkungspotenzial. Deshalb werden nachfolgend Ansätze zur Verringerung der Blickabwendung im Fahrzeug vorgestellt und diskutiert. Basierend auf der im vorangegangenen Abschnitt skizzierten Problematik einer fehlenden haptischen Rückmeldung empfiehlt sich eine verstärkte Nutzung des Tastsinns. Die Relevanz haptischer Informationen während des Bedienvorgangs soll anhand eines von Breitschaft et al. [166] vorgestellten Frameworks erläutert werden. Die Autoren unterscheiden bei einem Bedienvorgang zwischen vier Phasen, die in Abbildung 4.5 veranschaulicht und nachfolgend erläutert werden.

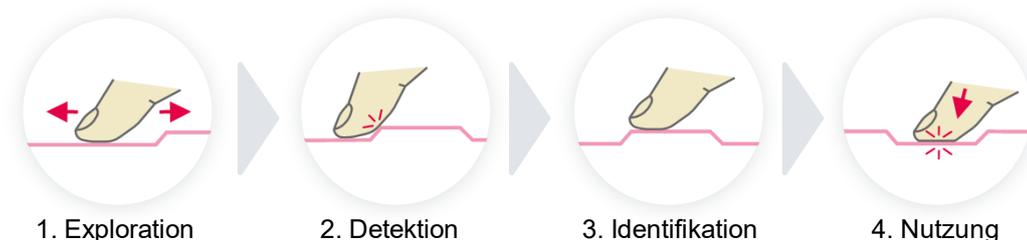


Abbildung 4.5: Vier Phasen der haptischen Verarbeitung bei der Interaktion nach Breitschaft et al. [166, S. 13]

Ein Bedienvorgang beginnt mit der Explorationsphase. Die Exploration der Oberflächen des Fahrzeuginnenraums wird durch die Intention des Fahrers, eine Interaktion anzustoßen, eingeleitet [166, S. 8]. Hierbei setzt der Nutzer Explorationsstrategien ein, wobei die relevanteste

Strategie für den Fahrzeugkontext die tangentielle Erkundung ist [184, S. 2127]. Hierbei wird der Finger über die Oberfläche gestrichen, um Merkmale wie etwa die Rauheit, Härte, Textur und Formgebung des Fahrzeuginnenraumelements zu ertasten [166, S. 8]. Das Ergebnis der Explorationsphase sind Informationen über Kanten oder Erhebungen, die im folgenden Schritt weiter erkundet werden.

Die sich anschließende Detektionsphase hat das Ziel, interaktive Bedienelemente von dekorativen Elementen des Fahrzeuginnenraums zu unterscheiden [166, S. 9]. Informationen aus der vorangegangenen Explorationsphase fließen in diese Phase ein, weil interaktive und dekorative Bereiche meist durch Ecken, Kanten und Vorsprünge abgetrennt sind. Zusätzlich wird geprüft, ob sich Bereiche anheben, bewegen, drücken oder drehen lassen [166, S. 9]. Die Detektion kann durch gezielte haptische Informationen erleichtert werden. So kann die Position eines Bedienelements auf der Oberfläche durch Erhebungen, Einkerbungen, sich ändernde Rauheit oder Materialbeschaffenheit kodiert werden [166, S. 10]. Das Ergebnis der Detektionsphase besteht aus dem Wissen, wo sich interaktive Bereiche und Kontrollelemente befinden. Deren Funktionalität sowie die verfügbaren Interaktionsarten, wie etwa Druckausübung oder Wischgesten, sind jedoch noch unklar [166, S. 9].

In der Identifikationsphase prüft der Nutzer, ob das detektierte Kontrollelement zur Intention des Nutzers passt [166, S. 10]. Zunächst prüft der Nutzer, wie mit dem Kontrollelement interagiert werden kann, wobei erneut haptische Hinweise in der Systemgestaltung helfen können [166, S. 11]. So können Form und Position des Kontrollelements eine Identifikation und Abgrenzung von anderen Elementen erleichtern. Eine schräg gestellte Oberfläche des Kontrollelements signalisiert etwa, dass eine Ein- und Ausschaltlogik wie bei einem Wippschalter vorliegt. Daraus wird geschlussfolgert, dass die Betätigung durch die Ausübung von Druck erfolgt [185, S. 67]. Mit Abschluss der Identifikationsphase liegt ausreichend Wissen über die Funktionalität des Kontrollelements vor, um den Bedienvorgang mit der passenden Aktion auszuführen [166, S. 11].

Die eigentliche Interaktion mit dem Kontrollelement erfolgt in der Nutzungsphase [166, S. 11-12]. Hierbei wird das Bedienteil betätigt, um den gewünschten Zielzustand des Systems zu erreichen [166, S. 12]. Die Interaktion wird erneut durch haptische Informationen unterstützt. So kann haptisches Feedback bestätigend signalisieren, dass eine Betätigung erfolgreich durchgeführt wurde [166, S. 12]. Der Bedienvorgang ist abgeschlossen, wenn das zuvor gesetzte Ziel des Nutzers erreicht wurde [166, S. 12].

Übertragen auf berührungssensitive Modalitäten wird abgeleitet, dass insbesondere die Schritte „Detektion“ und „Nutzung“ durch technologische und konzeptionelle Maßnahmen unterstützt werden können. Daraus lassen sich zwei Handlungsempfehlungen ableiten: Digitale Bedienmodalitäten sollten die Lokalisierung des Kontrollelements sowie dessen Betätigung durch haptische und taktile Reize augmentieren.

Fühlhilfen zum Auffinden von Interaktionselementen

Der Vorgang der Lokalisierung des Bedienelements ohne Blickabwendung wird zudem als haptische Suche bezeichnet [166, S. 5]. Das Auffinden und Detektieren von Interaktionselementen über den Tastsinn kann durch sogenannte Fühlhilfen unterstützt werden. Die erste Art von Fühlhilfen basiert auf Topologieänderungen der Bildschirmoberfläche. Interaktive Bereiche der Bildschirmoberfläche werden durch Erhebungen oder Vertiefungen haptisch kommuniziert. Beim Erkunden der Bildschirmoberfläche folgt die Fingerkuppe dem Relief, wie in Abbildung 4.6 dargestellt ist.

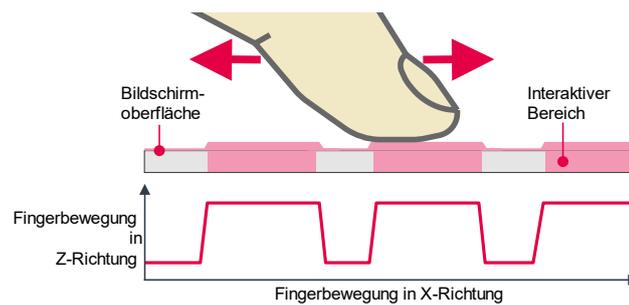


Abbildung 4.6: Funktionsprinzip von auf Topologieänderungen der Bildschirmoberfläche basierenden statischen Fühlhilfen

Diese Topologieänderung wird durch das Auftragen eines leitenden Materials erreicht, sodass die Fingerposition weiterhin kapazitiv auf dem Bildschirm detektiert werden kann. Dieses Prinzip findet bereits in ersten Fahrzeugen Anwendung (Abbildung 4.7). Die Position des dreidimensionalen Reliefs ist in der Regel unveränderlich und dementsprechend als statische Fühlhilfe zu bezeichnen [186, S. 10]. Daraus ergibt sich, dass die Erstellung des User Interfaces anhand eines definierten Rasters erfolgen muss, um zu gewährleisten, dass sich Bedienelemente an der haptisch markierten Position befinden. Zu erwähnen sind erste experimentelle Ansätze zur dynamischen Positionierung von Erhebungen auf der Glasoberfläche, die kein statisches Raster erfordern. Diese dynamischen Topologieänderungen werden durch das Pumpen von Flüssigkeit in dehnbare Gefäße einer Displaybeschichtung realisiert [187], finden bislang jedoch noch keinen Einsatz in Konsumgütern und werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.



Abbildung 4.7: Anwendungsbeispiel einer Topologieänderung der berührungsempfindlichen Bildschirmoberfläche des Automobilherstellers BMW AG

Die Dreidimensionalität des Bedienelements kann gemäß Kuehner [188] die Blindbedienbarkeit verbessern und den visuellen sowie kognitiven Workload reduzieren [188, S. 38]. Die Wirksamkeit von Fühlhilfen durch Topologieänderungen der Oberfläche wurde bereits durch Nutzerstudien belegt. So konnte bereits eine Verbesserung der Bediengenauigkeit gezeigt werden [189, S. 9]. Zudem stellt sich bei den Probanden eine Verbesserung der subjektiven Einfachheit der Bedienung [175, S. 84] sowie der Eigenwahrnehmung von Bediengeschwindigkeit und -genauigkeit ein [189, S. 9].

Die menschliche Fingerspitze ist äußerst sensibel und kann bereits geringe Unterschiede lateraler Scherkräfte wahrnehmen, beispielsweise beim Entlangstreichen des Fingers über unterschiedliche Oberflächen [190, S. 43]. Folglich sind Fühlhilfen nicht nur durch Topologie-, sondern auch Reibwertänderungen der Bildschirmoberfläche realisierbar (Abbildung 4.8).

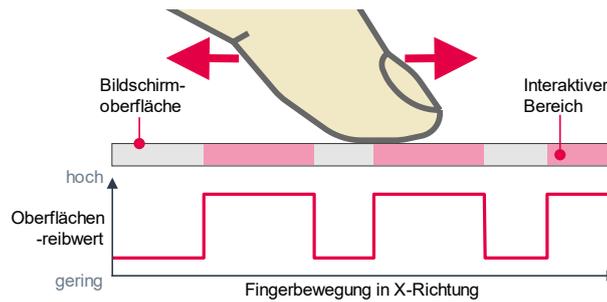


Abbildung 4.8: Funktionsprinzip von auf Reibwertänderungen der Bildschirmoberfläche basierenden statischen Fühlhilfen

Bei diesem Ansatz werden interaktive Bereiche der Bildschirmoberfläche mit einem vom Rest der Oberfläche abweichenden Reibwert haptisch markiert [166, S. 10]. Wichtig ist hierbei, dass der Übergang der Oberfläche beim Erreichen interaktiver Bereiche möglichst sprunghaft erfolgt [166, S. 10]. Der bedienbare Bereich kann etwa durch einen abrupt erhöhten Reibwert erfolgen, wie Abbildung 4.9 anhand eines Anwendungsbeispiels mit angerauter Oberfläche zeigt.



Abbildung 4.9: Anwendungsbeispiel einer Reibwertänderung der berührungsempfindlichen Bedienoberfläche eines Kaffeevollautomaten des Herstellers Koninklijke Philips N.V.

Während es sich bei einer veränderten Oberflächentextur aufgrund der unveränderlichen Positionierung um eine statische Fühlhilfe handelt, ist eine flexiblere Umsetzung möglich. Sogenannte dynamische Fühlhilfen erlauben es, beliebig auf dem Interaktionselement platzierte Kontrollelemente ohne Blickabwendung zu lokalisieren. Dies hat gegenüber statisch aufgetragenen Fühlhilfen den Vorteil, dass das User Interface nicht mehr anhand eines unveränderlichen Rasters ausgelegt werden muss [191, S. 25] und der Gestaltungsspielraum steigt.

Hierfür werden Effekte der Elektroadhäsion genutzt [190], wobei der Reibwert in Abhängigkeit der aktuellen Fingerposition moduliert wird [192, S. 562]. Abbildung 4.10 zeigt, dass hierfür eine Spannung über eine zusätzliche Schicht auf der Glasschicht des Bildschirms angelegt wird.

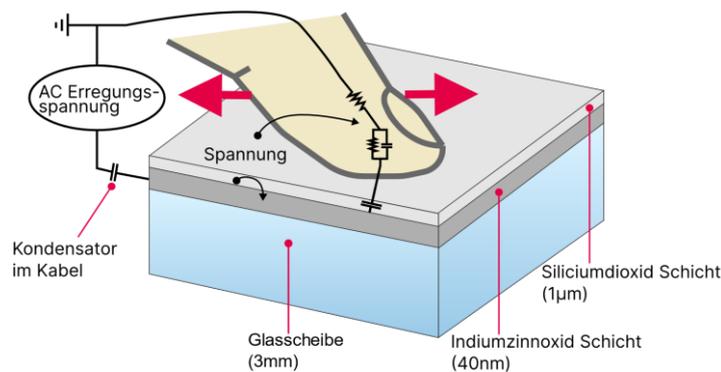


Abbildung 4.10: Technisches Funktionsprinzip von auf elektrostatischer Reibwertänderung über Elektroadhäsion basierenden dynamischen Fühlhilfen nach Meyer et al. [190]

Durch eine entsprechende Modulation der Spannung wird die Anziehung des Fingers und somit der wahrnehmbare Reibwert beeinflusst [193, S. 295]. Aus elektrotechnischer Sicht kann der Finger dabei durch einen parallel geschalteten Kondensator und Widerstand modelliert werden [190, S. 44]. Für den Nutzer werden dadurch verschiedene Texturen [191, S. 25] bis hin zu Erhebungen auf der Bildschirmoberfläche [194, S. 542] haptisch wahrnehmbar. Eine vergleichbare Reibwertänderung lässt sich durch eine Anregung des Bildschirms über Vibrationsmotoren im Ultraschallbereich erreichen [173, S. 2]. Als Einschränkung dynamischer Fühlhilfen ist zu berücksichtigen, dass der Effekt ausschließlich beim Bewegen des Fingers erlebbar [193, S. 295] und vom Nutzer schwächer wahrnehmbar ist [193, S. 299].

Dieser Ansatz dynamischer Fühlhilfen wurde bislang primär aus funktionaler Sicht [190, 195, 196] und meist unter Einsatz erster kommerziell erhältlicher Development-Kits betrachtet. Erste Nutzerstudien zeugen von dem Potenzial und berichten eine Erhöhung der User Experience [193, S. 297-301] sowie der Blindbedienbarkeit bei wischenden Gesten [197, S. 8]. Weitere Simulatorstudien konnten jedoch keine Verbesserung quantitativer Messgrößen wie der Anzahl an Bedienfehlern, den Bedienzeiten sowie der Fahrgüte demonstrieren [193, S. 297-301]. Als Grund hierfür vermuten Breitschaft et al. [193] die schwache Spürbarkeit dynamischer Reibwertänderungen [193, S. 299], Tivadar et al. [173] hingegen das neuartige und für die Probanden irritierende Gefühl des Feedbacks [173, S. 5]. Diese Hypothesen stehen im Einklang mit von Tunca et al. [198, S. 141-143] und Isleyen et al. [192, S. 569] durchgeführten Studien, nach denen aktive haptische Fühlhilfen nicht so effektiv wie passive sind. Bernard et al. [194] erklären dies damit, dass der Effekt reibwertbasierter Fühlhilfen limitiert ist [194, S. 542]. Daher ist eine weitere Erforschung der Technologie mittels Probandenstudien sowie eine Verstärkung des Effekts, um eine höhere Spürbarkeit zu erzielen, notwendig. Dies wird insbesondere für den Einsatz in Fahrzeugen empfohlen, weil während der Fahrt auftretende Bewegungen sowie Vibrationsanregungen das haptische Feedback von Bedienteilen überlagern und schwer wahrnehmbar machen können [199, S. 17].

Eine technisch simplere Variante dynamischer Fühlhilfen kann mittels Vibrationsmotoren umgesetzt werden. Sobald der Finger den Bereich eines Buttons erreicht, wird ein Vibrationsmuster abgespielt [200, S. 56, 201]. Hierbei wird dem Nutzer beim Überfahren der Kanten von interaktiven Elementen ein haptischer Hinweis, etwa in Form eines Klickens über Piezo-Aktuatoren oder Vibrationsmotoren, ausgegeben [166, S. 14]. Abbildung 4.11 zeigt das Funktionsprinzip anhand von vibrotaktilen Feedback, das dem Nutzer das Erreichen und Verlassen interaktiver Bereiche signalisiert.

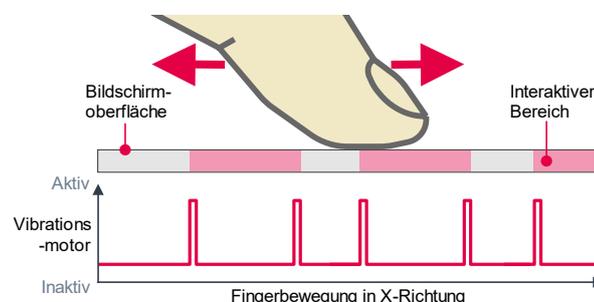


Abbildung 4.11: Funktionsprinzip von auf positionsabhängigem Vibrationsfeedback basierenden dynamischen Fühlhilfen

Fühlhilfen entfalten unabhängig von ihrer technologischen Umsetzung nur in Kombination mit Druckererkennung ihr volles Potenzial. Dies erlaubt ein Abtasten der Bildschirmoberfläche, um die Bedienelemente zu lokalisieren, ohne ungewollt Funktionen auszulösen.

Herkömmliche Touchscreens reagieren bereits durch ein Auflegen des Fingers und führen zu Fehlauflösungen [174, S. 22]. Folglich ist eine Kombination von Fühlhilfen und einer Druckererkennung angebracht, sodass eine Betätigung erst bei einem stärkeren Druck auf die Bildschirmoberfläche erfolgt [202, S. 145]. Dies ermöglicht die in Abbildung 4.5 dargestellten Phasen der haptischen Exploration, Detektion und Identifikation vor der eigentlichen Betätigung eines Bedienelements.

Haptisches Feedback bei der Betätigung

Der hohe visuelle Workload berührungssensitiver Modalitäten rührt unter anderem daher, dass der Nutzer anhand des grafischen Zustands des Kontrollelements visuell kontrollieren muss, ob die gewünschte Funktion getroffen und betätigt wurde [203, S. 1]. Die Rückmeldung der Betätigung von Funktionen sollte im Fahrzeug multimodal und innerhalb von 30-40ms erfolgen [43, S. 5]. Hierfür bietet sich haptisches Feedback an, das der Nutzer von heutigen physischen Bedienelementen bereits gewohnt ist. Bei der Gestaltung des haptischen Feedbacks ist darauf zu achten, dass die haptischen Informationen für die Lokalisierung des Bedienelements sowie das Feedback bei der Betätigung eindeutig voneinander unterscheidbar sind, um Verwechslungen auszuschließen [166, S. 12]. Zudem beeinflusst die haptische Anmutung, worunter haptisches Feedback fällt, die subjektiv wahrgenommene Wertigkeit des Bedienteils [204, S. 113].

Bei der Umsetzung wird nach Breitschaft et al. [166] zwischen passiver und aktiver Haptik unterschieden [166, S. 5]. Passives haptisches Feedback wird von mechanischen Elementen als Reaktion auf durch den Nutzer eingebrachte Energie erzeugt [166, S. 5]. Technisch wird dies etwa durch Feder- oder Schnappscheiben realisiert [166, S. 5], oder eine Kombination aus beiden Ansätzen [188, S. 23]. Beim Ausüben von Druck kommt es beim Erreichen einer definierten Auslöseschwelle zu einem Kraftsprung [205, S. 28], den der Nutzer als haptisches Einrasten empfindet [166, S. 5]. Bezogen auf Touchscreens und kapazitive Tasten kann hinter der Displayfläche ein mechanisches Element platziert werden und erst beim Überschreiten der Kraftschwelle die kapazitiv ermittelte Fingerposition als Nutzereingabe interpretiert werden.

Aktives haptisches Feedback benötigt hingegen eine externe elektrische Energiequelle und folgt einem einprogrammierten Ablauf [206, S. 150]. Zur Realisierung wird zunächst der vom Nutzer auf das Bedienteil ausgeübte Druck gemessen [207, S. 49]. Hierfür eignen sich resistive, kapazitive, optische und piezoelektrische Sensorprinzipien, die von Kern et al. [208] detailliert beschrieben werden [208, S. 332-368]. Beim Erreichen einer definierten Kraftschwelle wird ein haptisches Feedback zurückgemeldet. Die Definition einer angemessenen Kraft, die zur Betätigung benötigt wird, ist nach Kuehner [188] wichtig, um ungewollte Eingaben des Nutzers zu reduzieren [188, S. 37]. Als Auslöseschwelle schlagen Tunca et al. [209] 3,5 Newton vor, weil dieser Wert der für die Betätigung einer physischen Taste benötigten Kraft entspricht [209, S. 335]. Das Feedback kann über Aktuatoren, die auf dem Prinzip von piezoelektrischen, elektromagnetischen oder -statischen Aktoren beruhen, erfolgen [207, S. 49]. Eine detaillierte Analyse geeigneter Aktorprinzipien findet sich bei Kern et al. [208, S. 199-317], eine erste Serienanwendung der Technologie beim Automobilhersteller Audi AG [210]. Der wesentliche Vorteil von aktivem haptischem Feedback besteht darin, dass nur beim Treffen eines programmatisch als interaktiv gekennzeichneten Bedienelements ein Feedback rückgemeldet wird. Zudem kann in Abhängigkeit der Fahrsituation die zur Betätigung benötigte Kraftschwelle dynamisch angepasst werden [207, S. 50]. Dies kann etwa die Fehlbedienungsrate bei der Fahrt im Gelände und

starken Fahrzeugbewegungen reduzieren. Weiter kann haptisches Feedback bei der Betätigung dazu führen, dass ein berührungssensitives Bedienteil wie ein physisches Bedienteil wahrgenommen wird [168, S. 119]. Dies führt zu einer Erhöhung der Intuitivität von Touchscreens [166, S. 14]. Nutzerstudien zeigen zudem, dass die Anzahl der Fehler beim Bedienen eines Touchscreens während der Fahrt durch haptisches Feedback gesenkt werden kann [209, S. 336, 211, S. 77]. Weiter kann die Blickabwendungszeit sowie der mentale Workload verringert werden [212, S. 205]. Neben der Verbesserung dieser sicherheitskritischen Kennwerte kann zudem die User Experience erhöht werden [203, S. 5, 213, S. 4].

Verbesserung der Bedienung unter Schwingung

Die Bedienung berührungssensitiver Interfaces wird durch Schwingungen und Vibration erschwert. Dies wird beim Einsatz in der Luft- und Raumfahrt deutlich, wo etwa durch Turbulenzen die Bedienung erschwert wird [171, S. 59]. Jedoch ist auch am Fahrerarbeitsplatz von Nutzfahrzeugen mit Schwingungen und Vibrationen zu rechnen, insbesondere da sich der Fahrer durch den Schwingsitz relativ zum Armaturenräger bewegt (Abschnitt 2.1.3). Mischke führt an, dass die Bedienung berührungssensitiver Interfaces unter Schwingungen speziell beim Fehlen einer Abstützmöglichkeit und kleinen Bedienflächen erschwert ist [179, S. 51]. Deshalb werden nachfolgend Möglichkeiten zur Verbesserung der Bedienung berührungssensitiver Interfaces unter Schwingungen vorgestellt.

Möglichkeiten des Abstützens

Der primäre Grund für eine verschlechterte Treffsicherheit bei der Bedienung während Schwingungen ist, dass sich Vertikalbewegungen des Fahrzeugs auf den Arm auswirken. Folglich sollten Möglichkeiten geschaffen werden, die es dem Nutzer erlauben, den Arm oder die Hand zu stabilisieren. Dies kann durch eine am Sitz befestigte Auflage geschehen [214, S. 165], auf welcher der Nutzer den Unterarm stabilisierend auflegen kann. Large et al. [215] argumentieren, dass mit einer solchen Auflage des Arms eine Erhöhung der Bediengenauigkeit erreichbar ist [215, S. 162]. Im Übrigen ist eine Stabilisierung durch die Gestaltung von Abstützmöglichkeiten am Displayrand möglich. Diese erlauben es dem Nutzer, die Hand mittels eines oder mehrerer Fingern stabilisierend abzustützen, wie in Abbildung 4.12 gezeigt wird. Typischerweise wird hierbei ein oder mehrere Finger am Displayrand abgestützt, die Hand ausgespreizt und mit einem Finger das Ziel berührt [216, S. 6750]. Bei großen Displayflächen sind in der Mitte des Bildschirms platzierte Elemente über diesen Ansatz jedoch nicht mehr erreichbar [217, S. 21]. Eine limitierte Displaygröße sowie eine Positionierung interaktiver Bereiche am Displayrand ist daher anzustreben. Dies empfiehlt sich vor dem Hintergrund, dass es beim Abstützen notwendig sein kann, die Hand in eine unangenehme Position zu bringen [217, S. 21].

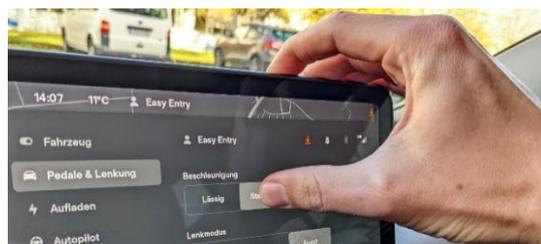


Abbildung 4.12: Nutzung des Displayrands als Abstützmöglichkeit am Beispiel eines Tesla Model 3

Eine weitere Lösung stellt das Abstützen der Hand auf der Displayoberfläche selbst dar. So ist es bei physischen Bedienmodalitäten wie Knöpfen möglich, die Hand stabilisierend aufzulegen, weil ein Taster erst bei erhöhtem Druck betätigt wird [182, S. 994-995]. Dies kann bei berührungssensitiven Modalitäten erreicht werden, etwa durch die am Anfang dieses Kapitels vorgestellte Möglichkeit der Druckerkenung. Weiter ist eine algorithmische Unterscheidung von Berührungen der Oberfläche durch bewusste Nutzereingaben und durch abstützende Berührungen möglich, die beispielsweise durch aufgelegte Handballen charakterisiert werden. So konnten Schwarz et al. [218] zeigen, dass mit diesem Ansatz Erkennungsraten von bis zu 97,9 % erreichbar sind [218, S. 2012]. Cockburn et al. [217] führen diesen Ansatz weiter und schlagen vor, erst das zweimalige Antippen von Schaltflächen als eine intendierte Nutzereingabe zu werten [217]. Einmalige Berührungen der Bildschirmoberfläche werden ignoriert. Da diese Form der Interaktion den Bedienaufwand jedoch erheblich erhöht und nur während starker Fahrzeugbewegungen von Vorteil ist, präferieren 75 % der Probanden einer Simulatorstudie diesen Modus nur während starker Schwingungen [217, S. 23]. Dieser Ansatz eignet sich demnach nur für Anwendungsgebiete, in denen dauerhaft mit erheblichen Fahrzeugbewegungen zu rechnen ist. Bezogen auf Nutzfahrzeuge wäre dies lediglich im Baustellenverkehr, insofern durchgängig auf unbefestigtem Gelände gefahren wird, vorteilhaft.

Ergonomische Positionierung

Die Positionierung der Bedienhardware in Relation zum Benutzer nach ergonomischen Gesichtspunkten ist ein weiterer Ansatz zur Verbesserung berührungssensitiver Hardwarekonzepte. So zeigen Untersuchungen von Kang et al. [214], dass die Position eines Touchscreens relativ zum Nutzer einen Einfluss auf die Bedienzeiten sowie die Treffgenauigkeit hat [214, S. 162]. Aus Sicht der Bedienergonomie ist eine möglichst nahe Positionierung des Touchscreens zu bevorzugen [214, S. 165]. Zugunsten der Ablesbarkeit ist hingegen eine entferntere und höhere Positionierung vorteilhaft, weshalb ein Kompromiss eingegangen werden muss [214, S. 165]. Ein positiver Aspekt einer ergonomischen Positionierung ist das Vermeiden einer Ermüdung des Armes, die vorrangig bei längeren Bedienvorgängen auftreten kann [170, S. 15]. Die Auslegung kann bereits während des virtuellen Produktentstehungsprozesses mithilfe des in der Automobilindustrie verbreiteten Tools zur digitalen Menschmodellierung RAMSIS erfolgen [178, S. 105]. Die Software eignet sich speziell für die ergonomische Positionierung von Touchdisplays im Fahrzeug und kann bereits in frühen Konzeptphasen zum Einsatz kommen [178, S. 111].

Korrektur von Fehleingaben

Während die zuvor genannten Ansätze vorrangig auf einer Anpassung der Bedienhardware oder deren Positionierung basieren, lässt sich auch softwareseitig eine Optimierung erzielen. So kann die Interaktion unter Schwingung durch die Prädiktion des intendierten Nutzerinputs verbessert werden. Bei diesem Ansatz werden die aktuellen Umweltparameter zum Zeitpunkt der Interaktion erhoben, die auf den Fahrer sowie das Fahrzeug einwirken. Mayer et al. [181] schlagen hierfür unter anderem die Fahrzeuggeschwindigkeit und -beschleunigungen sowie die Position auf der Bildschirmoberfläche vor, um anhand von maschinellen Lernens die vom Interface interpretierte Touchposition zu korrigieren [181, S. 90]. Eine Evaluation dieses Ansatzes im Rahmen einer Simulatorstudie zeigte, dass sich durch derartige Verfahren der durch Schwingungen induzierte Abweichung von Nutzereingaben um bis zu 32 % reduzieren lässt [181, S. 91]. Die Autoren schlussfolgern daraus, dass sich das Verfahren zur Erhöhung der Treffgenauigkeit bei der Bedienung berührungssensitiver Interfaces im Fahrzeug eignet. Bei Interaktionsvorgängen unter Schwingungen konnten Mayer et al. [181] beobachten, dass es zu ungewollten

Berührungen der Bildschirmoberfläche kommen kann, woraufhin die Probanden die Position des Fingers an die intendierte Position korrigieren [181, S. 89]. Daraus schlussfolgern die Autoren, dass Nutzereingaben erst beim Verlassen der Bildschirmoberfläche und nicht bereits beim Erstkontakt als solche gewertet werden sollten. Einen weiteren softwareseitig umzusetzenden Ansatz stellt die Definition von Zeitschwellen dar. So kann über die Dauer der Berührung der Bildschirmoberfläche erkannt werden, ob es sich um eine versehentliche Berührung oder intendierten Nutzerinput handelt [14, S. 8]. Kurze Berührungen werden vom System ignoriert. Kritisch anzumerken ist, dass eine zu lang gewählte minimale Interaktionszeit die Bedienzeiten erhöhen kann, weil der Finger länger als gewünscht auf der Oberfläche verweilen muss.

Auslegung des Interaktionskonzepts

Weiteres Verbesserungspotenzial bietet die Optimierung des Interfaces hinsichtlich der Bedienung unter Schwingung. Um das im vorangegangenen Abschnitt dargelegte Abstützen der Hand am Displayrand zu ermöglichen, können Interaktionselemente am Displayrand positioniert werden. Weiter ist eine Positionierung im unteren Displaybereich nach Kang et al. [214] vorteilhaft, weil hierdurch eine erhöhte Treffgenauigkeit sowie geringere Ermüdungseffekte zu erzielen sind [214, S. 162]. Die Treffsicherheit bei Schwingungen durch Fahrzeugbewegungen kann zudem durch größere Zielflächen erhöht werden. So berichten Ng und Brewster [199] im Rahmen einer durchgeführten Realfahrzeugstudie, dass bei kleinen Tasterflächen eine Zunahme der Fehlbedienungen auf Touchinterfaces auftritt [199, S. 17]. Weitere Ausführungen zur Auslegung des Interaktionskonzepts folgen in dem dedizierten Kapitel 5.

4.2 Fragestellung und Vorgehen

Anhand des aufgeführten Stands der Forschung zum Thema digitaler Bedienmodalitäten können vier digitale Modalitäten identifiziert werden. Diese eignen sich für eine dynamische Funktionsanzeige und demzufolge für adaptive MMS. Jedoch ist festzuhalten, dass insbesondere berührungssensitive Bedienmodalitäten Nachteile mit sich bringen, die durch technologische Optimierungen kompensiert werden können. Erkenntnisse über die Eignung der identifizierten Hardwarekonzepte für den Einsatz in Nutzfahrzeugen liegen nicht vor. Daher soll nachfolgend die Forschungsfrage beantwortet werden:

„Welche Bedienhardware eignet sich, um Fahrzeugfunktionen im Nutzfahrzeug dynamisch ein- und auszublenden?“

Fehlentscheidungen während der Produktentwicklung können hohe Folgekosten nach sich ziehen [66, S. 189]. Um solche zu vermeiden, wird ein mehrstufiges Vorgehen gewählt (Abbildung 4.13). Die Auswahl und Kombination der Methoden verfolgt dabei das Ziel, ein geeignetes Hardwarekonzept für den Einsatz im Nutzfahrzeug zu identifizieren.

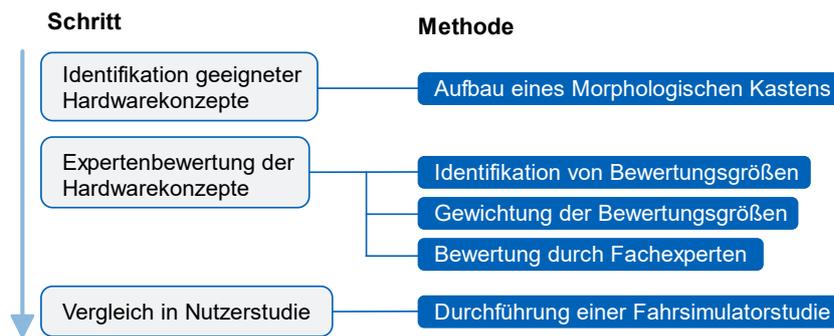


Abbildung 4.13: Teilschritte und angewandte Methoden zur Auswahl der Bedienhardware

Bei der Auswahl von Bedienelementen empfiehlt Müller [42], zunächst den Lösungsraum systematisch zu eröffnen [42, S. 109]. Dies erfolgt im ersten Schritt unter Einsatz eines morphologischen Kastens, basierend auf den in Abschnitt 4.1 aufgezeigten technischen Lösungen für digitalisierte Bedienelemente. Im zweiten Schritt sollen die technischen Lösungen anhand von Expertenmeinungen hinsichtlich ihrer Eignung beurteilt werden. Hierzu werden zunächst Bewertungskriterien identifiziert und hinsichtlich deren Bedeutsamkeit im Entscheidungsprozess gewichtet. Die Bewertung erfolgt anhand der gewichteten Kriterien durch Fachexperten. Abschließend soll eine vergleichende Nutzerstudie durchgeführt werden, um unter Einbezug der Nutzergruppe eine Entscheidung zu treffen.

4.3 Identifikation geeigneter Hardwarekonzepte

In diesem Unterkapitel sollen basierend auf dem in Abschnitt 4.1 aufgezeigten technischen und konzeptuellen Lösungsraum sinnvolle Kombinationen gebildet und geeignete Hardwarekonzepte abgeleitet werden.

4.3.1 Aufbau eines morphologischen Kastens

Um den Lösungsraum systematisch zu eröffnen, soll eine Methode zur strukturierten Ideenfindung angewandt werden. Hierfür eignet sich laut Lindemann [66, S. 160] der Einsatz eines morphologischen Kastens nach Zwicky [219], der ein eindimensionales Ordnungsschema darstellt. Dieses Vorgehen systematisiert den Erfindungsprozess [219, S. 115] und ermöglicht ein vorurteilsloses Identifizieren aller Lösungen für ein gegebenes Problem [219, S. 114].

Der morphologische Kasten wird nach der VDI Richtlinie 2222 Blatt 1 zur methodischen Entwicklung von Lösungsprinzipien gebildet [220], die auf dem Werk von Zwicky [219] aufbaut. Hierfür werden die Eigenschaften und deren mögliche Ausprägungen in eine Matrix eingetragen. Jede Zeile steht für eine technische Eigenschaft, während in den Spalten dieser Zeile mögliche Ausprägungen eingetragen werden [220, S. 19]. Zunächst werden die bestimmenden Eigenschaften definiert [221, S. 373]. Die Ausprägungen sollten auf ihre Verträglichkeit geprüft werden [221, S. 374]. Der resultierende morphologische Kasten ist in Abbildung 4.14 abgebildet.



Abbildung 4.14: Nach VDI Richtlinie 2222 Blatt 1 [220] und Zwicky [219] aufgebauter morphologischer Kasten mit Eigenschaften und deren mögliche Ausprägungen für Bedienhardwarekonzepte

Als erste Eigenschaft wird die grundlegende Modalität festgelegt. Im zweiten Schritt wird die Art der Fühlhilfe zum Auffinden der Bedienelemente ohne Blickabwendung festgelegt, was insbesondere für berührungssensitive Modalitäten relevant ist. Hierbei werden statische und dynamische Fühlhilfen als zwei Eigenschaften angelegt, weil diese sich technisch nicht ausschließen. Da aus konzeptueller Sicht die Kombination beider Arten von Fühlhilfen keinen Mehrwert bietet, erhalten diese Eigenschaften die Ausprägung „ohne“ als Option. Weiter wird bei auf Hubtasten basierenden Konzepten auf eine Fühlhilfe verzichtet, weil durch das Grundprinzip physischer Tasten eine gute blinde Auffindbarkeit gegeben ist. Zuletzt wird die Art des haptischen Feedbacks bei Betätigung aufgenommen. Um die auf dem Markt erhältlichen Lösungen abbilden zu können, wird erneut die Ausprägung „ohne“ eingeführt. Bei auf Hubtastern basierenden Konzepten wird hier stets passives haptisches Feedback gewählt, weil dies ein Grundbestandteil des Funktionsprinzips ist.

4.3.2 Abgeleitete Hardwarekonzepte

Der im vorangegangenen Kapitel aufgestellte morphologische Kasten wird zur systematischen Generierung von Hardwarekonzepten eingesetzt. Hierfür wird pro Eigenschaft eine Ausprägung ausgewählt und mit Ausprägungen der darauffolgenden Eigenschaften kombiniert. Bei der Kombination werden miteinander unverträgliche Teillösungen ausgeschlossen, um den Lösungsraum zu beschränken [220, S. 11]. Durch dieses Vorgehen werden 14 mögliche Hardwarekonzepte abgeleitet. Der ausgefüllte morphologische Kasten kann Abbildung B.1 und die resultierenden Eigenschaften der Konzepte der Tabelle B.2 im Anhang entnommen werden. Die abgeleiteten Hardwarekonzepte werden im nächsten Schritt durch Fachexperten bewertet.

4.4 Expertenbewertung der Hardwarekonzepte

Analog zum Vorgehen nach Lindemann werden die durch den morphologischen Kasten identifizierten Lösungen unter Einbezug eines Teams aus Fachexperten bewertet [66, S. 149].

4.4.1 Identifikation und Gewichtung der Bewertungsgrößen

Gemäß Schweizer ist zunächst die Zielsetzung zu definieren, um anschließend diese mit geeigneten Kriterien abzudecken [222, S. 172]. Im vorliegenden Teilschritt wird die Zielsetzung anhand der in Kapitel 4.2 aufgestellten Forschungsfrage definiert: Die Auswahl von Hardwarekonzepten, die sich für eine kontextadaptive Funktionsanzeige im Lkw eignen.

Im nächsten Teilschritt sollen die Bewertungskriterien identifiziert werden, wobei nach Schweizer [222] der Grad der Zielerreichung bezüglich relevanter Aspekte zu formulieren ist [222, S. 172]. Hierfür werden Interviews mit $N = 7$ Entscheidungsträgern eines Nutzfahrzeugherstellers geführt. Die Auswahl der Experten verfolgt das Ziel, dass Stakeholder aus den relevanten Teilbereichen Design, Engineering, Ergonomie, Sales und Produktstrategie vertreten sind. Die Experten nennen die aus Sicht ihres Fachbereichs wichtigsten Entscheidungsfaktoren bei der Auswahl eines Hardwarekonzepts zur Bedienung von Fahrzeugfunktionen. Jedes genannte Kriterium wird in Kombination mit einer Beschreibung protokolliert, um eine spätere Bewertung zu ermöglichen. Die resultierenden 18 Kriterien sind Tabelle B.1 im Anhang zu entnehmen.

Die identifizierten Bewertungskriterien werden, wie von Lindemann [66] empfohlen, im nächsten Schritt nach deren Bedeutsamkeit gewichtet [66, S. 142]. Nach Schweizer [222] können Kriterien gewichtet werden, um Aspekte, die für den Erfolg des Produkts ausschlaggebend sind, bei der Lösungsfindung höher zu priorisieren [222, S. 173-175]. Hierfür bewerten die Stakeholder in einem moderierten Folgegespräch die aufgestellten Kriterien hinsichtlich deren Relevanz bei der Entwicklung einer MMS für den Einsatz im Nutzfahrzeug. Dies erfolgt anhand einer Skala von 1 (irrelevant) bis 10 (sehr wichtig). Es wird darauf hingewiesen, das Kriterium der eigenen Fachrichtung gleich mit denen anderer Bereiche zu behandeln, um Verzerrungen zugunsten der eigenen Interessen zu vermeiden. Anschließend werden Mittelwerte über die sieben Einzelbewertungen der Fachbereiche über alle 18 Kriterien hinweg gebildet. Die resultierende Gewichtung ist Tabelle B.1 im Anhang zu entnehmen.

4.4.2 Bewertung der Hardwarekonzepte

Im nächsten Schritt sollen die in Abschnitt 4.4.1 identifizierten Kriterien zur Bewertung herangezogen werden. Als Bewertungsmethode eignet sich nach Lindemann eine gewichtete Punktebewertung [66, S. 203]. Wulf schlägt bei der Priorisierung von Lösungsansätzen eine Bewertung der Kriterien und eine anschließende Multiplikation mit dem Gewichtungsfaktor vor [223, S. 92]. Anschließend kann über alle Kriterien hinweg eine Summe gebildet werden. Im letzten Schritt werden die Lösungen absteigend in eine Rangreihenfolge gebracht. Der Lösung mit der höchsten Punktzahl ist die höchste Zielerreichung zuzuschreiben.

Die in Abschnitt 4.3.2 identifizierten Hardwarekonzepte sollen anhand der im vorangegangenen Abschnitt 4.4.1 definierten und gewichteten Kriterien bewertet werden. Hierfür kommt ein Punktesystem zur Anwendung, das dem Prinzip einer höheren Bewertung bei einer höheren Erfüllung des Teilaspekts folgt [222, S. 176]. Die Abstufung der Bewertungsskala kann frei gewählt werden, muss jedoch für alle Kriterien konsistent sein [222, S. 177]. Schweizer schlägt eine Abstufung von 1-10 vor [222, S. 177], das um Adjektive erweitert wurde und Abbildung B.2 im Anhang entnommen werden kann.

Im Folgenden werden $N = 10$ Fachexperten für die jeweiligen Bewertungskriterien identifiziert. Neun der Experten sind bei einem Nutzfahrzeughersteller, einer bei einem Pkw-Hersteller

beschäftigt. Diese zeichnen sich durch langjährige Expertise in den Bereichen Engineering, Ergonomie, Sales, Design, Fahrversuch, Innovationsmanagement und Einkauf aus.

Die drei Konzepte mit der höchsten Bewertung durch die Experten sind in Abbildung 4.15 zu sehen und werden weiterverfolgt. Die Eigenschaften können Tabelle B.2 und die detaillierte Bewertungsmatrix und Ergebnisse aller Hardwarekonzepte Abbildung B.3 im Anhang entnommen werden.



Hardwarekonzept	Taster 1	Taster 2	Touch 3
Punktzahl	826.00	835.14	840.00
Platzierung	3	2	1

Abbildung 4.15: Die drei in Folge der Expertenbewertung höchstplatzierten Hardwarekonzepte

Basierend auf den Ergebnissen weist Hardwarekonzept Touch 3 die höchste Zielerreichung für die dynamische Funktionsanzeige im Nutzfahrzeug auf. Jedoch liegen die Punktzahlen der drei höchstplatzierten Hardwarekonzepte in einem vergleichbaren Wertenniveau. Deshalb wird Lindemanns [66] Rat befolgt, der wie folgt lautet:

„Entscheidungen treffen heißt, sich bewusst oder unbewusst zwischen Alternativen zu entscheiden. Dabei muss man sich jedoch nicht zwangsläufig auf eine Lösung festlegen. In Abhängigkeit von der Entscheidungssituation können auch mehrere oder keine Alternative ausgewählt werden“ [66, S. 185].

Weiter ist die Aussagekraft einer rein expertenbasierten Bewertung eingeschränkt. Da es sich um ein Produkt für Endanwender handelt, ist stets eine Einbeziehung der Nutzergruppe in den Entscheidungsprozess von Vorteil [64, S. 2]. Es werden folglich die drei in Abbildung 4.15 dargestellten Hardwarekonzepte weiterverfolgt und im nächsten Schritt unter Einbezug der anvisierten Nutzergruppe auf Unterschiede untersucht.

4.5 Evaluation in Fahrstudie

Dieses Kapitel beruht auf einer betreuten Studienarbeit [224] sowie der Veröffentlichung Schölkopf et al. [60], auf die für detailliertere Informationen verwiesen wird.

4.5.1 Fragestellung und Hypothesen

Im Nutzfahrzeug steht insbesondere die Sicherheit im Vordergrund, weil ein Unfall aufgrund der hohen Fahrzeugmasse schwerwiegende Folgen haben kann. Folglich sollte bei der Einführung einer neuen Bedienhardware deren Vereinbarkeit mit der Fahraufgabe geprüft werden. Unter dem Überbegriff der Sicherheit soll deshalb der Einfluss der Hardwarekonzepte auf die Fahrgüte, die Bedienzeit sowie die visuelle Ablenkung von der Fahraufgabe geprüft werden. Weiter ist die Akzeptanz durch die anvisierte Nutzergruppe für den Erfolg einer neuen MMS entscheidend, insbesondere da Lkw-Fahrer die Kaufentscheidung beeinflussen [6, S. 12]. Zudem liegen keine Erkenntnisse aus dem Stand der Technik vor, die eine vergleichbare Akzeptanz der

Hardwarekonzepte implizieren würden. Daher soll geprüft werden, ob Lkw-Fahrer die Hardwarekonzepte in unterschiedlichem Maße akzeptieren.

Das touchbasierte Hardwarekonzept Touch 3 verfügt über Fühlstege zur blickarmen Lokalisierung der Bedienelemente und haptisches Feedback bei der Betätigung. Erkenntnisse zur Wirksamkeit dieser technischen Maßnahmen im Nutzfahrzeugsektor liegen bislang noch nicht vor. Deshalb soll geprüft werden, ob bei der Bedienung des Hardwarekonzepts Touch 3 Unterschiede in der Bedienung verglichen mit den Konzepten Taster 1 und Taster 3 auftreten. Entsprechend werden die Forschungsfragen ungerichtet formuliert und auf eine Differenz zwischen den Konzepten getestet.

Zugunsten einer besseren Lesbarkeit werden im Folgenden nur die Alternativhypothesen genannt, die jeweils von einem Gruppenunterschied für das verglichene Maß ausgehen.

Forschungsfrage 1: Sicherheit während der Fahrt

Ein wesentliches Kriterium für den Einsatz im Nutzfahrzeug ist die Bediensicherheit. Hierunter werden die visuelle Ablenkung und die Fahrgüte in Form ungerichteter Hypothesen auf Unterschiede untersucht. Die zugehörige Forschungsfrage 1 (F1) lautet:

„Unterscheiden sich die Hardwarekonzepte in Bezug auf ihre Sicherheit während der Fahrt?“

Zur Überprüfung von F1 werden vier Hypothesen aufgestellt. H1 und H2 haben zum Ziel, mögliche Differenzen hinsichtlich der visuellen Ablenkung aufzudecken und lauten wie folgt:

- **H1_A**: Die durchschnittliche Anzahl der kritischen Blicke auf die Bedienmodalität liegt bei den Hardwarekonzepten auf unterschiedlichen Wertenniveaus.
- **H2_A**: Die mittlere Blickdauer auf die Bedienmodalität liegt bei den Hardwarekonzepten auf unterschiedlichen Wertenniveaus.

H3 wird aufgestellt, um den Einfluss der Bedienung der Hardwarekonzepte auf die Erfüllung der Fahrgüte zu untersuchen:

- **H3_A**: Die SDLP liegt bei der Benutzung der Hardwarekonzepte auf unterschiedlichen Wertenniveaus.

H4 wird aufgestellt, um Differenzen bei der Bedienung der Hardwarekonzepte hinsichtlich der Bedienzeiten zu untersuchen:

- **H4_A**: Die mittlere Bedienzeit liegt bei der Benutzung der Hardwarekonzepte auf unterschiedlichen Wertenniveaus.

Forschungsfrage 2: Akzeptanz

Für die erfolgreiche Einführung neuer Systeme wird empfohlen, die Akzeptanz durch die Nutzergruppe zu berücksichtigen. Die Nutzerakzeptanz wird anhand von Forschungsfrage 2 (F2) auf Differenzen untersucht:

„Unterscheiden sich die Hardwarekonzepte in Bezug auf die Akzeptanz durch die anvisierte Nutzergruppe?“

Zur Überprüfung von F2 werden zwei ungerichtete Hypothesen aufgestellt. H5 und H6 haben zum Ziel, die Unterdimensionen der Akzeptanz nach Van der Laan et al. [96] zu vergleichen und lauten wie folgt:

- **H5_A**: Die wahrgenommene Nützlichkeit der Hardwarekonzepte liegt auf unterschiedlichen Werteneiveaus.
- **H6_A**: Die wahrgenommene Zufriedenheit der Hardwarekonzepte liegt auf unterschiedlichen Werteneiveaus.

4.5.2 Versuchsdesign und Versuchsablauf

Die von Hofauer [73], Richardson [72], Seitz [8] und Fank [71] durchgeführten Fahrsimulatorstudien zeigen, dass bei Untersuchungen mit Lkw-Fahrern als Probanden eine Stichprobengröße im Bereich von 32 bis 38 Probanden liegt und entsprechend eingeschränkt ist. Weiter findet der Versuch unter Pandemiebedingungen statt, wodurch eine geringere Bereitschaft einer Versuchsteilnahme vor Ort erwartet wird. Aufgrund des folglich geringen zu erwartenden Stichprobenumfangs wird zugunsten einer erhöhten Teststärke entschieden, ein messwiederholtes Versuchsdesign anzuwenden [225, S. 394-395]. Dieses deckt zudem systematische Varianzen der Werte leichter auf [225, S. 394-395]. Untersuchungsgegenstand sind die drei Hardwarekonzepte, die hinsichtlich mehrerer abhängiger Variablen verglichen werden sollen. Folglich liegen drei Faktorstufen vor, und es wird ein messwiederholtes (within-subject) Versuchsdesign mit drei Faktorstufen angewandt. Dieses Vorgehen hat zum Nachteil, dass systematische Reihenfolgeeffekte auftreten können, etwa durch Ermüdung. Um diesen entgegenzuwirken [143, S. 184], wird durch eine Permutation systematisch variiert, in welcher Reihenfolge die Probanden die Hardwarekonzepte erleben. Der Ablauf der Studie sowie das messwiederholte Versuchsdesign kann Abbildung 4.16 entnommen werden.



Abbildung 4.16: Ablauf des Fahrsimulatorversuchs mit messwiederholtem Versuchsdesign

Der Versuch beginnt mit einer Vorbefragung, die zur Erfassung demografischer Daten dient. Es schließt sich eine Eingewöhnungsfahrt an, in deren Rahmen die Messtechnik kalibriert wird und die Probanden sich mit dem Fahrsimulator vertraut machen. Es folgen drei Versuchsfahrten mit den drei Hardwarekonzepten. Zu Beginn jeder Fahrt besteht die Gelegenheit, sich mit dem Hardwarekonzept im Rahmen einer freien Exploration im Stand vertraut zu machen. Anschließend wird die eigentliche Versuchsfahrt gestartet, während welcher die Probanden fünf für den Arbeitsalltag eines Lkw-Fahrers repräsentative Szenen durchfahren. Währenddessen bekommen sie insgesamt 23 Bedienaufgaben gestellt, die sie durch eine Bedienung der jeweils verbauten MMS erfüllen. Es folgt eine Nachbefragung, bei der standardisierte Fragebögen zum Einsatz

kommen. Aufgrund der Messwiederholung wird die Exploration, Versuchsfahrt sowie Nachbefragung für alle drei Hardwarekonzepte wiederholt.

4.5.3 Versuchsaufbau

Im Folgenden wird der im Rahmen der Studie verwendete Versuchsaufbau, bestehend aus Simulationsumgebung und Prototypen, beschrieben.

Lkw-Fahrsimulator

Die Studie wird in einem statischen Lkw-Fahrsimulator der MAN Truck & Bus SE durchgeführt, der über Lkw-spezifische Bedienelemente wie Lenkrad, Pedalerie sowie einen über Luftdruck angesteuerten Sitz verfügt, wie in Abbildung 4.17 zu sehen. Der Simulator verfügt über eine immersive Sichtsimulation über drei Projektoren und zwei LCD-Displays zur Anzeige der Rückspiegel. Die Simulation des Umfelds, der Strecken sowie des Verkehrs erfolgt über die Simulationssoftware Silab in der Version 6.5.



Abbildung 4.17: Für den Versuch eingesetzter statischer Lkw-Fahrsimulator der MAN Truck & Bus SE

Der Simulator verfügt über ein im Bereich des Hauptbedienfeldes verbauten Kugelkopf mit Wechselplatte, wodurch ein zügiges Auswechseln der Hardwarekonzepte bei gleichbleibender Verortung möglich ist.

Prototypische Umsetzung der Hardwarekonzepte

Um eine Erlebbarkeit der Hardwarekonzepte zu ermöglichen, werden drei interaktive Prototypen aufgebaut (Abbildung 4.18).

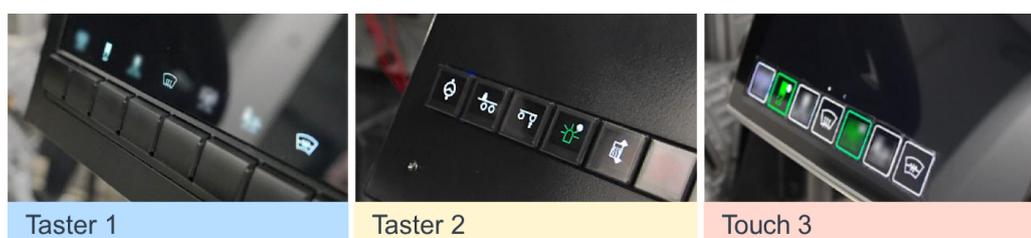


Abbildung 4.18: Für den Versuch prototypisch aufgebaute Hardwarekonzepte mit einheitlichem Interaktionskonzept [60, S. 19]

Da die Anzahl der gleichzeitig angezeigten Bedienelemente sowie das User Interface einen Einfluss auf die Interaktion haben [226, S. 1011], wird für alle drei Prototypen ein einheitliches

rudimentäres Interaktionskonzept gestaltet. Dieses zeigt dem Nutzer sieben Bedienelemente abhängig von der aktuellen Fahrszene an. Bei den Konzepten Taster 1 und Taster 2 kann über eine achte Taste in eine zweite Ebene mit Bedienelementen gewechselt werden, bei dem berührungsempfindlichen Konzept Touch 3 geschieht dies durch eine horizontale Wischgeste.

4.5.4 Datenerhebung

Die für Forschungsfrage 1 relevanten Fahrdaten werden durch die Simulationsumgebung Silab aufgezeichnet. Die Blickdaten werden mithilfe von vier Infrarotkameras, sechs Infrarotleuchten und der Eyetracking Software Smart Eye in Version 8 ausgewertet. Alle Nutzereingaben der drei Hardwareprototypen werden registriert, via CAN-Netzwerk an Silab gesendet und dort zeitsynchron mit den Fahrdaten gespeichert. Zwei Kameras zeichnen das Verhalten der Fahrer sowie deren Interaktion mit den zu bedienenden Prototypen auf, um Fehlbedienungen retrospektiv auswerten zu können. Die Akzeptanz wird anhand standardisierter Fragebögen nach Van der Laan et al. [96] erfasst.

4.5.5 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der deskriptiven und statistischen Auswertung berichtet. Das Signifikanzniveau wird auf den im Forschungsgebiet der Mensch-Maschine-Interaktion gängigen Wert von $\alpha = 0,05$ festgelegt, den Bortz und Döring [143] als konventionelles Niveau nennen [143, S. 27-28].

Stichprobenbeschreibung

Für die Untersuchung werden Probanden mit einem gültigen Führerschein der Klasse C oder CE eingeladen, woraufhin $N = 23$ Lkw-Fahrer an der Studie teilnehmen. Die Stichprobe besteht aus einer Lkw-Fahrerin sowie 22 männlichen Teilnehmern und weist ein durchschnittliches Alter von 44 (SD = 12,22) Jahren auf. Bei der Auswertung der Blickdaten muss aufgrund unzureichender Qualitätsparameter das auszuwertende Datenset auf $N = 15$ Probanden beschränkt werden, worunter eine weibliche FahrerIn fällt und das mittlere Alter mit 42,6 (SD = 11,79) Jahren etwas geringer ausfällt. Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Beantwortung der Forschungsfragen 1 und 2 aufgestellten Hypothesen mittels inferenzstatistischer Verfahren dargelegt.

Forschungsfrage 1: Sicherheit während der Fahrt

Die deskriptive Statistik der für Hypothesen H1-H4 relevanten Messgrößen ist Tabelle B.3 im Anhang zu entnehmen. Nach Gruppen aufgeteilte Boxplots derselben Messgrößen sind in Abbildung 4.19 dargestellt. Die Überprüfung der Voraussetzungen für eine parametrische Varianzanalyse ergibt, dass diese verletzt sind [60, S. 19]. Zur Überprüfung der Hypothesen H1-H4 werden daher Friedman-Tests für abhängige Stichproben durchgeführt. Diese stellen nach Field et al. [225, S. 686-688] eine nichtparametrische Alternative dar. Bei signifikanten Ergebnissen wird ein Conover Post-Hoc Test mit Bonferroni-Holm Korrektur [225, 430–431] des Signifikanzniveaus durchgeführt, um Unterschiede zwischen den Gruppen zu identifizieren.

Für die Anzahl der kritischen Blicke werden Fixationen des Bedienteils mit einer Länge von über zwei Sekunden [79, S. 24821] gezählt. Die Durchführung eines Friedman-Tests ergibt keinen

signifikanten Einfluss des Hardwarekonzepts auf die Anzahl der kritischen Blicke ($\chi^2(2) = 2,327$ und $p = 0,312$). Die Nullhypothese $H1_0$ wird nicht verworfen.

Die Auswertung für die mittlere Blickzuwendungszeit auf das Bedienteil zeigt mit $\chi^2(2) = 6,533$ und $p = 0,038$ signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen an. Der paarweise Vergleich mittels Conover Post-Hoc Test ergibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Aufgrund der zuvor identifizierten signifikanten Gruppenunterschiede wird beschlossen, $H2_A$ anzunehmen.

Eine Überprüfung des Einflusses der Hardwarekonzepte auf die SDLP mittels Friedman-Test zeigt signifikante Unterschiede an ($\chi^2(2) = 8,435$ und $p = 0,015$). Der nachfolgend durchgeführte Conover Post-Hoc Test ergibt signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen Taster 1 und Touch 3 ($z = 2,801$ und $p_{Holm} = 0,023$). Es wird $H3_A$ angenommen und von Gruppendifferenzen ausgegangen.

Die Auswertung der mittleren Bedienzeit mittels Friedman-Test weist auf signifikante Differenzen hin ($\chi^2(2) = 11,565$ und $p = 0,003$). Der paarweise Vergleich mittels Conover Post-Hoc Test belegt signifikante Unterschiede zwischen Taster 1 und Touch 3 ($z = 4,193$ und $p_{Holm} < 0,001$) sowie Taster 2 und Touch 3 ($z = 5,367$, $p_{Holm} < 0,001$). Auffällig ist, dass ein hoher Einzelwert in der Gruppe Touch 3 den Mittelwert stark beeinflusst. Es wird die Alternativhypothese $H4_A$ angenommen.

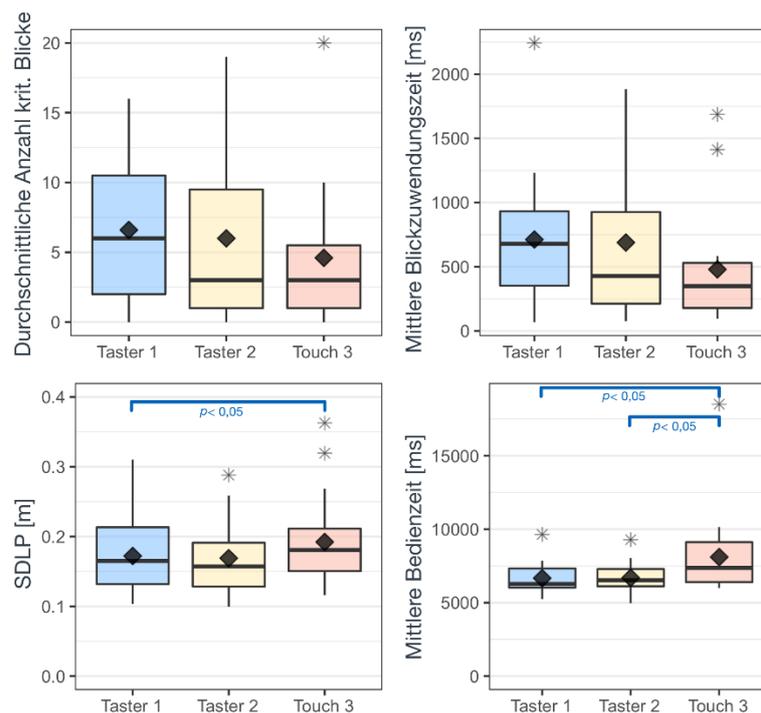


Abbildung 4.19: Boxplot der für Fragestellung 1 relevanten Metriken mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert, signifikanten Gruppenunterschieden und als Sternchen markierten Ausreißern nach [60, S. 20]

Basierend auf der inferenzstatistischen Analyse kann für $H1$ die Nullhypothese $H1_0$ nicht verworfen werden. Für die Hypothesen $H2-4$ werden die Alternativhypothesen angenommen. Somit werden bei 3 von 4 Hypothesen Differenzen gefunden, jedoch zugunsten unterschiedlicher Hardwarekonzepte.

Eine explorative Analyse der Videoaufnahmen ergibt, dass bei Konzept Taster 1 lediglich 4 Bedienfehler, bei Taster 2 hingegen 19 und 103 bei Touch 3 zu beobachten waren. Bei letzterem Konzept waren die Fehler beim Wechsel zwischen Bedienebene 1 und 2 mittels Wischgeste zu beobachten.

Forschungsfrage 2: Akzeptanz

Die für die Beantwortung von Forschungsfrage 2 relevante deskriptive Statistik ist Tabelle B.4 im Anhang zu entnehmen. Boxplots der beiden Skalen der Nutzerakzeptanz sind in Abbildung 4.20 dargestellt. Weil die Voraussetzungen einer Varianzanalyse mit Messwiederholung für beide betrachtete Maße verletzt sind [60, S. 21], werden analog zum Vorgehen bei Forschungsfrage 1 nichtparametrische Tests gerechnet. Es werden zwei Friedman-Tests gerechnet. Es wird weder bei der bewerteten Nützlichkeit ($\chi^2(2) = 0,080$ und $p = 0,961$) noch der Zufriedenheit ($\chi^2(2) = 2,164$ und $p = 0,339$) ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen festgestellt. Basierend auf der inferenzstatistischen Analyse werden die Nullhypothesen H_{5_0} und H_{6_0} nicht verworfen.

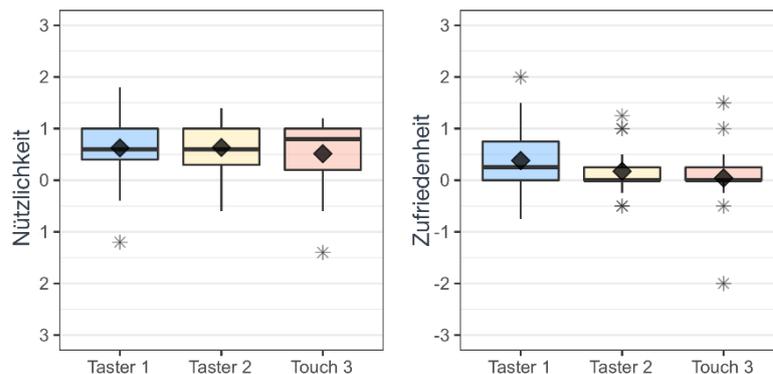


Abbildung 4.20: Boxplot für die Erfassung der Akzeptanz über die Nützlichkeit und Zufriedenheit nach Van der Laan et al. [96] mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern nach [60, S. 21]

4.5.6 Diskussion der Studie

In der vorliegenden Nutzerstudie wurde untersucht, ob sich die drei Hardwarebedienkonzepte hinsichtlich der Sicherheit während der Fahrt sowie der Akzeptanz durch die Nutzergruppe unterscheiden. Mangels übertragbarer Studienergebnisse wurde auf Unterschiede anhand ungerichteter Hypothesen geprüft. Aufgrund der signifikanten Unterschiede hinsichtlich der in Form von SDLP quantifizierten Fahrgüte, der mittleren Blickzuwendungszeit sowie mittleren Bedienzeit ist von Unterschieden bei der Sicherheit auszugehen. Die Unterschiede fallen zugunsten unterschiedlicher Hardwarekonzepte aus: Folglich ist festzustellen, dass jedes der drei Konzepte individuelle Vor- und Nachteile aufweist.

Bei der Interpretation der vorliegenden Ergebnisse sind die Limitationen der Studie zu berücksichtigen. So traten während der Bedienung des Konzepts Touch 3 viele Bedienfehler bei dem Seitenwechsel von der ersten in die zweite Funktionsebene auf. Eine explorative Analyse des aufgezeichneten Videomaterials identifizierte die Wischgeste als Fehlerquelle, weil es hierbei zu unbeabsichtigten Funktionsbetätigungen kam. Die Korrektur dieser Fehlbedienungen könnte zu der signifikant erhöhten Bedienzeit und damit in Konsequenz erhöhten SDLP geführt haben.

Folglich sollte diese Form der Interaktion durch eine Schaltfläche ersetzt werden, worüber die Seite gewechselt wird. Ein weiteres Argument für diese Theorie ist, dass das berührungsempfindliche Konzept Touch 3 hinsichtlich der visuellen Ablenkung mit den physischen Konzepten Taster 1 und 2 gleichauf liegt. Weiter liegen die deskriptiven Werte für die Anzahl der kritischen Blicke und die mittlere Blickzuwendungszeit für das Konzept Touch 3 auf dem niedrigsten Wertenniveau. Aufgrund der konservativen Korrektur der Post-Hoc Analyse lassen sich keine signifikanten Gruppenunterschiede interpretieren, jedoch deutet die inferenzstatistische Analyse an, dass bei größeren Stichprobenumfängen ein signifikanter Unterschied zwischen Touch 3 und Taster 1 Zustände kommen könnte.

Die von Zhao et al. [177] gefundenen Defizite bezüglich einer hohen visuellen Ablenkung durch ein touchbasiertes Bedienteil ohne Feedback verglichen mit physischen Tastern [177, S. 11-12] konnten nicht festgestellt werden. Daraus lässt sich schließen, dass die Optimierung des berührungsempfindlichen Konzepts gemäß der in Abschnitt 4.1.2 diskutierten technischen Maßnahmen erfolgreich war. Die vorliegende Studie konnte somit keine Unterschiede in der Blindbedienbarkeit zwischen physischen Bedienteilen und einem haptisch optimierten Touchscreen feststellen. Es ist jedoch eine Validierung in Folgestudien unter Einsatz einer größeren Stichprobe und Äquivalenztests zu empfehlen.

Im Rahmen von Forschungsfrage 2 konnte die vorliegende Studie keine Unterschiede bezüglich der Akzeptanz der drei untersuchten Konzepte durch die anvisierte Nutzergruppe aufzeigen. Eine Analyse der deskriptiven Werte zeigt, dass das Konzept Touch 3 die niedrigsten Mittelwerte für die wahrgenommene Nützlichkeit und Zufriedenheit aufweist. Zudem könnte diese Tendenz auf die Fehlbedienungen zurückzuführen sein, weil diese das Probandenkollektiv möglicherweise frustriert und dementsprechend ihre Bewertung des Konzepts beeinflusst haben könnte.

Bei den Hypothesen H1, H5 und H6 wurden mit dem vorliegenden Studiendesign sowie der Stichprobe keine signifikanten Differenzen zwischen den drei Konzepten gefunden. Der Rückschluss, dass somit definitiv kein Effekt besteht, ist nicht zulässig [227, S. 918]. Dass ein Effekt existiert, kann nicht ausgeschlossen werden, nur weil in einer Studie kein Effekt gefunden wurde [228, S. 485]. Für den Nachweis, dass für ein Maß tatsächlich kein Unterschied zwischen den Konzepten besteht, müsste ein Test auf Gleichheit erfolgen. Folgestudien sollten daher unter Einsatz von Äquivalenztests durchgeführt werden, die von Lakens empfohlen werden [229, S. 355]. Dieser statistische Test auf Gleichheit der Hardwarekonzepte sollte unter Einsatz eines größeren Stichprobenumfangs stattfinden. Zudem kann der Rückschluss auf die Gesamtpopulation angefochten werden. So besteht die vorliegende Stichprobe aus Lkw-Fahrern, die hinsichtlich demografischer Daten wie Alter und Geschlecht vergleichbare Eigenschaften aufweisen, wie sie in einer groß angelegten Querschnittstudie aus dem Jahr 2014 beschrieben werden [54, S. 36]. Dennoch ist einschränkend anzumerken, dass es sich bei freiwilligen Probanden einer Fahrsimulatorstudie nicht um die Grundgesamtheit der Population von Lkw-Fahrern handeln könnte [64, S. 2]. Folglich ist von einer Stichprobenverzerrung zugunsten an innovativer Technologie interessierter Probanden auszugehen. Die initial erwartete Stichprobengröße von 32-38 Lkw-Fahrern wurde aufgrund epidemischer Bedingungen zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung mit $N = 25$ Teilnehmern deutlich unterschritten. Dies könnte die Teststärke negativ beeinflusst haben. Weiter ist die Aussagekraft der Untersuchung aufgrund der örtlichen Selektion des Probandenkreises eingeschränkt und sollte in zukünftigen Studien validiert werden. Die vorliegende Studie wurde aufgrund ökonomischer und zeitlicher Restriktionen in einem statischen Fahrsimulator durchgeführt. Fortführende Studien sollten im Realfahrzeug durchgeführt werden, um Bewegungen in den schwingend gelagerten Fahrersitz zu induzieren,

weil dadurch der Fahrer relativ zum Cockpit vertikal bewegt wird [6, S. 14] und der Einfluss von Schwingungen auf die Interaktion mit den Hardwarekonzepten berücksichtigt wird.

4.6 Zusammenfassung und Diskussion

Es konnte in Kapitel 4.2 der Bedarf nach einer digitalen, jedoch bediensicheren und für den Einsatz im Nutzfahrzeug geeigneten Bedienhardware abgeleitet werden. Die durchgeführte Literaturrecherche zeigte, dass sich vier Kategorien direkter Bedienmodalitäten zur dynamischen Funktionsanzeige eignen: Touchscreens, kapazitive Tasten sowie physische Hubtasten mit integriertem oder räumlich nah verortetem Display. Weiter konnten basierend auf der Literaturrecherche Eigenschaften berührungsempfindlicher Bedienmodalitäten identifiziert werden, welche deren Eignung für den Einsatz im Nutzfahrzeug zweifelhaft erscheinen lässt. Jedoch konnten zahlreiche technologische Möglichkeiten zur Optimierung berührungssensitiver Bedienelemente hinsichtlich Blindbedienbarkeit und Bedienung unter Schwingung dargelegt werden. Die resultierende Fülle möglicher Bedienmodalitäten und technologischer Eigenschaften wurde in einen morphologischen Kasten überführt und unter dessen Einsatz strukturiert kombiniert.

Die Auswahl des weiter zu verfolgenden Hardwarekonzepts erfolgte in einem zweistufigen Verfahren. Eine Vorauswahl der 14 abgeleiteten Konzepte wurde unter Einsatz von Methoden zur systematischen Lösungsfindung getroffen. Zunächst wurden mit relevanten Stakeholdern Bewertungskriterien identifiziert und gewichtet, bevor die Konzepte von Fachexperten hinsichtlich der Kriterien bewertet wurden. Kernerkenntnis der Expertenbewertung ist die Identifikation von drei Hardwarekonzepten, die sich mit einer hohen Punktzahl von den restlichen elf Konzepten abheben und dementsprechend in besonderem Maße geeignet sind.

Die entscheidende Empfehlung, welches der Konzepte in den Folgeschritten zum Einsatz kommen soll, wurde unter Einbezug der anvisierten Nutzergruppe der Lkw-Fahrer getroffen. Während signifikante Unterschiede beobachtbar waren, fallen diese zugunsten unterschiedlicher Hardwarekonzepte aus. So fällt die sicherheitskritische Blickabwendung von der Fahraufgabe für das Konzept Touch 3 am niedrigsten aus, wohingegen die längsten Bedienzeiten und eine leicht verschlechterte Fahrgüte auftreten. Es wird argumentiert, dass die Hardwarekonzepte somit individuelle Vor- und Nachteile aufweisen, aufgrund der sich nicht drastisch voneinander unterscheidender Werteneiveaus jedoch vergleichbar geeignet für die Bedienung während der Fahrt im Nutzfahrzeug sind. Aufgrund dieser vergleichbaren Eignung wird argumentiert, dass die im Teilschritt der Expertenbewertung am besten abschneidende Hardwarelösung weiterverfolgt werden soll: Das Konzept Touch 3. Grund hierfür ist neben der höchsten Punktzahl der bereits im Pkw vorherrschende Trend zu berührungssensitiven Bedienmodalitäten, der sich durch Markteinführungen von Tesla [230] und Daimler Truck [53] im Nutzfahrzeugsektor abzeichnet. Daher ist davon auszugehen, dass auch Lkw-Fahrer in Zukunft die Erwartungshaltung an den Fahrerarbeitsplatz ihrer Nutzfahrzeuge haben, dass dieser mit Touchdisplays ausgestattet ist. Durch die Einführung haptischer Fühlhilfen und haptischem Feedback konnte die Blindbedienbarkeit auf ein mit physischen Tasten vergleichbares Werteneiveau angehoben werden, wie in der durchgeführten Fahrsimulatorstudie gezeigt werden konnte.

5 Konzeption und Evaluation des Interaktionskonzepts

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle wird neben der in Kapitel 4 hergeleiteten Bedienhardware vor allem durch das Interaktionskonzept definiert. Dieses soll im Folgenden durch ein nutzerzentriertes Vorgehen erarbeitet werden. Zunächst werden relevante Begriffe und Konstrukte anhand des Stands der Forschung dargelegt. Es folgt die Definition der Fragestellung dieses Kapitels und die Vorstellung des methodischen Vorgehens. Die einzelnen Schritte des Vorgehens werden anschließend berichtet und deren Ergebnisse diskutiert.

5.1 Stand der Forschung: Gestaltung von Interaktionskonzepten

Ein wesentliches Ziel bei der Gestaltung von Interaktionskonzepten im Fahrzeug ist das Erreichen einer hohen Gebrauchstauglichkeit. Das hierfür relevante Konstrukt des mentalen Modells wird nachfolgend erläutert, bevor mögliche Interaktionskonzepte sowie relevante Normen und Gestaltungsrichtlinien diskutiert werden. Unter dem Begriff Interaktionskonzept wird nachfolgend der vom Benutzer wahrnehmbare und softwareseitig umgesetzte Anteil der Mensch-Maschine-Schnittstelle verstanden. Nach Herczeg [231] kann auch von Bedienoberfläche oder Benutzungsoberfläche gesprochen werden [231, S. 200], im englischen Sprachgebrauch ist hingegen die Bezeichnung „Graphical User Interface“ (GUI) geläufig [146, S. 6].

5.1.1 Mentale Modelle

Dieses Teilkapitel basiert in Teilen auf der Veröffentlichung Schölkopf et al. [100].

Die Vorstellung des Nutzers von einem Sachverhalt, System oder Produkt wird in der Fachliteratur „mentales Modell“ (MM) genannt und wird nachfolgend definiert. Es folgen Erläuterungen zur Bildung der Modelle, Ansätze zur Erfassung sowie der Relevanz für MMS und adaptive Systeme.

Definition

Zu mentalen Modellen existieren zahlreiche Definitionen [232, S. 14], die oftmals als unspezifisch kritisiert werden [233, S. 170]. Trotz zahlreicher unterschiedlicher Definitionen kommt Schilling [232] zu dem Schluss, dass weitgehend Einigkeit bezüglich folgender Auffassung gilt: Es handelt sich um mehr oder weniger zutreffende interne Abbildungen der Nutzer, die diese sich von ihrer funktionalen Umgebung machen [232, S. 14]. Nach Vollrath et al. [234] kann

hierbei von der „Vorstellung des Nutzers vom System“ [234, S. 174] gesprochen werden, welche das Wissen über die möglichen eigenen Handlungsmöglichkeiten sowie ein Verständnis der Systemaktionen beinhaltet [234, S. 174]. Diese vereinfachte innere Abbildung der Realität bzw. die Vorstellung eines Systems werden als Modell bezeichnet. Cooper et al. [146] erweitern diese grundlegende Definition und fügen hinzu, dass die gebildeten Modelle meist die komplexe Realität vereinfachen [146, S. 30], weshalb sie als nützliche Fiktion bezeichnet werden können [235, S. 184]. Nach Norman [236] können MM zudem unvollständig und instabil sein [236, S. 8]. Folglich müssen sie als über die Zeit hinweg veränderbar und dynamisch angesehen werden [237, S. 565].

In der Literatur wird zwischen dem mentalen Modell des Nutzers eines Systems und dem mentalen Modell des Designers bzw. Entwickler des Systems unterschieden [236, S. 14]. Daraus ist ableitbar, dass es für ein Produkt kein allgemeingültiges MM gibt, sondern individuelle Unterschiede bezüglich der Vorstellung eines Systems und dessen Verhalten möglich sind. Diese Unterschiede sind durch die Art und Weise, wie mentale Modelle gebildet werden, erklärbar.

Bildung mentaler Modelle

Die Bildung eines neuen mentalen Modells ist anstrengend [238, S. 208]. Deshalb versuchen Nutzer bei der Interaktion mit neuartigen Systemen zunächst bestehende mentale Modelle zu übertragen [234, S. 173]. Die bereits bestehenden Modelle, die durch das Erleben ähnlicher Produkte gebildet wurden, werden auf Kompatibilität mit dem neuen System geprüft. Sind nur marginale Unterschiede vorhanden, wird ein bestehendes mentales Modell adaptiert und übernommen [238, S. 208]. Sollte die Bildung eines neuen mentalen Modells benötigt werden, so wird unter Einbezug bestehender Erfahrungen und Synthese der neuen Informationen ein MM aufgebaut [239, S. 122]. Hierbei haben interpersonelle Faktoren einen Einfluss, wie detailliert und korrekt das resultierende Modell das eigentliche System beschreibt. So haben etwa Vorkenntnisse mit ähnlichen Produkten [233, S. 184] oder die allgemeine Technikaffinität einer Person einen Einfluss auf die Bildung des Modells, woraus unterschiedliche Modelle resultieren können [240, S. 26]. Ergänzend hat das Produkt und seine Gestaltung einen maßgeblichen Einfluss auf die Bildung des mentalen Modells [241, S. 217], wie Abbildung 5.1 entnommen werden kann.

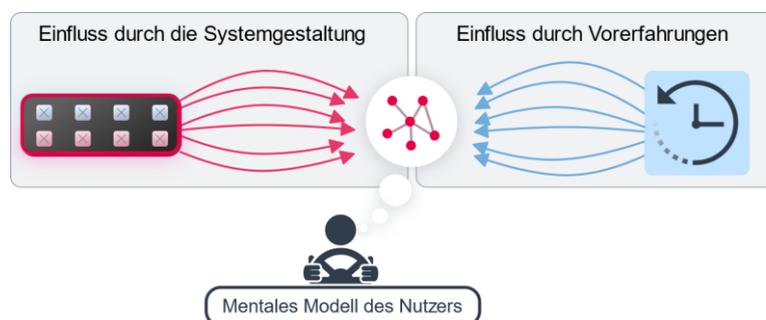


Abbildung 5.1: Wesentliche Einflussfaktoren auf die Bildung mentaler Modelle nach [100, S. 4]

Erfassung mentaler Modelle

Aus der Definition und dem Bildungsprozess mentaler Modelle wird abgeleitet, dass es sich um unstrukturierte und vage Vorstellungen der Nutzer vom System handelt, die oftmals nicht

außenstehenden Personen erklärt werden können. Die Messung eines solchen Konstrukts ist dementsprechend herausfordernd [236, S. 8]. Es existieren jedoch Ansätze, wie die Vorstellung eines Nutzers vom System messbar gemacht werden kann. So führt Schilling [232] zur Untersuchung mentaler Modelle von Fahrerinformationssystemen eine sogenannte „Think aloud“ Studie durch, bei welcher die Nutzer laut ihre Annahmen und Gedanken bezüglich des Systems äußern sollen [232, S. 81]. Ein Vorteil dieses Ansatzes ist, dass Rückfragen durch die Versuchsleitung und damit ein tiefes Verständnis vom mentalen Modell möglich sind.

Ein effizienterer Ansatz besteht aus der Konstruktion von Fragebögen. So vermag ein von Richardson et al. [242] erstellter Fragebogen die Korrektheit des mentalen Modells der Nutzer bezüglich automatisierter Fahrfunktionen zu prüfen. Beggatio und Krems [243] wählen einen vergleichbaren Ansatz, um das initiale mentale Modell der Nutzer von einem Adaptive Cruise Control System (ACC) mit dem nach der Benutzung gebildeten Modell zu vergleichen. Dass auch das MM bezüglich adaptiver MMS erfasst werden kann, zeigt ein von Lim et al. [118] erstellter Fragebogen, der analog zu Richardson et al. [242] sowie Beggatio und Krems [243] die Korrektheit des Modells anhand von Fragen prüft. Als Nachteil ist ein hoher Aufwand bei der Konstruktion sowie Validierung des Fragebogens zu nennen, insbesondere in Kombination mit der eingeschränkten Übertragbarkeit auf andere Systeme und Anwendungsfälle.

Relevanz mentaler Modelle in der Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen

Das mentale Modell des Nutzers beeinflusst die Performanz und somit die Effizienz der Interaktion [244, S. 175]. Eine falsche Vorstellung von einem System kann zu Fehlbedienungen, falschen Entscheidungen und im Extremfall fatalen Unfällen führen [245, 246]. Deshalb ist es für das Erreichen einer hohen Gebrauchstauglichkeit essenziell, dass sich ein zu bedienendes System so verhält und bedienen lässt, wie sich die Nutzergruppe es sich vorstellt [232, S. 14]. Nach Schilling [232] besteht Konsens darüber, dass mit einem System umso besser und effizienter interagiert werden kann, je höher die Übereinstimmung zwischen dem mentalen Modell des Benutzers und dem zu bedienenden Produkt ist [232, S. 14]. Nach Vollrath et al. [234] ist daher der Zustand eines optimalen mentalen Modells anzustreben, bei welchem der Nutzer jederzeit seine Handlungsmöglichkeiten kennt und versteht, wie das System aktuell agiert [234, S. 174]. Bei der Entwicklung einer MMS gilt es folglich bereits aus Vorerfahrungen mit ähnlichen Produkten bestehende mentale Modelle zu berücksichtigen. Wie dies im Entwicklungsprozess konkret umzusetzen ist, muss jedoch noch erörtert werden.

Weiter kann das mentale Modell durch die Gestaltung des Produkts bewusst beeinflusst werden [241, S. 217], etwa durch verschiedene Visualisierungen [244, S. 175], Metaphern [233, S. 181], Produktwerbung [240, S. 31] oder Systembeschreibungen [247, S. 216]. Norman [240] bezeichnet die Kombination aus den dem Nutzer verfügbaren Produktinformationen und dessen Eigenschaften als System Image [240, S. 31].

Mentale Modelle bezüglich adaptiver Systeme

Wie in Abschnitt 2.2.3 dargelegt, stellt eine mangelnde Erklärbarkeit sowie Nachvollziehbarkeit adaptiver MMS eine wesentliche Herausforderung dar. Der vorausgegangene Abschnitt legt dar, dass ein passendes mentales Modell für das Verständnis von Systemaktionen wichtig ist.

Insbesondere bei adaptiven Systemen sollte das mentale Modell der Nutzer berücksichtigt werden, wie Streitz [233] bereits in Ausführungen zu adaptiven Lernsystemen aus dem Jahr 1988 zeigt [233, S. 169-186]. So geben Rittger et al. [104] zu bedenken, dass ein noch so technisch aufwendiges System mit hoher maschineller Intelligenz keinen Mehrwert bietet, wenn der Nutzer das Systemverhalten nicht versteht und die MMS nicht bedienen kann [104, S. 20]. Die Autoren gehen davon aus, dass der Nutzer sein mentales Modell bezüglich der Adaptivität anhand von Erfahrungen mit dem System weiter aufbaut [104, S. 20]. Diese aufgebaute Vorstellung von der Fähigkeit des Systems muss nicht der tatsächlichen Implementierung entsprechen. So ist es etwa möglich, dass ein System trotz simpler technischer Umsetzung als besonders intelligent wahrgenommen wird, sowie andersherum [104, S. 20]. Weiter differenzieren die Nutzer nicht zwischen mehreren Funktionen im Fahrzeug, sondern gehen von einer zentralen Intelligenz des Fahrzeugs aus [104, S. 19]. Die Adaptivität sollte sich folglich über verschiedene Funktionsgruppen hinweg konsistent verhalten.

Während des Gestaltungs- und Entwicklungsprozesses adaptiver Systeme sollte daher das mentale Modell der Nutzergruppe berücksichtigt werden. Insbesondere bei der Einführung von Adaptivität in einen neuen Anwendungsfall ist es hilfreich abzufragen, wie die Nutzerschaft sich ein solches System vorstellt, um eine Diskrepanz zwischen der Erwartungshaltung und den Eigenschaften der MMS zu vermeiden. Weiter kann der Aufbau eines passenden Modells durch die Gestaltung der MMS unterstützt werden [104, S. 20]. Nach Wright et al. [248] sollte die MMS dem Nutzer das Systemverhalten erklären und eine korrekte Erwartungshaltung an die Adaption unterstützen [248, S. 4].

5.1.2 Relevante Normen und Gestaltungsrichtlinien

Dieses Teilkapitel basiert auf der Veröffentlichung Schölkopf et al. [99].

Bei der Gestaltung von Interaktionskonzepten dienen Gestaltungsrichtlinien als wichtige Grundlage, weil sie die Konsistenz erhöhen und bestimmte Interaktionsvorgänge über mehrere Produkte hinweg standardisieren [146, S. 318]. So gibt DIN EN ISO 9241 Teil 110 [81] anwendungsunabhängige Empfehlungen bezüglich Interaktionsprinzipien in der Mensch-Maschine-Interaktion. Die Norm enthält zum Beispiel 10 Prinzipien, die in der Produktentwicklung als Leitlinien verwendet werden können [81, S. 12]: Hierzu gehören die Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Erwartungskonformität, Erlernbarkeit, Steuerbarkeit, Robustheit gegen Benutzungsfehler und Benutzerbindung. ISO 9241 Teil 125 [249] enthält grundlegende Empfehlungen hinsichtlich der visuellen Informationsdarstellung sowie Barrierefreiheit von Interfaces. So unterstützt die Norm Produktgestalter beim Aufbau von Interaktionshierarchien, zeigt Ansätze zur Informationskodierung über Schrift, Form und Farbe und gibt Empfehlungen bezüglich der Farbgestaltung von Interfaces.

Neben Normen bietet die Fachliteratur weitere Gestaltungsrichtlinien, die vor allem in der Software Entwicklung Anwendung finden. So beschreiben Shneiderman et al. mit acht „goldenen Regeln“ [250, S. 95-97], wie interaktive Systeme umgesetzt werden sollten, um eine gute Gebrauchstauglichkeit zu erzielen. In Abgrenzung zu den verhältnismäßig allgemein formulierten Richtlinien von ISO 9241 Teil 110 [81] beinhalten die acht Regeln nach Shneiderman et al. [250] konkretere und direkt umsetzbare Vorschläge, wie etwa dem Nutzer nicht zuzumuten, sich mehr als sieben plus minus zwei Informationseinheiten merken zu müssen [250, S. 96]. Diese Empfehlung basiert auf der „Millerschen Zahl“, nach welcher die Leistung des menschlichen Kurzzeitgedächtnisses auf fünf bis neun Elemente beschränkt ist [145, S. 90]. Eine weitere Auflistung anzustrebender Eigenschaften von MMS bieten die zehn Usability Heuristiken nach

Jakob Nielsen [251]. Für detailliertere Gestaltungsempfehlungen wird empfohlen, Literatur aus dem jeweiligen Anwendungsgebiet zu konsolidieren. So finden sich beispielsweise für den Bereich mobiler Anwendungen sowie der Gestaltung von Websites detaillierte Handlungsempfehlungen, welche bis auf die Definition einzelner Komponenten wie dem Design von Schaltflächen, zu verwendender Schriftarten, Animationen oder Ikonographie heruntergebrochen werden. Verbreitete Informationsquellen stellen hierbei die „Human Interface Guidelines“ von Apple Inc. [252] sowie das von Google LLC veröffentlichte Designsystem „Material Design“ [253] dar. Zahlreiche der dort genannten Gestaltungshinweise basieren auf den allgemeinen Empfehlungen der Interaktionsgestaltung, die zu Beginn des Abschnitts eingeführt wurden.

In Bezug auf die Gestaltung von Interaktionskonzepten sind weitere Normen zu berücksichtigen, die ebenfalls auf den allgemeinen Empfehlungen der Interaktionsgestaltung beruhen, jedoch zusätzlich auf eine Vereinbarkeit mit der Ausführung der Fahraufgabe abzielen. Für den Einsatz in Fahrzeugen müssen MMS national geltenden Gesetzen vereinbar sein, in Deutschland etwa der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) [254]. Darüber hinaus geben Normen wie die ISO 15008 [255] vor, wie grundlegende Aspekte die Ablesbarkeit von Schriften durch einen ausreichenden Kontrast sowie passende Schriftgrößen gewährleistet werden kann. ISO 15005 [256] legt Prinzipien fest, wie dialogbasierte Fahrerinformationssysteme gestaltet werden sollten, sowie Prüfverfahren zur Feststellung der Konformität mit den aufgestellten Anforderungen. Die Priorisierung von Meldungen und Anzeigen bei simultan für den Fahrer bestimmten Informationen wird im SAE Standard J2395 [257] beschrieben mit dem Ziel, den Fahrer nicht durch ein zu hohes Maß an Informationen zu überfordern oder abzulenken. Generell ist festzuhalten, dass Bedienkonzepte im Fahrzeug nur benötigte Informationen präsentieren sollten, um den Fahrer nicht abzulenken [6, S. 18].

Bezüglich der Bedeutung von Normen und Richtlinien schränken Cooper et al. [146] ein, dass ein anhand von Standards entwickeltes Produkt nur so gut sein kann wie die einbezogenen Richtlinien [146, S. 317]. Sie schlagen deshalb vor, Richtlinien und Normen als Guidelines oder Daumenregeln zu betrachten und den Anwendungskontext sowie ein mögliches Nutzerverhalten zu berücksichtigen [146, S. 318].

5.2 Fragestellung und Vorgehen

Anhand des Stands der Forschung zu Interaktionskonzepten konnte dargelegt werden, dass mentalen Modellen bei der Entwicklung adaptiver MMS eine hohe Bedeutung beigemessen werden sollte. Es ist wichtig, dass das Bedienkonzept und die Eigenschaften der adaptiven MMS mit den Vorstellungen und Erwartungen der Nutzer übereinstimmen. Zudem wurden relevante Gestaltungsrichtlinien sowie Normen zur Gestaltung von Interaktionskonzepten allgemein sowie für die Interaktion während der Fahrt identifiziert.

In Kapitel 3 wurde die Adaptivität an den Kontext durch Arbeitsphasen definiert und die geeignete Hardware für die Umsetzung der MMS in Kapitel 4 bestimmt. Nun stellt sich die Frage, wie das Interaktionskonzept der adaptiven MMS unter Berücksichtigung der festgelegten Adaptivität und Bedienhardware zu gestalten ist. Die Forschungsfrage lautet demnach konkret:

„Wie sollte das Interaktionskonzept einer adaptiven MMS im Nutzfahrzeug gestaltet sein?“

Für die Beantwortung dieser Forschungsfrage wird zunächst ein Vorgehen erarbeitet, das in Abbildung 5.2 dargestellt ist.

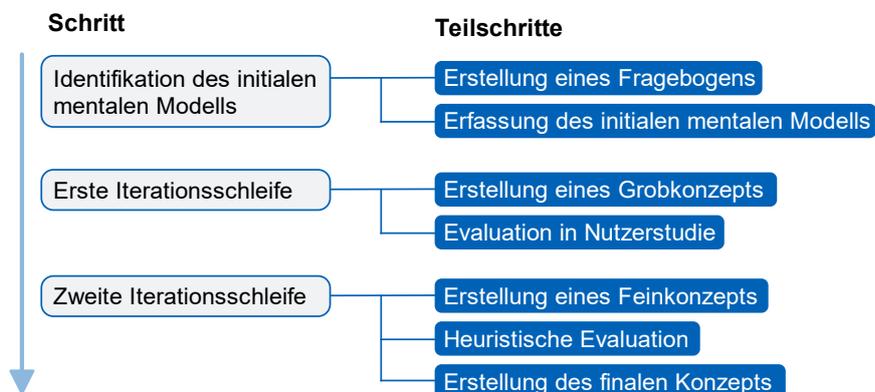


Abbildung 5.2: Gewähltes Vorgehen und zugehörige Schritte zur Erstellung des Interaktionskonzepts

Zunächst wird das initiale mentale Modell der Benutzergruppe identifiziert, damit dieses während des Gestaltungsprozesses berücksichtigt werden kann. Es folgen zwei Iterationen zur Konzeption und Gestaltung der grafischen Bedienoberfläche. In der ersten Iterationsschleife wird ein Grobkonzept des Interaktionskonzepts erstellt und evaluiert. Anhand der Erkenntnisse und identifizierten Verbesserungsvorschläge wird in der zweiten Iteration ein Feinkonzept erstellt, das durch eine heuristische Evaluation geprüft wird. Die identifizierten Verbesserungsvorschläge werden umgesetzt und fließen in das finale Interaktionskonzept ein.

5.3 Identifikation des initialen mentalen Modells

Dieses Kapitel basiert auf einer Abschlussarbeit [258] und der Veröffentlichung Schölkopf et al. [100], auf die für detaillierte Ausführungen verwiesen wird.

Wie in Abschnitt 5.1.1 dargelegt, ist eine möglichst hohe Überschneidung des mentalen Modells und der Produkteigenschaften anzustreben. Aus Sicht des Designers sollte bei der Gestaltung deswegen angestrebt werden, dass das System so funktioniert, wie die Nutzergruppe es sich vorstellt und erwartet [234, S. 173]. Dies ist insbesondere bei der Entwicklung adaptiver MMS relevant, weil Nutzer diesen gegenüber eine hohe Erwartungshaltung haben [120, S. 1]. Weiter ändert sich das System dynamisch, wodurch die Gefahr eines gefühlten Kontrollverlusts besteht [20, S. 317].

Ein adaptives MMS sollte sich nach Oppermann [109] daher so verhalten, wie es sich der Nutzer und nicht der Entwickler des Systems vorstellt [109, S. 5]. Andernfalls besteht die Gefahr, dass das MM des Nutzers nicht passt und Verwirrung entsteht. Es wird daher empfohlen, früh im Entwicklungsprozess zu explorieren, was für ein mentales Modell die Nutzergruppe von einer adaptiven MMS aufweist, um das System so zu gestalten, damit es diesem möglichst entspricht. Die Herausforderung besteht darin, das initiale mentale Modell und somit die Erwartungshaltung der Nutzergruppe hinsichtlich eines Produkts zu erfassen, mit dem noch nicht interagiert werden kann. Es fehlt zudem ein Vorgehen, wie das mentale Modell der Nutzergruppe bezüglich einer adaptiven MMS im Nutzfahrzeug erfasst werden kann. Ein Lösungsansatz hierfür soll nachfolgend aufgezeigt werden.

5.3.1 Entwicklung eines Fragebogens

Anhand der in Abschnitt 5.1.1 vorgestellten Arbeiten wird abgeleitet, dass es sich bei der Erfassung mentaler Modelle anhand eines Fragebogens um ein effizientes Messverfahren handelt. Folglich wird dieser Ansatz gewählt und ein auf den Anwendungsfall angepasster Fragebogen erstellt. Das Vorgehen zur Erstellung des Fragebogens kann Abbildung 5.3 entnommen werden.



Abbildung 5.3: Zweistufiges Vorgehen inklusive ausgeführter Teilschritte zur Erstellung des Fragebogens mit jeweiliger Anzahl an Aussagen bzw. Items nach [100, S. 7]

In der ersten Stufe des Vorgehens werden Fragebogenitems generiert, mit dem Ziel, möglichst alle relevanten Eigenschaften einer adaptiven MMS abzudecken. Dieses Vorgehen orientiert sich an den Arbeiten von Richardson et al. [242], Beggiano und Krems [243] sowie Rothhämel et al. [259]. Im Rahmen eines internen Workshops und zwei Revisionen der Items mit MMS- und Psychologieexperten werden die Items hinsichtlich Dopplung, inhaltlicher Sinnhaftigkeit und Verständlichkeit geprüft und angepasst. Bei der Erstellung wird auf eine an die Zielgruppe angepasste Formulierung der Items geachtet, die im Rahmen einer qualitativen Vorstudie mit der Zielgruppe überprüft wird.

Es folgt die Durchführung einer Online-Umfrage mit $N = 75$ Lkw-Fahrern, die über Online-Foren sowie auf einem Lkw-Parkplatz der Warenanlieferung eines Industrieunternehmens in Dachau akquiriert werden. Zu Beginn der Umfrage wird den Teilnehmern ein Video gezeigt, welches das Konzept einer adaptiven MMS abstrakt anhand beispielhafter Situationen vorstellt. Dabei wird verdeutlicht, dass in Abhängigkeit der aktuellen Fahrsituation derzeit benötigte Fahrzeugfunktionen eingeblendet werden. Anschließend werden die Lkw-Fahrer gebeten, ihre Vorstellung von den Eigenschaften des Systems anhand der aus dem ersten Schritt resultierenden Fragebogenitems zu bewerten. Die Bewertung geschieht über den Grad der Zustimmung mit den jeweiligen Items anhand einer Likert-Skala von 1 (stimme überhaupt nicht zu) bis 6 (stimme voll zu). Der resultierende Datensatz steht öffentlich zur Verfügung [260].

Im zweiten Schritt werden durch eine Faktorenanalyse die latenten Faktoren identifiziert, die dem mentalen Modell der Nutzergruppe zugrunde liegen. Die Faktoren sind in der zugehörigen Publikation beschrieben [100, S. 10-11]. Das Vorgehen ist an Arbeiten von Hassenzahl et al. [89] und Laugwitz et al. [92] angelehnt. Dieses resultiert in vier identifizierten Dimensionen des mentalen Modells, die über 37 Items beschrieben werden. Die Benennung der identifizierten Faktoren erfolgt durch MMS- und Psychologieexperten. Der Konsens wird durch die Anwendung der Delphi-Methode [143, S. 261-262] herbeigeführt. Die vier resultierenden Dimensionen können Tabelle 5.1 entnommen werden.

Tabelle 5.1: Vier identifizierte und benannte Dimensionen des mentalen Modells der Benutzergruppe mit der Anzahl untergeordneter Items sowie einer inhaltlichen Beschreibung

Dimension	Items	Beschreibung
Systemzustand und Transparenz	9	Beschreibt die Vorstellung des Benutzers in Bezug auf die Transparenz des Systems und wie viele Informationen über den Systemzustand erwartet werden
Intelligenz und Nutzeradaptivität	12	Beschreibt, für wie intelligent der Benutzer die adaptive MMS hält, wie viel das System erkennen kann, ob es nutzerpersonalisiert ist und wie anpassungsfähig das System im Allgemeinen ist
Kontextsensitivität	10	Spiegelt die Vorstellung des Benutzers hinsichtlich des Grades der Kontextsensitivität wider, wie das System Funktionen priorisiert und wie der Kontext definiert ist
Nutzerkontrolle	6	Gibt den erwarteten Grad an Kontrolle über das System an, ob das Verhalten des Systems manuell überschrieben werden kann und ob über statische Menüs auf Funktionen zugegriffen werden kann

5.3.2 Initiales mentales Modell der Nutzergruppe

Im Rahmen der im vorherigen Unterkapitel beschriebenen online durchgeführten Studie wurde den $N = 75$ Lkw-Fahrern anhand einer abstrakten Systembeschreibung ein adaptives MMS für Nutzfahrzeuge vorgestellt. Der Informationsgehalt des gezeigten Videos wurde so gewählt, dass er etwa mit dem Lesen einer Werbebroschüre oder eines Fachartikels zu einem neuen Lkw vergleichbar ist. Wie in Abschnitt 5.1.1 dargelegt, prüfen Nutzer basierend auf diesen Informationen, ob ein mentales Modell, welches bereits durch Erfahrungen mit vergleichbaren Systemen gebildet wurde, auf das neue System übertragbar ist. Gelingt dies, so wird es angewandt und gegebenenfalls leicht angepasst. Besitzt der Nutzer noch kein mentales Modell einer adaptiven MMS oder es liegen zu viele Widersprüche mit bestehenden Modellen vor, so wird ein neues MM gebildet. Unabhängig davon, welcher der Fälle eintritt, hat der Nutzer nach der Präsentation der adaptiven MMS anschließend eine Vorstellung von dem Verhalten und den Eigenschaften des vorliegenden Systems, obwohl er noch nicht damit interagiert hat. Es wird argumentiert, dass es sich hierbei um das initiale mentale Modell des Nutzers von der adaptiven MMS handelt.

Daraus wird geschlussfolgert, dass im Rahmen des im vorherigen Unterkapitel dargelegten Vorgehens zur Konstruktion des Fragebogens die $N = 75$ Teilnehmer sich ein initiales mentales Modell von der adaptiven MMS gebildet haben. Deshalb wird der Datensatz nicht nur zur Konstruktion des Fragebogens, sondern auch zur Erfassung des initialen MMs verwendet. Es werden jedoch nur die 37 gemäß der Faktorenanalyse für das MM relevanten Items ausgewertet.

Abbildung 5.4 zeigt die grafische Auswertung der Skalen anhand von Boxplots, die deskriptive Statistik kann Tabelle C.1 im Anhang entnommen werden. Über alle vier Dimensionen hinweg ist ein hohes Wertenniveau festzustellen. Die Mittelwerte aller Skalen liegen im Zustimmungsbereich, die höchste Ausprägung liegt für die erwartete Nutzerkontrolle vor. Die Standardabweichung kann als über alle Skalen homogen beschrieben werden.

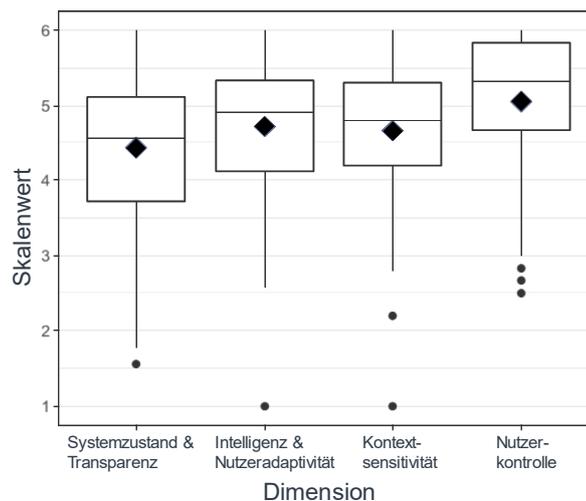


Abbildung 5.4: Anhand des erstellten Fragebogens erfasstes initiales mentales Modell der N = 75 Lkw-Fahrer von einer adaptiven MMS mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Punkt markierten Ausreißern (1 = stimme überhaupt nicht zu, 6 = stimme voll zu) nach [100, S. 12]

5.3.3 Abgeleitete Erkenntnisse

Das erfasste mentale Modell bestätigt die von Gena [120] getroffene Annahme, nach der Nutzer gegenüber einer adaptiven MMS eine hohe Erwartungshaltung haben [120, S. 1].

So wird abgeleitet, dass eine adaptive MMS den aktuellen Systemzustand transparent kommunizieren sollte. Dies steht im Einklang mit der Erkenntnis von Ussat [121], dass eine fehlende Transparenz bei adaptiven Systemen zu Frustration seitens der Nutzer führt [121, S. 121]. Weiter zeigen die Ergebnisse, dass das Probandenkollektiv von einer hohen Intelligenz des Systems ausgeht. Diese Vorstellung könnte aus der Vorerfahrung mit intelligenten MMS im Bereich von Smartphones oder Automobilen herrühren. Bei der Implementierung der Situationserkennung wird folglich ein hoher Grad an Intelligenz empfohlen, etwa durch das Anstreben eines höheren LASR-Level nach Rittger et al. [104, S. 19], wie in Abschnitt 2.2.1 vorgestellt. Bezüglich der erwarteten Kontextsensitivität des Systems lässt sich ableiten, dass die Nutzergruppe von einer starken Anpassung an die aktuelle Situation ausgeht. Weiter sollte eine durchdachte Priorisierung der Funktionen umgesetzt werden. Die Dimension der Nutzerkontrolle erzielt den höchsten Mittelwert. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die befragten Lkw-Fahrer sich eine adaptive MMS vorstellen, bei der sie selbst die Kontrolle besitzen und nicht durch die Adaption bevormundet werden. Um die von Paymans et al. [119] beschriebene Gefahr eines subjektiven Kontrollverlusts [119, S. 301] zu vermeiden, sollte bei der Konzeption daher dem Nutzer möglichst viel Kontrolle über das System ermöglicht werden. Dies steht im Einklang mit Ausführungen von Oppermann, nach welchen adaptive Systeme durch den Nutzer überschaubar gestaltet sein sollten [109, S. 5-6]. Die aus der vorliegenden Studie abgeleiteten Erkenntnisse werden im folgenden Gestaltungsprozess berücksichtigt und adressiert.

Die Interpretation der Ergebnisse unterliegt Limitationen wie einer potenziell eingeschränkten Repräsentativität der Stichprobe. Es nahmen nur deutschsprachige und vermutlich an Technologie interessierte Lkw-Fahrer an der Studie teil. Weiter ist eine Verzerrung der Werte durch Effekte wie der sozialen Erwünschtheit nicht auszuschließen [261]. In einem nächsten Schritt sollte der Fragebogen validiert werden, etwa anhand des Vorgehens von Hassenzahl et al. [89].

Weiter sollte das initiale mentale Modell mit einer separaten und repräsentativeren Stichprobe validiert werden, wodurch die Aussagekraft der vorliegenden Arbeit weiter erhöht würde.

5.4 Erste Iterationsschleife: Grobkonzept

Dieses Kapitel basiert auf einer Studienarbeit [262] und der Veröffentlichung Schöllkopf et al. [99], auf die für detailliertere Ausführungen verwiesen wird.

Im ersten Schritt des Gestaltungsprozesses soll ein Grobkonzept des Interaktionskonzepts erstellt werden. Hierbei liegt der Fokus auf der Informationshierarchie, der Verortung von Funktionen und der Konzeption von Funktionen. Des Weiteren soll für die spätere Nutzerevaluation ein hohes Maß an Interaktivität erreicht werden. Nach McCurdy et al. [263] kann bei der Erstellung von Prototypen zwischen sogenannten „fidelity“ Graden unterschieden werden, die sinngemäß dem Detailgrad und Funktionsumfang der Umsetzung entsprechen. Nach Hartson und Pyla kann zwischen low-, medium- und high-fidelity Graden unterschieden werden, wobei der Realitätsgrad steigt [87, S. 396-398]. Ein hohes Maß an Interaktivität kann gemäß Hartson und Pyla über einen höheren fidelity Grad erreicht werden [87, S. 398].

5.4.1 Konzeption und Design

In den Designprozess fließen die in Abschnitt 5.1.2 genannten Normen und Gestaltungsrichtlinien ein. Weiter wird die Adaptivität anhand der in Kapitel 3.4 identifizierten neun im Arbeitsalltag von Lkw-Fahrern auftretenden Arbeitsphasen definiert. Als Bedienmodalität wird das in Kapitel 4 ausgewählte Hardwarekonzept eines haptischen Touchdisplays mit Fühlstegen (Touch 3) festgelegt. Durch die statischen Fühlstege ergibt sich die Anforderung eines einheitlichen Layouts für die Positionierung von Interaktionselementen, damit diese haptisch auffindbar sind. Als Funktionsumfang wird eine repräsentative Auswahl an Fahrzeugfunktionen aus dem Nutzfahrzeug verwendet. Die Reihenfolge der Funktionen innerhalb einer Arbeitsphase folgt der durch die Nutzergruppe bewerteten Wichtigkeit, die anhand der in Kapitel 3.3 und 3.4 beschriebenen Vorgehens identifiziert wurde. Zum Zeitpunkt der ersten Iterationsschleife liegen noch neun Arbeitsphasen vor.

In Abschnitt 2.2.3 wurde aufgezeigt, dass eine mangelnde Transparenz eine Herausforderung adaptiver MMS ist [121, S. 121]. Um dieser entgegenzuwirken, wird entschieden, den aktuell vom System erkannten Kontext und somit die Arbeitsphase darzustellen. Diese Anzeige der aktuellen Arbeitsphase soll dem Nutzer als nachvollziehbare Begründung dienen, warum das System gerade ein bestimmtes Set an Funktionen anzeigt. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass die automatische Situationserkennung eine Situation falsch erkennt. Für derartige Eventualitäten wird empfohlen, die Adaptivität überschreibbar zu gestalten [117, S. 520]. Die Arbeitsphasen werden daher als bedienbare Buttons realisiert, wodurch die aktuelle Arbeitsphase vom Nutzer selektiert werden kann. Eine weitere Maßnahme zur Erhöhung des Kontrollgefühls wird in Form einer deaktivierbaren Adaptivität eingeführt, wie es von Oppermann empfohlen wird [109, S. 5]. Es wird deshalb eine Schaltfläche eingeführt, die das Deaktivieren der Situationserkennung ermöglicht. Daraufhin adaptiert sich die MMS nicht mehr an die aktuelle Situation, ein manuelles Umschalten durch den Nutzer ist jedoch weiterhin möglich. Sollte das System keine situativ passende Handlungsempfehlung aufführen, muss nach Lavie und Meyer [117] der Nutzer die gewünschte Handlung manuell ausführen [117, S. 520]. Aus diesem Grund

wird eine statische Rückfallebene konzipiert. Diese listet alle im Fahrzeug verbauten Funktionen in alphabetischer Reihenfolge auf und ist über eine Schaltfläche erreichbar.

Pro Phase werden die aktuell relevanten Funktionen angezeigt, die durch das Vorgehen in Kapitel 3.4 identifiziert wurden. Es wird der Empfehlung, sieben plus oder minus zwei Informationseinheiten [250, S. 96] bzw. maximal neun [84, S. 311] Funktionen anzuzeigen, gefolgt. Die maximal angezeigte Funktionsanzahl wird auf acht pro Phase begrenzt. Sollten pro Arbeitsphase mehr Funktionen relevant sein, so kann eine zweite Seite mit Funktionen aufgerufen werden. Thematisch verwandte Funktionen werden in sogenannte Funktionsgruppen gebündelt. So enthält die Funktionsgruppe „Traktion“ zum Beispiel Quer- und Längssperren des Differentials sowie eine ESP-Offroad Funktion.

In Abgrenzung zu einem gewöhnlichen Touchscreen verfügt die anvisierte Bedienhardware über eine Druckererkennung sowie haptisches Feedback. Um dem Nutzer Feedback zu geben, welche Funktion derzeit als berührt erkannt wurde, wird beim Auflegen des Fingers die Schaltfläche hellgrau hervorgehoben. Bei einem anschließenden stärkeren Druck auf die gewünschte Funktion wird über eine saliente farbliche Markierung der aktivierte Status der Funktion rückgemeldet.

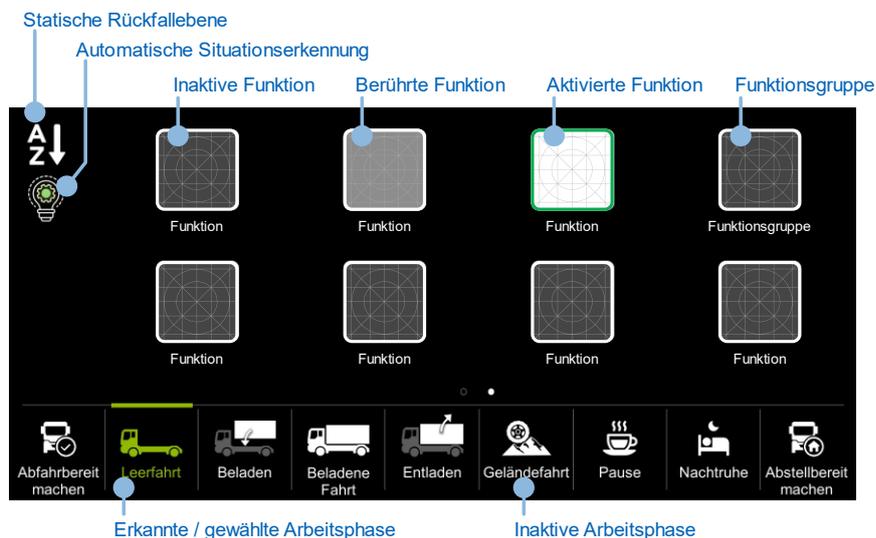


Abbildung 5.5: Erstelltes Grobkonzept mit neun Arbeitsphasen als Kontext und annotierten Funktionsbeschreibungen und abstrahierten Funktionssymbolen nach [99, S. 22]

Das resultierende Grobkonzept wird in Abbildung 5.5 gezeigt und durch Beschriftungen erläutert. Die Umsetzung erfolgt als interaktiver medium- bis high Fidelity Prototyp nach Hartson und Pyla [87, S. 398] mit der Entwicklungsumgebung Unity 3D und der Zielhardware eines haptischen Touchdisplays [99, S. 22].

5.4.2 Evaluation des Grobkonzepts in einer Nutzerstudie

Gena [120] empfiehlt, adaptive MMS bereits vor der Implementierung mit Nutzern zu evaluieren, um teure Fehlentscheidungen bei der Entwicklung zu vermeiden [120, S. 2]. Deshalb soll das Grobkonzept hingehend einer grundlegenden Verständlichkeit und möglicher Usability Probleme geprüft werden. Hierfür wird das System in einen statischen Lkw-Fahrsimulator integriert und eine explorative Nutzerstudie durchgeführt. An dieser nehmen N = 35 Probanden aus dem universitären Umfeld teil. Die Akquise von Lkw-Fahrern ist aufgrund zum Zeitpunkt der Durchführung geltenden Infektionsschutzgesetzes nicht zulässig. Nach einer Explorationsphase wird

den Teilnehmern eine Videosequenz mit repräsentativen Fahrszenen aus dem Alltag von Lkw-Fahrern gezeigt. Die Fahraufgabe muss nicht übernommen werden. Beim Durchlaufen der Situationen werden insgesamt 30 Bedienaufgaben gestellt, die aus dem Aktivieren oder Deaktivieren von Fahrzeugfunktionen bestehen. Während des Versuchs adaptiert sich die MMS automatisch an die aktuelle Situation, wobei die automatische Situationserkennung durch den Versuchsleiter imitiert wird. Es handelt sich somit um eine für frühe Entwicklungsphasen geeignete Wizard-of-Oz Studie [264, S. 103]. Der Versuchsaufbau, die Stichprobenbeschreibung und der detaillierte Versuchsablauf können der zugehörigen Publikation [99] entnommen werden. Nach dem abgeschlossenen Versuchsdurchlauf erfolgt eine Bewertung des Grobkonzepts. Hierfür werden standardisierte Fragebögen zur Erfassung der Usability und User Experience sowie offene Fragen hinsichtlich positiver und negativer Eigenschaften der Bedienoberfläche gestellt.

Erkenntnisse

Im Folgenden werden die gefundenen Resultate der Nutzerstudie berichtet und interpretiert. Zu beachten ist, dass die Interpretation Limitationen unterliegt. Dazu zählt eine nicht repräsentative Stichprobe, weil der Versuch nicht mit Lkw-Fahrern durchgeführt wurde [99, S. 24]. Weiter wurde keine Fahraufgabe ausgeführt [99, S. 24], weshalb die Probanden sich der Bedienaufgabe visuell und mental vollkommen zuwenden konnten.

Das Konzept wird mit einem System Usability Score (SUS) von durchschnittlich 76,1 (SD = 17,1) hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit bewertet, wodurch die Auszeichnung „gut“ erreicht wird [86, S. 121] und zu dem Rückschluss führt, dass das Interaktionskonzept insgesamt verstanden wird. Die Probanden (n = 17) heben das haptische Feedback der Bedienhardware positiv hervor und berichten von einer intuitiven und leichten Bedienung (n = 13) des Interaktionskonzepts. Es loben n = 12 Teilnehmer die gute Navigationsstruktur des Konzepts. Die Ergebnisse des User Experience Questionnaires (UEQ) zeigen, dass die User Experience (UX) auf einem hohen Niveau liegt. Auffällig ist, dass die Bewertung des Systems hinsichtlich der hedonischen Qualität auf einem höheren Wertenniveau liegt als bei der pragmatischen Qualität. Dies zeigt, dass das System neuartig wirkt und begeistert. Hinsichtlich der Bedieneffizienz besteht hingegen noch Verbesserungsbedarf.

Erste Verbesserungsansätze können durch eine Analyse des qualitativen Feedbacks der Teilnehmer identifiziert werden. So merken n = 17 Probanden an, dass die Zuordnung von Funktionen in den Arbeitsphasen und Funktionsgruppen verbesserungswürdig ist. Unter Berücksichtigung der fehlenden Affinität für Nutzfahrzeugtechnik der studentischen Stichprobe wird die Gruppierung von Funktionen in Funktionsgruppen überarbeitet und an heutige Lkw-Cockpits angelehnt. Weiter wird die visuelle Unterscheidbarkeit von einer einzelnen Fahrzeugfunktion und einer Funktionsgruppe erhöht. Die inkonsistente Verortung von Funktionen innerhalb einer Arbeitsphase wurde kritisiert (n = 11), weshalb eine konsistente Verortung von Funktionen festgelegt wird. Wenn eine Funktion in der Arbeitsphase „Fahren“ in der ersten Reihe links positioniert ist und diese Funktion in „Be- und Entladen“ auch relevant ist, so wird sie an derselben Position verortet. Es wird angeregt, die Menütiefe innerhalb einer Arbeitsphase zu reduzieren (n = 10). Deshalb wird die maximale Anzahl an Funktionen pro Arbeitsphase auf acht festgelegt, wodurch das Umschalten zum Erreichen der zweiten Funktionsseite entfällt. Weiter wird die Anzahl der Arbeitsphasen durch das in Kapitel 3.5 beschriebene Vorgehen von neun auf vier reduziert.

5.5 Zweite Iterationsschleife: Feinkonzept

Im nächsten Schritt soll das in Kapitel 5.4.2 identifizierte Verbesserungspotenzial umgesetzt werden und das Interaktionskonzept weiter in Form eines Feinkonzepts detailliert werden. Weiter werden die Ikonographie und Designsprache ausgearbeitet.

5.5.1 Konzeption und Design

Zunächst werden mit dem Ziel, die hedonische Qualität zu erhöhen, die Verbesserungsvorschläge adressiert. Die in Kapitel 3.5 vorgestellten vier zusammengefassten Arbeitsphasen werden im oberen Displaybereich angezeigt. Hintergrund ist, dass diese Anordnung die hierarchische Beziehung zwischen Arbeitsphase und den darin enthaltenen Funktionen verdeutlicht und dem visuellen Abtastmuster von Nutzern entspricht [265]. Die Funktionsanzahl pro Arbeitsphase wird auf acht Funktionen reduziert und eine Individualisierung der Funktionsbelegung ermöglicht. Letztere wird durch ein langes Auflegen des Fingers auf eine auszutauschende Funktionstaste erreicht. Die Adaptivität des Systems wird dadurch um eine Adaptierbarkeit erweitert [103, S. 301]. Die größte Änderung ist die Einführung eines von der aktuell erkannten Arbeitsphase unabhängigen Bereichs zur Anzeige derzeit aktiver Funktionen mit der Möglichkeit, diese direkt zu deaktivieren. Dies soll dem Fahrer dabei helfen, einen Überblick über aktive Funktionen zu behalten. Schaltflächen aktiver Funktionen melden den Funktionsstatus zusätzlich über einen grünen Indikator zurück, der gestalterisch an der Rückmeldung über eine LED angelehnt ist, wie sie in physischen Hubtastern zu finden ist. Die Schaltflächen für Funktionen und Funktionsgruppen werden visuell stärker voneinander abgegrenzt. Funktionsgruppen erhalten einen Indikator über die Anzahl der darin enthaltenen Fahrzeugfunktionen sowie die farbliche Rückmeldung, ob enthaltene Funktionen aktiv sind. Die Gruppierung von Funktionen zu Funktionsgruppen sowie die Sortierung von Funktionen in der statischen Rückfallebene wird umgestaltet, um der Gruppierungslogik aktueller Lkw-Modelle zu folgen.



Abbildung 5.6: Erstelltes Feinkonzept mit vier Arbeitsphasen als Kontext und annotierten Funktionsbeschreibungen sowie verfremdeten Funktionssymbolen

Das resultierende Feinkonzept wird in Abbildung 5.6 gezeigt und anhand von Annotationen erklärt. Der Entwurf wird in Form eines interaktiven Prototyps implementiert. Die Umsetzung ist nach Hartson und Pyla als high Fidelity einzustufen [87, S. 398] und erfolgt mit der Entwicklungsumgebung Unity 3D und der Zielhardware eines haptischen Touchdisplays [99, S. 22].

5.5.2 Heuristische Evaluation des Feinkonzepts

Dieses Teilkapitel beruht auf einer betreuten Studienarbeit [266].

Das überarbeitete und nun als Feinkonzept ausgearbeitete Interaktionskonzept soll im nächsten Schritt unter Einsatz einer heuristischen Evaluation auf weiteres Verbesserungspotenzial hin untersucht werden. Nielsen bezeichnet diese Form der Evaluation als eine „Discount Usability Engineering“ Methode, die Usability Probleme aufdecken kann [251, S. 152].

Diese ermöglicht bereits mit einer geringen Anzahl an Evaluatoren das Identifizieren vieler Usability Probleme, insbesondere wenn es sich um erfahrene Experten handelt [267, S. 377]. Dabei wird die Gebrauchstauglichkeit des Systems anhand von Guidelines oder Regeln abgeprüft [268, S. 155]. Hierfür eignen sich zum Beispiel die Richtlinien nach Molich und Nielsen [269, S. 339] oder Nielsen [251, S. 153]. Dieses Verfahren kann bei Untersuchungen adaptiver MMS angewandt werden [9, S. 74-75].

Die heuristische Evaluation wird mit $N = 21$ Experten durchgeführt, wovon $n = 14$ im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion und $n = 7$ Experten in der Nutzfahrzeugerprobung aus Kundensicht tätig sind. Ein Experte gibt als Beruf Funktionsentwickler für Kundenfunktionen an. Das durchschnittliche Alter der Teilnehmer liegt bei 39,76 Jahren ($SD = 7,73$), die durchschnittliche Berufserfahrung im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion bei 6,45 Jahren ($SD = 4,72$). Die Stichprobe weist für eine heuristische Untersuchung einen verhältnismäßig großen Umfang auf. Nach Nielsen [267] ist jedoch eine größere Stichprobe anzustreben, wenn die heuristische Evaluation von in der Methode ungeübten Experten durchgeführt wird [267, S. 377].

Die Durchführung dauert pro Experte rund eineinhalb Stunden und erfolgt teilstandardisiert. Zu Beginn findet eine allgemeine Einweisung in das Ziel der heuristischen Evaluation statt, welches durch das Aufdecken potenzieller Usability Probleme definiert wird. Weiter werden die 10 Usability Guidelines von Nielsen [251] vorgestellt, die zur Evaluation verwendet werden sollen. Es folgt eine Einweisung in die grundlegende Funktionalität der adaptiven MMS, bevor die freie Exploration beginnt. Während dieser sind die Experten angehalten, das System hinsichtlich der Guidelines zu prüfen und mögliche Probleme zu nennen. Es folgt eine detaillierte Erklärung der Bestandteile des Interaktionskonzepts, um gegebenenfalls ein abweichendes Verständnis der Teilfunktionen aufzudecken und um weiteres Feedback einzuholen. Der Versuch wird mit offenen Fragen zum Gesamteindruck des Systems und einer Verabschiedung beendet.

5.5.3 Erkenntnisse

Im Folgenden werden Erkenntnisse der heuristischen Evaluation und mögliches Verbesserungspotenzial vorgestellt. Die heuristische Evaluation deckt eine geringe Anzahl an Usability Probleme auf, die keine schwerwiegenden Mängel andeuten. Dies zeigt, dass die Gebrauchstauglichkeit insgesamt auf einem hohen Niveau liegt. Weiterhin wird die hohe Gebrauchstauglichkeit durch zahlreiche positive Kommentare der Experten bestätigt.

Als größter Kritikpunkt wird die verwendete Ikonographie identifiziert. Insbesondere die Verständlichkeit der Symbole der Phasen „Fahren“ und „Vor- & Nachbereitung“ sowie der Schaltfläche für das Ein- und Ausschalten der Situationserkennung wird als gering eingestuft oder sogar missverstanden. Weiter wird angeregt, die Unterscheidbarkeit zwischen den Arbeitsphasen zu erhöhen, weil der Funktionsumfang pro Arbeitsphase Überschneidungen aufweist. Die Funktion zur Individualisierung wird grundlegend verstanden, aber als nicht intuitiv kritisiert. Es wird angeregt, bekannte Bedienmetaphern aus dem Consumer-Electronics-Bereich zu

übernehmen. Die statische Auflistung aller Funktionen in der Rückfallebene wird als sinnvoll, jedoch unübersichtlich und überladen empfunden. In Konsequenz wird die Anordnung überarbeitet und die visuelle Gruppierung der Funktionen verstärkt.

5.5.4 Finales Interaktionskonzept

Dieses Kapitel basiert in Teilen auf einer Abschlussarbeit [270].

Die Erkenntnisse der heuristischen Evaluation fließen in eine letzte Überarbeitung des Interaktionskonzepts ein (Abbildung 5.7).

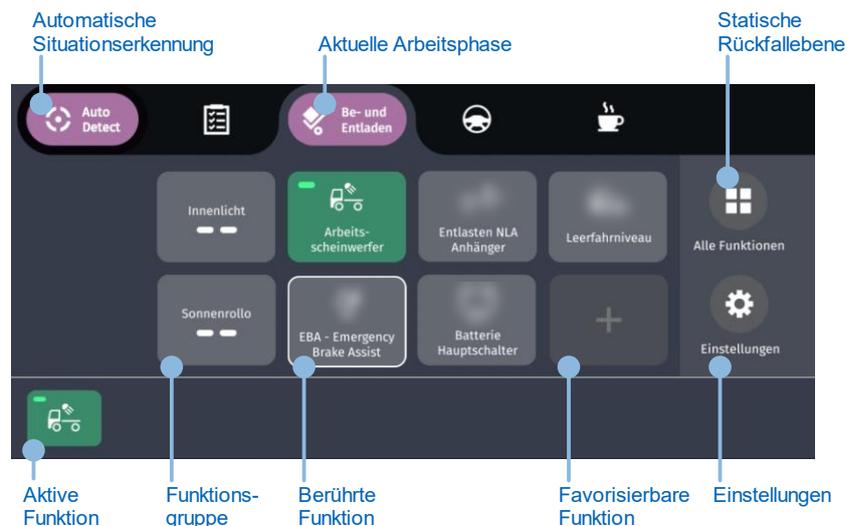


Abbildung 5.7: Finales Interaktionskonzept der adaptiven MMS mit vier Arbeitsphasen als Kontext und annotierten Funktionsbeschreibungen sowie unkenntlich gemachten Funktionssymbolen

Hierfür werden die Symbole der Arbeitsphasen anhand der Gestaltungsvorschläge der Experten überarbeitet und die Tätigkeiten der Lkw-Fahrer während der jeweiligen Arbeitsphase als visuelle Metapher verwendet. Weiter wird im aktiven Zustand der Arbeitsphasen eine Beschriftung eingeführt. Zugunsten einer höheren Unterscheidbarkeit sowie redundanten Kodierung werden die Arbeitsphasen durch eine Einfärbung kodiert, die sich auch auf die Hintergrundfarbe der Schaltfläche „Auto Detect“ für die automatische Situationserkennung auswirkt. Dies soll den Zusammenhang zwischen Arbeitsphase und Situationserkennung verdeutlichen. Die pro Arbeitsphase angezeigten Funktionen werden auf Sinnhaftigkeit geprüft und einzelne Anpassungen vorgenommen. Die automatische Situationserkennung erhält im Rahmen eines nachträglich durchgeführten Expertenworkshops mit $N = 3$ MMS-Experten die Bezeichnung „Auto Detect“ die verdeutlichen soll, dass es sich um eine Funktion handelt, die sich auf die Adaptivität bezieht. Weiter wird ein abstraktes Symbol entworfen, weil die ursprüngliche Darstellung einer Glühbirne als eine Lichtfunktion missverstanden wurde. Darüber hinaus wird der Bedienablauf für die Individualisierung der Funktionsbelegung überarbeitet. So wird visuell über eine Animation rückgemeldet, wie lange der Funktionsbutton berührt werden muss, damit das Untermenü der Individualisierung geöffnet wird. Die Kritik bezüglich der Anordnung und Gruppierung von Funktionen in der statischen Rückfallebene wird adressiert, indem die thematische Zusammengehörigkeit von Funktionen durch eine Umrandung gekennzeichnet wird. Eine grüne Färbung des Hintergrunds von aktiven Funktionen soll den aktiven Zustand salienter und in Konsequenz leichter erfassbar rückmelden. Aus Platzgründen ist in dem Bereich der Anzeige aktiver

Funktionen keine Beschriftung möglich. Deshalb wird, wenn eine aktive Funktion im unteren Bildschirmbereich berührt wird, der Funktionsname über der Funktion eingeblendet.

Das Interaktionskonzept wird hinsichtlich der Farbgebung sowie Aufteilung weiterentwickelt, um die Bedienbereiche des Feinkonzepts visuell klarer voneinander abzutrennen. Hierfür wird das Design aktuellen Designtrends aus dem Bereich von Consumer-Electronics-Geräten angenähert.

5.6 Zusammenfassung und Diskussion

Wie in Kapitel 2.2.3 dargelegt, sind zentrale Herausforderungen adaptiver MMS ein gefühlter Kontrollverlust sowie die notwendige Berücksichtigung des mentalen Modells der Nutzergruppe. Um die Vorstellung der Nutzer von einem solchen System im Gestaltungsprozess berücksichtigen zu können, wurde ein neuartiges Vorgehen entwickelt, mit dem das initiale mentale Modell der Nutzergruppe erfasst werden kann. Die durchgeführte Untersuchung mit $N = 75$ Lkw-Fahrern bestätigt den Stand der Forschung: Die Nutzer haben eine hohe Erwartungshaltung an eine adaptive MMS. Es konnte abgeleitet werden, dass die Nutzergruppe davon ausgeht, bei der Bedienung eines solchen Systems ein hohes Maß an Kontrolle ausüben zu können. Zudem wird der adaptiven MMS hohes Maß an Intelligenz beigemessen.

Diese Anforderungen wurden gemeinsam mit zu berücksichtigenden Richtlinien und Normen in den Gestaltungsprozess aufgenommen. Hierbei wurde ein möglichst reduziertes und leicht verständliches Interaktionskonzept als Ziel festgelegt.

Es wurde ein iteratives Vorgehen gewählt, das mit der Erstellung eines Grobkonzepts und dem Aufbau eines interaktiven Prototyps begann. Im Rahmen einer ersten explorativen Nutzerstudie mit $N = 35$ Teilnehmern konnte Verbesserungspotenzial identifiziert werden, das in einer zweiten Iterationsschleife in Form eines ausdetaillierten Feinkonzepts umgesetzt wurde. Diese zweite Version des Interaktionskonzepts wurde mit $N = 26$ Fachexperten anhand einer heuristischen Evaluation auf verbleibende Usability Probleme untersucht. Es wurden weitere Verbesserungsvorschläge abgeleitet und diese in eine finale Version des Interaktionskonzepts eingearbeitet.

In Kapitel 5.2 wurde die Forschungsfrage aufgestellt, wie ein Interaktionskonzept für eine adaptive MMS im Nutzfahrzeug gestaltet werden sollte. Durch das gewählte nutzerzentrierte Vorgehen und die in der Literatur identifizierten Herausforderungen adaptiver MMS wurde unter Berücksichtigung des initialen mentalen Modells der Nutzergruppe zunächst ein Grob- und anschließend ein Feinkonzept erarbeitet sowie evaluiert. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in einem finalen Interaktionskonzept (Abbildung 5.7) umgesetzt. Dieses stellt die Antwort auf die eingangs gestellte Forschungsfrage dar.

6 Vergleich zwischen adaptiver und statischer Mensch-Maschine-Schnittstelle

Zu Beginn der Arbeit wurde in Abbildung 1.2 ein zweistufiges Vorgehen vorgestellt. Der erste Schritt besteht aus der nutzerzentrierten Entwicklung des Systems. Hierfür wurde eine adaptive MMS (aMMS) für die Bedienung von Fahrzeugfunktionen im Nutzfahrzeug unter Einbezug von Lkw-Fahrern und MMS-Experten iterativ entwickelt. Neben aufgezeigten Vorteilen bringt die Einführung eines adaptiven MMS neue Herausforderungen mit sich, wie in Kapitel 2.2 dargelegt. Nach Alvarez-Cortes et al. [20] ist insbesondere bei der Einführung adaptiver MMS zu prüfen, ob die Vorteile etwaige Nachteile überwiegen [20, S. 317].

In diesem Teilkapitel soll deshalb Schritt 2 des Vorgehens ausgeführt werden: Der Vergleich der entwickelten adaptiven MMS mit einer aktuell im Nutzfahrzeug eingesetzten statischen Mensch-Maschine-Schnittstelle (sMMS). Ziel dieses Kapitels ist die Beantwortung der in Kapitel 1.2 definierten zentralen Forschungsfrage, inwiefern sich adaptive MMS für die Bedienung von Fahrzeugfunktionen im Nutzfahrzeug eignen.

6.1 Fragestellung und Hypothesen

In Kapitel 2.2 wurden Vor- und Nachteile von adaptiven MMS anhand des Stands der Technik vorgestellt und diskutiert. Die Studienlage begrenzt sich mit wenigen Ausnahmen [8, 23] auf Untersuchungen im Bereich Consumer-Electronics [114, 271, 272] und Pkw [9, 22, 24, 26–28, 117, 121, 128]. Wie aus Abschnitt 2.1.3 hervorgeht, unterscheiden sich beim Nutzfahrzeugverkehr die Aufgaben des Fahrers, die Umweltbedingungen sowie das Arbeitsgerät stark vom Individualverkehr. Die Übertragbarkeit von Studienergebnissen aus dem Pkw- auf den Lkw-Sektor ist folglich anzuzweifeln [8, S. 9].

In Kombination mit den uneinheitlichen Studienresultaten im Pkw-Bereich müssen die Forschungsfragen explorativ angesehen und die Hypothesen ungerichtet formuliert werden. Die in Kapitel 1.2 aufgestellte zentrale Forschungsfrage wird hierfür im Folgenden weiter konkretisiert. Die Eignung einer MMS für die Bedienung von Fahrzeugfunktionen im Nutzfahrzeug lässt sich durch eine Untergliederung in relevante Teilaspekte prüfen. Diesbezüglich werden nachfolgend Forschungsfragen für den Vergleich mit einer statischen MMS aufgestellt.

Forschungsfrage 1: Sicherheit

Aus Abschnitt 2.1.3 kann abgeleitet werden, dass der Sicherheit im Nutzfahrzeugsektor ein hoher Stellenwert beizumessen ist. Zur Überprüfung dieser werden die visuelle Ablenkung von der Fahraufgabe und die Fahrgüte in Form ungerichteter Hypothesen untersucht. Die entsprechenden Hypothesen werden ungerichtet aufgestellt und zugunsten der besseren Lesbarkeit ausschließlich als Alternativhypothese formuliert. Die Nullhypothese geht jeweils von keinem Gruppenunterschied aus. Forschungsfrage 1 (F1) lautet:

„Unterscheiden sich die adaptive und statische MMS in Bezug auf ihre Sicherheit während der Fahrt?“

Zur Überprüfung von F1 werden zwei Hypothesen aufgestellt. H1 hat zum Ziel, die Fahrgüte anhand der in Abschnitt 2.1.4 eingeführten Messgrößen SDLP und TLC_{krit} zu vergleichen. H2 wird aufgestellt, um die visuelle Ablenkung von der Fahraufgabe (operationalisiert durch die gesamte Blickzuwendung zur MMS über alle Bedienaufgaben hinweg sowie die Anzahl kritischer Blickzeiten) auf Unterschiede zu prüfen. H1 und H2 lauten wie folgt:

- **H1_A**: Die Fahrgüte liegt bei der Bedienung der adaptiven und statischen MMS auf unterschiedlichen Wertenniveaus.
- **H2_A**: Die visuelle Ablenkung von der Fahraufgabe liegt bei der Bedienung der adaptiven und statischen MMS auf unterschiedlichen Wertenniveaus.

Forschungsfrage 2: Gebrauchstauglichkeit

Einen wichtigen Faktor für die Eignung im Nutzfahrzeug stellt die Gebrauchstauglichkeit der MMS dar. Wie in Abschnitt 2.1.3 dargelegt, ist ein Nutzfahrzeug als ein Werkzeug zur Bewältigung des Alltags von Lkw-Fahrern zu verstehen. In Konsequenz sind eine hohe Effizienz bei der Bedienung und möglichst wenige Bedienfehler wünschenswert. Forschungsfrage 2 (F2) lautet daher:

„Unterscheiden sich die adaptive und statische MMS in Bezug auf ihre Gebrauchstauglichkeit?“

Zur Überprüfung von F2 werden zwei Hypothesen aufgestellt. Die subjektiv wahrgenommene Gebrauchstauglichkeit wird mittels des standardisierten Fragebogens System Usability Questionnaire (SUS) erfasst und H3 wie folgt formuliert:

- **H3_A**: Die wahrgenommene Gebrauchstauglichkeit der adaptiven und statischen MMS wird unterschiedlich bewertet.

H4 hat zum Ziel, die Gebrauchstauglichkeit anhand der objektiven Kenngrößen der Bedienzeit über alle Aufgaben hinweg sowie der Anzahl der Fehlbedienungen zu quantifizieren:

- **H4_A**: Die objektiv ermittelte Gebrauchstauglichkeit liegt bei der Bedienung der adaptiven und statischen MMS auf unterschiedlichen Wertenniveaus.

Forschungsfrage 3: Nutzerakzeptanz

Die Akzeptanz durch die anvisierte Nutzergruppe eines neu entwickelten Systems ist essenziell für die erfolgreiche Markteinführung und die spätere Nutzung durch Lkw-Fahrer. Forschungsfrage 3 (F3) wird deshalb wie folgt aufgestellt:

„Unterscheiden sich die adaptive und statische MMS in Bezug auf ihre Nutzerakzeptanz?“

Zur Überprüfung der Akzeptanz der beiden MMS durch die anvisierte Nutzergruppe von Lkw-Fahrern werden zwei Hypothesen aufgestellt. H5 prüft mittels des standardisierten Fragebogens nach Van der Laan et al. [96] die subjektiv wahrgenommene Akzeptanz. Zusätzlich wird die Präferenz der Nutzergruppe für eine der beiden MMS erfasst und durch Hypothese H6 adressiert. Die wahrgenommene User Experience wird mittels des standardisierten Fragebogens User Experience Questionnaire (UEQ) erfasst und anhand von H7 betrachtet. Die Hypothesen lauten daher wie folgt:

- **H5_A**: Die Akzeptanz der adaptiven und statischen MMS fällt unterschiedlich aus.
- **H6_A**: Die Nutzergruppe präferiert eine der beiden MMS.
- **H7_A**: Die User Experience der adaptiven und statischen MMS liegt auf unterschiedlichen Wertenniveaus.

Eine Übersicht über die drei Forschungsfragen, der zugehörigen Hypothesen sowie deren Operationalisierung ist Abbildung 6.1 zu entnehmen.

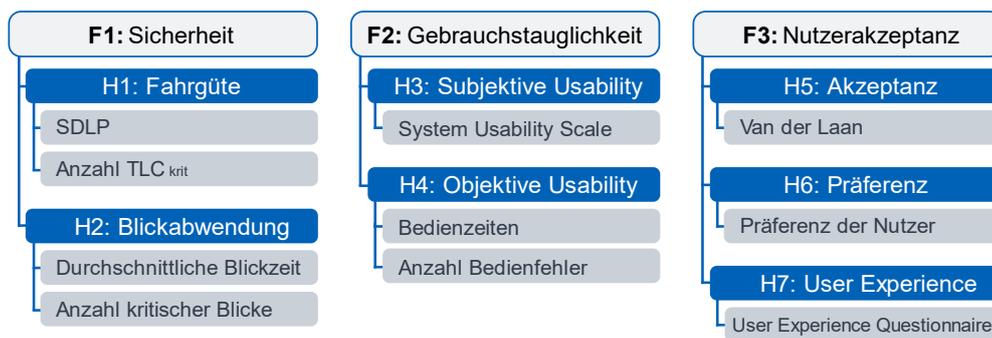


Abbildung 6.1: Übersicht über die Forschungsfragen F1-F3 (hellgrau) des Versuchs sowie die untergeordneten Hypothesen H1-H7 (blau) und deren Operationalisierung (dunkelgrau)

Für eine bessere anschließende Interpretation und Einordnung der Ergebnisse werden weitere Konstrukte erhoben und explorativ ausgewertet. So wird geprüft, ob das in Kapitel 5.3 identifizierte initiale mentale Modell mit dem retrospektiven aus der Interaktion mit dem System resultierenden Modell übereinstimmt. Dies soll klären, ob die entwickelte adaptive MMS der Erwartungshaltung der Nutzer entspricht oder Diskrepanzen bestehen. Ergänzend werden allgemeine Vor- und Nachteile der beiden MMS erhoben, um weiteres Verbesserungspotenzial und beizubehaltende Eigenschaften zu identifizieren.

6.2 Fahrstudie

Dieses Kapitel basiert zu Teilen auf den betreuten Abschlussarbeiten [273] und [274].

Nach Lavie und Meyer [117] sollten insbesondere adaptive MMS unter möglichst realen Nutzungsbedingungen und unter Einbezug der späteren Nutzergruppe getestet werden [117, S. 508]. Deshalb werden die Forschungsfragen durch eine Nutzerstudie in einem Lkw-Fahrerstudie untersucht. Diese Methode ermöglicht das gefahrlose Erleben realitätsnaher Szenarien und wird durch in der Vergangenheit durchgeführte Nutzerstudien [9, 27, 28] als probate Umgebung

für die Untersuchung adaptiver MMS angesehen. Gemäß den Empfehlungen von Lavie und Meyer [117] wird die Stichprobe entsprechend der anvisierten Nutzergruppe gewählt [117, S. 508].

6.2.1 Versuchsdesign und Versuchsablauf

Aus dem in Kapitel 4.5 vorgestellten Vergleich von Hardwarekonzepten und anhand von Richardson [72], Seitz [8] und Fank [71] Lkw-Simulatoren durchgeführten Probandenstudien wird abgeleitet, dass eine Stichprobengröße im Bereich von 23 bis 38 Probanden zu erwarten ist. Zugunsten einer erhöhten Teststärke wird deshalb ein messwiederholtes Versuchsdesign gewählt [225, S. 394-395]. Durch dieses Vorgehen erleben alle Versuchsteilnehmer sowohl die statische als auch die adaptive MMS. Dies erlaubt eine Abfrage, welches der beiden Systeme die Probanden lieber im Alltag nutzen würden.

Die adaptive und statische MMS stellen den Untersuchungsgegenstand dar und werden hinsichtlich mehrerer abhängigen Variablen miteinander verglichen. Folglich handelt es sich um ein einfaktorielles messwiederholtes (within-subject) Design mit zwei Faktorstufen. Dieses Vorgehen hat zum Nachteil, dass systematische Reihenfolgeeffekte auftreten können. Um diesen entgegenzuwirken [143, S. 184] wird systematisch variiert, welcher Proband welches MMS im ersten und zweiten Versuchsdurchlauf erlebt.

Der rund zweistündige Ablauf ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Die Studie beginnt mit einer Einweisung in die Ziele des Versuchs. Im Rahmen der sich anschließenden Vorbefragung werden demografische Daten mittels eines Fragebogens erhoben. Es schließt sich eine Einweisung in den statischen Lkw-Fahrsimulator sowie eine Eingewöhnungsfahrt an. Ziel dieser rund fünfminütigen Fahrt ist es, sich mit der Bedienung und den Fahreigenschaften des Simulators vertraut zu machen.

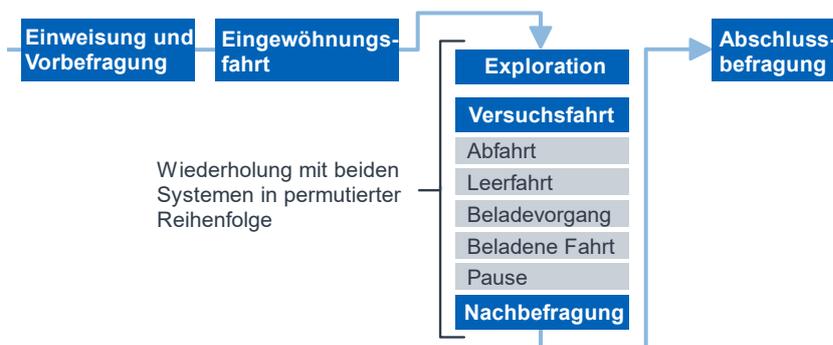


Abbildung 6.2: Ablauf des Fahrsimulatorversuchs mit messwiederholtem Versuchsdesign

Es folgt der Einbau einer der beiden MMS (statisch oder adaptiv) in den Fahrsimulator durch das Versuchspersonal. Währenddessen bekommt der Proband eine Liste mit 28 im Lkw verbauten Fahrzeugfunktionen vorgelegt, mit der Bitte, die Funktionssymbole und -namen für die Versuchsdurchführung zu verinnerlichen. Nach der Bestätigung des Probanden, dass alle Funktionen verstanden und gemerkt wurden, beginnt die Explorationsphase. Hierfür wird die grundlegende Funktionsweise des Bedienkonzepts der MMS anhand eines kurzen Erklärvideos erläutert. Dies soll den Einweisungsvorgang vor dem erstmaligen Fahren des Fahrzeugs nachstellen, wie es etwa im Rahmen einer Fahrzeugübergabe durch den Händler geschieht. Im Anschluss hat der Fahrer rund fünf Minuten Zeit, die MMS (statisch oder adaptiv) zu erkunden und gegebenenfalls Verständnisfragen zu stellen. Im Anschluss wird durch das

Versuchspersonal das System nochmals durch eine Demonstration der Funktionen erklärt, um auszuschließen, dass ein Teilaspekt des Systems nicht selbstständig entdeckt oder verstanden wurde.

Nach dem Abschluss der Exploration wird die eigentliche Versuchsfahrt eingeleitet. Hierfür wird der Proband instruiert, sich an die geltende Straßenverkehrsordnung zu halten sowie den Anweisungen des Versuchspersonals sowie automatischen Sprachansagen zu folgen. Im Rahmen der Versuchsfahrt werden die in Abbildung 6.2 aufgelisteten Situationen aus dem Alltag eines Lkw-Fahrers nachgestellt. Diese werden durch sechs im Anhang in Abbildung D.1 dargestellte Fahrscenarien realisiert, in denen die Probanden jeweils Bedienungsaufgaben ausführen. Die in Summe rund 30 Minuten dauernde Versuchsfahrt beginnt mit der Abfahrt auf einem Betriebshof bei Morgendämmerung. Es folgt eine unbeladene Leerfahrt auf einer Landstraße, die zu einem Betriebsgelände führt. Dort wird der Proband instruiert, das Fahrzeug für einen anstehenden Beladungsvorgang in einen mit Pylonen markierten Bereich zu rangieren. Nach der erfolgten Beladung des Fahrzeugs wird die Fahrt über einen kurzen Landstraßenabschnitt auf einer zweispurigen Autobahn fortgesetzt. Diese verjüngt sich aufgrund einer Baustelle zu einem einspurigen Fahrstreifen, der durch Betonbaken begrenzt ist. Die Fahrt endet mit einer Pausensituation auf einem Rastplatz.

An die absolvierte Versuchsfahrt schließt sich eine Nachbefragung an, welche die Bewertung der erlebten MMS zum Gegenstand hat. Die Exploration, Versuchsfahrt und Nachbefragung wird anschließend mit der zweiten MMS erneut durchlaufen, bevor die Abschlussbefragung durchgeführt wird. Im Anschluss erfolgt eine Aufwandsentschädigung von 20 € pro angefangene Stunde sowie eine Anfahrtkostenpauschale von 30 € pro angefangene 100 km.

6.2.2 Versuchsaufbau

Im Folgenden wird der verwendete Versuchsaufbau, bestehend aus Fahrsimulationsumgebung und prototypisch umgesetzter adaptiver und statischer MMS, beschrieben.

Lkw-Fahrsimulator. Der Versuch findet in einem statischen Lkw-Fahrsimulator statt, der in Abschnitt 4.5.3 beschrieben wird. Dieser verfügt über das Blickerfassungssystem Smart Eye Pro in der Version 8, das die Blickrichtung des Nutzers über fünf Infrarotleuchten und vier Kameras erfasst. Die Fahrstrecke wird in der Simulationssoftware Silab Version 6.5 implementiert.

Analog zum Versuchsaufbau für den Vergleich der drei Hardwarekonzepte (Kapitel 4.5) wird im Bereich der Mittelkonsole eine Vorrichtung für das Austauschen der MMS verbaut, sodass während des Versuchsablaufs schnell zwischen statischer und adaptiver MMS gewechselt werden kann. Beide MMS befinden sich somit in einem zugleich gut einsehbaren und bedienbaren Bereich, wie in Abbildung 6.3 zu sehen ist. Beide MMS verfügen über ein identisches Funktionsset.

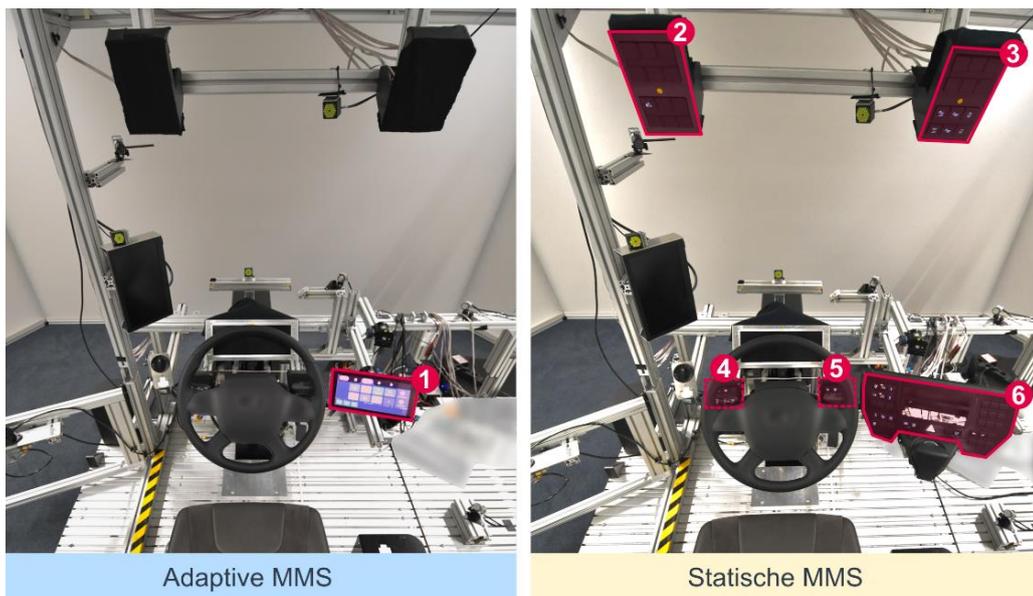


Abbildung 6.3: Für den Versuch prototypisch aufgebaute und im statischen Lkw-Fahrsimulator integrierte adaptive (Markierung 1) und statische (Markierungen 2-6) MMS

Prototypische Umsetzung der adaptiven MMS. Für den Versuch wird die in Kapitel 4 ausgewählte Bedienhardware (haptisches Touchdisplay mit Fühlstegen) verwendet. Diese ist in Abbildung 6.4 in Kombination mit dem in Kapitel 5 erarbeiteten Interaktionskonzept zu sehen.



Abbildung 6.4: Prototypische Umsetzung der adaptiven MMS mit haptischem Touchdisplay und auf der Displayoberfläche aufgetragenen Fühlstegen

Die Adaptivität des Systems folgt der in Kapitel 3 definierten Adaptivität in Form von vier Arbeitsphasen und des in Abbildung 5.7 gezeigten Interaktionskonzepts. Die Arbeitsphasen können Funktionen und Funktionsgruppen beinhalten. Letztere beinhalten mehrere Fahrzeugfunktionen, die in einer zweiten Menüebene erscheinen. Die Situationserkennung der adaptiven MMS wird über ein Skript realisiert und folgt einem vordefinierten Ablauf. Die aktuell erkannte Situation wird basierend auf dem aktuellen Streckenkilometer von der Fahrsimulationssoftware Silab per CAN-Signal an die Bedienoberfläche geschickt, die in Unity 3D implementiert ist.

Prototypische Umsetzung der statischen MMS. Die statische MMS wird nach dem Vorbild der Serienumsetzung eines Lkw-Herstellers umgesetzt. Anhand der Markierungen 2 bis 6 in Abbildung 6.3 wird ersichtlich, dass die statische MMS aus mehreren Bedienebereichen besteht. Diese befinden sich im Bereich des Dachhimmels (Markierung 2 und 3), im linken und rechten Kniebereich (Markierung 4 und 5) sowie im Bereich der Mittelkonsole (Markierung 6). Die Funktionen sind thematisch gruppiert und entsprechen der Anordnung in einem Serienfahrzeug. Die Betätigung der Funktionen erfolgt über physische Hubtaster mit aufgebrachten Symbolen der Funktionen, wie in Abbildung 6.5 zu sehen ist. Weiter ist zu erkennen, dass der Status einer Funktion über eine gelbe LED-Leuchte rückgemeldet wird. Der Status der aktuellen Funktion

wird über ein prototypisches Steuergerät gesteuert, das wiederum mit der Fahrsimulation Silab über eine CAN-Schnittstelle kommuniziert.



Abbildung 6.5: Physische Hubtaster der statischen MMS mit haptischer Abtrennung durch Fühlstege zwischen den Tasten sowie LED-Leuchte zur Rückmeldung des Funktionsstatus

Die Lokalisierung der Bedienflächen wird durch Fühlhilfen in Form von Stegen zwischen den Tasten erleichtert. Die Tastenfelder sind in 3D-gedruckte Bedienblenden eingefasst, die auf den CAD-Daten eines Serienfahrzeugs basieren.

6.2.3 Datenerhebung

In diesem Abschnitt wird die Operationalisierung der aufgestellten Hypothesen H1-H7 vorgestellt.

Sicherheit. Die für Forschungsfrage F1 relevante Sicherheit wird während der Fahrt erhoben. Hierfür soll die Fahrgüte quantifiziert werden. Zu diesem Zweck wird in der Simulationsumgebung Silab das in Abschnitt 2.1.4 eingeführte Maß der Spurhaltefähigkeit SDLP sowie die Anzahl nahender Spurüberschreitungen TLC_{krit} erhoben. Weiter soll die visuelle Ablenkung von der Fahraufgabe erhoben werden. Hierfür wird mittels eines Blickerfassungssystems des Herstellers Smart Eye die durchschnittliche Blickzeit pro Bedienaufgabe auf die respektive verbaute MMS ermittelt. Ergänzend wird die Anzahl von Blickzuwendungen auf die MMS von über zwei Sekunden erfasst, wobei es sich gemäß der NHTSA [79] um eine kritische Blickabwendung vom Fahrgeschehen handelt [79, S. 24821]. Die Anzahl dieser kritischen Blickzuwendungen wird pro Versuchsdurchlauf aufsummiert und zwischen den MMS verglichen.

Gebrauchstauglichkeit. Die Gebrauchstauglichkeit soll für die Beantwortung von Forschungsfrage F2 anhand einer Kombination aus subjektiven und objektiven Größen quantifiziert werden. Der Fragebogen SUS erfasst die wahrgenommene Gebrauchstauglichkeit der MMS. Die durchschnittliche Bedienzeit während der Fahrt wird anhand eines in der Simulationsumgebung Silab implementierten Skripts erfasst, wobei die Zeitspanne zwischen der Aufforderung und der Betätigung erhoben wird. Die durchschnittliche Anzahl der Bedienfehler pro Durchgang erfolgt über ein weiteres Skript. Zusätzlich werden die Bedienvorgänge gefilmt und nachträglich analysiert. Ein Bedienfehler wird erfasst, wenn nach 30 Sekunden die erforderliche Funktion nicht betätigt oder eine falsche Funktion ausgelöst wird.

Nutzerakzeptanz. Die Nutzerakzeptanz wird über den Fragebogen nach Van der Laan et al. [96] erhoben. Dieser kam bereits bei Untersuchungen adaptiver Systeme [26, S. 90] und in Erhebungen im Nutzfahrzeugsektor [72, S. 63] zum Einsatz. Weiter werden die Probanden nach der Benutzung beider Systeme gefragt, ob sie die adaptive oder statische MMS in ihrem Fahrzeug präferieren würden. Anhand des standardisierten Fragebogens UEQ wird die wahrgenommene User Experience ermittelt.

Erhebung des mentalen Modells. Es soll explorativ untersucht werden, welche Ausprägungen das mentale Modell der Nutzergruppe nach dem Erleben des adaptiven Systems aufweist. Hierfür wird der in Abschnitt 5.3.1 erstellte Fragebogen nach der Versuchsfahrt ausgefüllt. Diese retrospektive Messung soll mit dem in Kapitel 5.3.2 identifizierten initialen mentalen Modell verglichen werden.

Offenes Feedback. Die Probanden werden nach jeder Versuchsfahrt aufgefordert, offenes Feedback zu der im Versuchsdurchlauf bedienten MMS zu geben. Hierfür werden sie zunächst gebeten, positive Aspekte des Systems zu nennen sowie die Nennung zu begründen. Im nächsten Schritt wird abgefragt, in welchen Bereichen das System Verbesserungspotenzial aufweist bzw. welche Aspekte negativ aufgefallen sind. Die Freitexte werden von der Versuchsleitung notiert, Überschneidungen geclustert und die Nennungshäufigkeit über alle Probanden anschließend ausgewertet.

6.2.4 Ergebnisse

Zur Beantwortung der Forschungsfragen werden die Hypothesen statistisch geprüft. Wenn die Bedingungen für parametrische Tests erfüllt sind, werden diese durchgeführt. Bei einer deutlichen Verletzung der Voraussetzungen wird auf nichtparametrische Alternativen zurückgegriffen. Durch die ungerichteten Hypothesen werden diese zweiseitig getestet. Aufgrund der Messwiederholung werden Tests für verbundene Stichproben eingesetzt. Das Signifikanzniveau wird auf den im Forschungsgebiet der Mensch-Maschine-Interaktion gängigen Wert von $\alpha = 0,05$ festgelegt. Werden für die Überprüfung einer Hypothese mehrere Tests durchgeführt, ist mit einer Kumulation des Alphafehlers zu rechnen. Nach Bortz und Schuster kann diesem Effekt mit Verfahren wie der Bonferroni-Korrektur [275, 579] entgegengewirkt werden, das als konservativ einzuschätzen ist [275, 558]. Das angepasste Signifikanzniveau α_{bonf} wird erreicht, in dem das Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ durch die Anzahl der pro Hypothese durchgeführten Tests k geteilt wird, wie aus der Formel (6.1) hervorgeht.

$$\alpha_{bonf} = \frac{\alpha}{k} \quad (6.1)$$

Für die Hypothesen H1, H2, H4 und H5 wird folglich das Signifikanzniveau aufgrund der $k = 2$ durchzuführenden statistischen Tests auf $\alpha_{bonf} = 0,025$ angepasst, bei H7 durch $k = 6$ Tests für die sechs Skalen des Fragebogens UEQ auf $\alpha_{bonf} = 0,008$.

Stichprobenbeschreibung

Der Einladung zur Versuchsdurchführung folgen $n = 2$ Lkw-Fahrerinnen und $N = 29$ Fahrer, die alle im Besitz einer gültigen Fahrerlaubnis der Klasse C sind. Das mittlere Alter der Stichprobe beträgt 47,8 Jahre ($SD = 12,36$), die durchschnittlich am Tag gefahrenen Kilometer werden mit 218,2 ($SD = 155$) angegeben. Von den Fahrern geben 15 an, hauptberuflich Lkw zu fahren. Weitere neun Fahrer gehen der Tätigkeit nebenberuflich und sieben als Aushilfe nach. Es geben neun der Teilnehmer an, primär Verteilerverkehr zu fahren, sieben Fernverkehr, sechs Baustellenverkehr wohingegen 15 einen Mix der genannten Verkehrsarten im Alltag fahren. Für die Analyse der Blickdaten wird das auszuwertende Datenset auf $n = 27$ Probanden beschränkt, weil der Qualitätsparameter des verwendeten Blickerfassungssystems für $n = 4$ Messungen unzureichend ausfällt und die Datensätze nicht plausible Werte enthalten.

Forschungsfrage F1: Sicherheit

Hypothese H1: Fahrgüte. Zur Überprüfung von H1 wird zunächst das Spurhaltemaß SDLP statistisch verglichen. Die deskriptiven Werte können Tabelle D.1 im Anhang entnommen werden. Abbildung 6.6 zeigt die Verteilungen der Werte anhand von Boxplots. Die Voraussetzungen für einen parametrischen t-Test mit verbundenen Stichproben sind nicht erfüllt, weil ein durchgeführter Saphiro-Wilk-Test eine Verletzung der Normalverteilung der Gruppendifferenzen anzeigt ($W = 0,902$ und $p = 0,008$). Folglich wird ein nichtparametrischer Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test berechnet, der gemäß des auf $\alpha_{bonf} = 0,025$ korrigierten Signifikanzniveaus keine Unterschiede zwischen den Gruppen aMMS (Median 0,11) und sMMS (Median 0,08) anzeigt ($V = 354$ und $p = 0,037$).

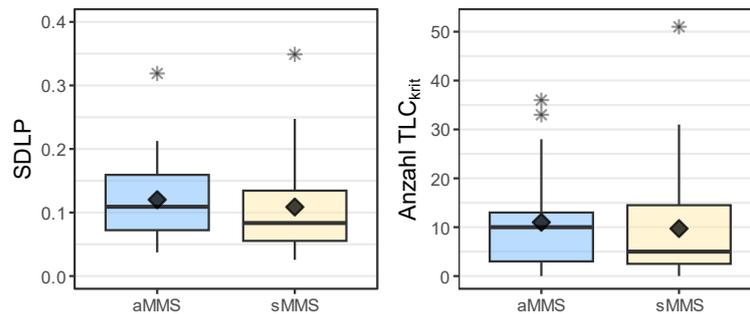


Abbildung 6.6: Boxplots der für die Fahrgüte relevanten Metriken SDLP und TLC_{krit} mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern

Die Überprüfung der Normalverteilung der Differenzen für die durchschnittliche Anzahl an TLC_{krit} Events ergibt, dass eine Verletzung vorliegt ($W = 0,827$ und $p < 0,001$). Ein nichtparametrischer Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test wird durchgeführt, der ebenfalls keine Unterschiede zwischen den Gruppen anzeigt ($V = 311,5$ und $p = 0,105$). Es wird festgestellt, dass die Mittelwerte der Gruppen auf vergleichbarem Wertenniveau liegen, der Median der Gruppe sMMS mit einem Wert von 5 jedoch deutlich niedriger ausfällt als bei der aMMS mit 10. Die Nullhypothese H_{10} wird beibehalten.

Hypothese H2: Blickabwendung. Zur Überprüfung der Blickzuwendungszeiten wird zunächst die durchschnittliche Blickzeit pro Bedienungsaufgabe statistisch anhand des korrigierten Signifikanzniveaus $\alpha_{bonf} = 0,025$ zwischen den MMS verglichen. Die deskriptiven Werte sind Tabelle D.2 im Anhang zu entnehmen, Abbildung 6.7 zeigt die Werteverteilung anhand von Boxplots.

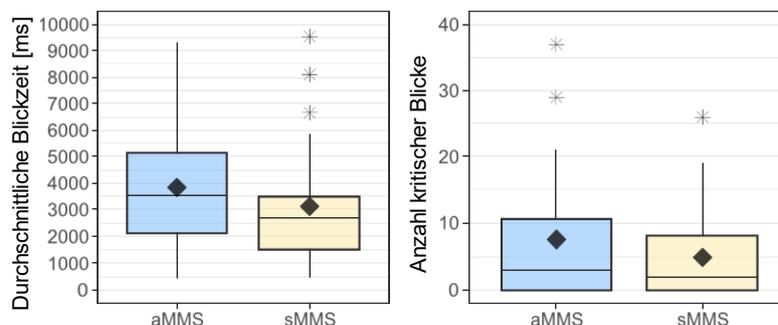


Abbildung 6.7: Boxplots der für die Blickabwendung relevanten Metriken der durchschnittlichen Blickzeit sowie der Anzahl von kritisch langen Blickzuwendungen mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern

Ein durchgeführter Saphiro-Wilk-Test zeigt keine Verletzung der Normalverteilung der Wertedifferenzen für die Blickzuwendungszeit an ($W = 0,931$ und $p = 0,072$). Der nachfolgend durchgeführte parametrische t-Test verfehlt das adjustierte Signifikanzniveau mit $t(26) = 1,999$ und $p = 0,056$.

Eine für die durchschnittliche Anzahl kritischer Blicke durchgeführte Überprüfung der Normalverteilung der Gruppendifferenzen zeigt keine Verletzung an ($W = 0,93$ und $p = 0,073$), weshalb ein parametrischer t-Test durchgeführt wird. Dieser verfehlt das nach Bonferroni korrigierte Signifikanzniveau mit $t(26) = 2,190$ und $p = 0,038$. Die Nullhypothese H_{20} wird nicht verworfen.

Forschungsfrage F2: Gebrauchstauglichkeit

Hypothese H3: Subjektive Usability. Für den Vergleich der wahrgenommenen Gebrauchstauglichkeit wird der Fragebogen SUS ausgewertet und statistisch anhand des Signifikanzniveaus von $\alpha = 0,05$ geprüft. Die deskriptiven Werte sind Tabelle D.3 zu entnehmen, die Werteverteilung wird in Abbildung 6.8 grafisch dargestellt.

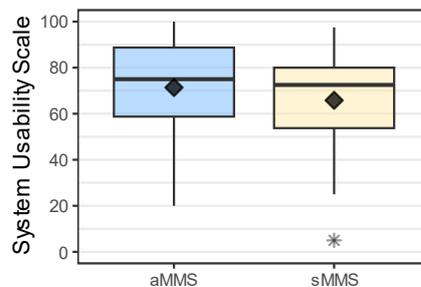


Abbildung 6.8: Boxplot der subjektiven Gebrauchstauglichkeit anhand des System Usability Scale Fragebogens mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern

Die Durchführung eines Saphiro-Wilk-Tests weist auf keine Verletzung der Normalverteilung der Gruppendifferenzen hin ($W = 0,984$ und $p = 0,902$), weshalb ein parametrischer t-Test durchgeführt wird. Dieser ist mit $t(30) = 0,958$ und $p = 0,346$ statistisch nicht signifikant. Die Nullhypothese H_{30} wird folglich nicht verworfen.

Das Wertenniveau des Fragebogens liegt für beide Systeme im Bereich des Adjektivs „gut“ nach Bangor et al. [86, S. 121], wie aus Abbildung D.2 im Anhang hervorgeht.

Hypothese H4: Objektive Usability. Für die Überprüfung von Hypothese H4 werden die durchschnittliche Bedienzeit pro Bedienaufgabe und die durchschnittliche Anzahl begangener Bedienfehler zwischen den MMS anhand des adjustierten Signifikanzniveaus $\alpha_{bonf} = 0,025$ statistisch auf Unterschiede geprüft. Die deskriptiven Werte sind Tabelle D.4 im Anhang zu entnehmen, die Werteverteilungen sind anhand von Boxplots in Abbildung 6.9 dargestellt.

Ein Saphiro-Wilk-Test zur Prüfung auf normalverteilte Gruppendifferenzen zeigt für die durchschnittliche Bedienzeit eine Verletzung an ($W = 0,899$ und $p = 0,007$), weshalb mit einem nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test fortgefahren wird. Dieser zeigt mit $V = 437$ und $p < 0,001$ signifikante Gruppendifferenzen zwischen der aMMS (Median = 6,86) und sMMS (Median = 4,22) an. Die Effektstärke von $r = 0,665$ ist nach Cohen [276, S. 79-91] als starker Effekt zu interpretieren.

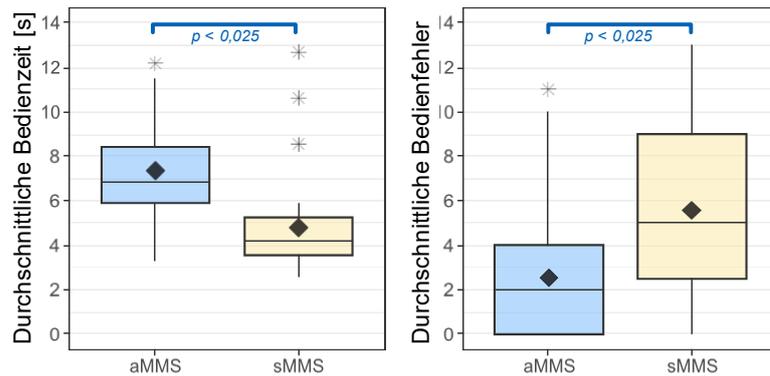


Abbildung 6.9: Boxplots der für die objektive Erfassung der Gebrauchstauglichkeit relevanten Metriken mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern mit eingezeichneten signifikanten Gruppenunterschieden

Eine Analyse der durchschnittlichen Anzahl an Bedienfehlern zeigt, dass die Gruppendifferenzen nicht normalverteilt sind ($W = 0,865$ und $p = 0,001$), weshalb ein nichtparametrischer Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test durchgeführt wird. Dieser deutet auf signifikante Differenzen zwischen den Gruppen aMMS (Median = 2) und sMMS (Median = 5) hin ($V = 9$ und $p < 0,001$). Die Effektstärke ist mit $r = -0,688$ als stark einzustufen [276, S. 79-91].

Die durchgeführten statistischen Tests zeigen beide statistische Gruppendifferenzen an, weshalb von Unterschieden ausgegangen und die Alternativhypothese H_{4A} angenommen wird. Die Ergebnisse der durchschnittlichen Bedienzeit fallen zugunsten der sMMS aus, wohingegen die durchschnittliche Anzahl der Bedienfehler bei der Verwendung der aMMS niedriger ausfällt.

Forschungsfrage F3: Nutzerakzeptanz

Hypothese H5: Akzeptanz. Für die Überprüfung von Hypothese H5 werden die Dimensionen der Nützlichkeit und Zufriedenheit des standardisierten Fragebogens zur Erhebung der Akzeptanz nach Van der Laan et al. [96] zwischen den MMS anhand des adjustierten Signifikanzniveaus von $\alpha_{bonf} = 0,025$ verglichen.

Beide Gruppendifferenzen sind normalverteilt (Nützlichkeit $W = 0,955$ und $p = 0,209$, Zufriedenheit $W = 0,956$ und $p = 0,233$). Die deskriptiven Werte sind Tabelle D.5 im Anhang zu entnehmen, die Werteverteilungen sind anhand von Boxplots in Abbildung 6.10 dargestellt.

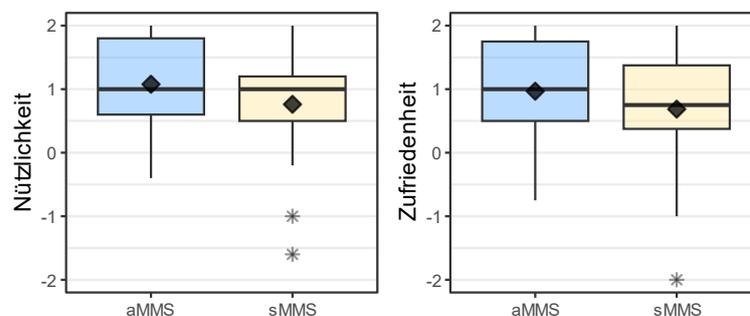


Abbildung 6.10: Boxplots der Skalen des Fragebogens nach Van der Laan et al. [96] zur Messung der Akzeptanz mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern

Ein durchgeführter t-Test zeigt keine signifikanten Differenzen zwischen den Systemen auf der Skala der wahrgenommenen Nützlichkeit an ($t(30) = 1,492$ und $p = 0,146$). Für die Skala der Zufriedenheit werden ebenfalls keine signifikanten Teststatistiken berichtet ($t(30) = 1,108$ und $p = 0,277$). Die Nullhypothese H_{50} wird basierend auf den statistischen Resultaten nicht verworfen.

Hypothese H6: Präferenz. Im nächsten Schritt soll für die Überprüfung von Hypothese H6 die Präferenz der Nutzergruppe statistisch untersucht werden. Die Werteverteilung kann Abbildung 6.11 entnommen werden.

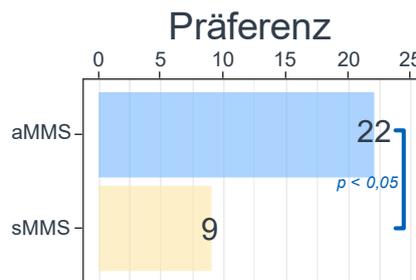


Abbildung 6.11: Balkendiagramm der Präferenz der Lkw-Fahrer mit eingezeichneten signifikanten Gruppenunterschieden

Zur statistischen Überprüfung wird mittels eines Chi-Quadrat-Anpassungstests geprüft, ob die Werte von einer zu erwartenden Verteilung abweichen. Hierfür wird die Annahme getroffen, dass sich bei einer vergleichbaren Akzeptanz beider Systeme gleich viele Personen für die beiden Systeme entscheiden würden. Die beobachtete Verteilung unterscheidet sich von einer gleichmäßigen Verteilung mit $\chi^2(1) = 5,452$ und $p = 0,020$ signifikant. Der Effekt ist mit $w = 0,419$ nach Cohen als mittlere Effektstärke zu interpretieren [277, S. 157]. Es entscheiden sich demnach mehr Fahrer für die aMMS.

Hypothese H7: User Experience. Für die Überprüfung von Hypothese H7 werden die sechs Dimensionen des Fragebogens User Experience Questionnaire nach Schrepp et al. [278] anhand von t-Tests und des adjustierten Signifikanzniveaus von $\alpha_{bonf} = 0,008$ verglichen. Die Voraussetzung normalverteilter Gruppendifferenzen ist für alle Dimensionen erfüllt, wie Tabelle D.6 im Anhang entnommen werden kann. Die deskriptiven Werte sind Tabelle D.7 im Anhang zu entnehmen, die Werteverteilungen sind anhand von Boxplots in Abbildung 6.12 dargestellt.

Ein für den Vergleich der Attraktivität durchgeführter t-Test zeigt keine Signifikanz ($t(30) = 1,347$ und $p = 0,188$). Für die auf die pragmatische Qualität des Systems einzählenden Dimensionen der Durchschaubarkeit ($t(30) = 0,036$ und $p = 0,971$), Effizienz ($t(30) = 0,374$ und $p = 0,711$) und Steuerbarkeit ($t(30) = -0,173$ und $p = 0,863$) werden keine signifikanten Differenzen gefunden. Die der hedonischen Qualität des Systems zuzuschreibenden Dimensionen der Originalität ($t(30) = 7,529$ und $p < 0,001$) und Stimulation ($t(30) = 5,678$ und $p < 0,001$) zeigen hingegen signifikante Differenzen an und weisen für die Gruppe aMMS ein höheres Wertenniveau auf. Die Effekte der Gruppenunterschiede sind bei beiden Dimensionen nach Cohen [276, S. 24-26] als starker Effekt zu interpretieren (Originalität $d = 1,35$ und Stimulation $d = 1,02$). Gemäß des von Schrepp et al. [278] bereitgestellten Auswertungstool liegen für das System aMMS alle sechs Skalen im „positiven“ Bereich, wie aus Abbildung D.3 im Anhang hervorgeht. Bei der Analyse der sMMS ist auffallend, dass die Bewertungen der Skalen Stimulation und Originalität niedriger ausfallen und laut Auswertungstool im Bereich neutral bis negativ einzuordnen sind, wie aus Abbildung D.4 im Anhang hervorgeht.

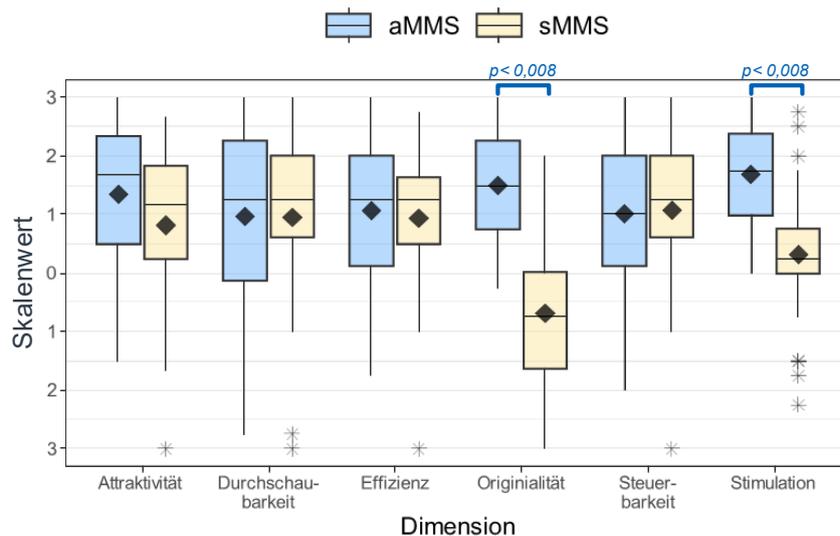


Abbildung 6.12: Boxplots der anhand User Experience Questionnaire erfassten User Experience mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern sowie eingezeichneten signifikanten Gruppenunterschieden

Zusammenfassend wird die Alternativhypothese $H7_A$ angenommen. Es ist von Unterschieden hinsichtlich der User Experience zugunsten der aMMS auszugehen, weil diese als hedonischer wahrgenommen wird.

Explorative Auswertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der explorativen Auswertung berichtet.

Mentales Modell. Für die explorative Untersuchung des mentalen Modells wird eine multivariate Varianzanalyse (MANOVA) durchgeführt. Dabei stellen die beiden Zeitpunkte des erfassten mentalen Modells (initial und retrospektiv) die unabhängigen Variablen dar. Die vier Skalen des Fragebogens zur Erfassung des MMs werden als abhängige Variablen betrachtet. Anzumerken ist, dass die Gruppen initial ($N = 75$) und retrospektiv ($N = 31$) unterschiedlich groß sind und es sich um unterschiedliche Stichproben handelt. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Tests liegt ein between-subject Design vor. Der Datensatz des initialen mentalen Modells resultiert aus dem in Kapitel 5.3.2 aufgezeigten Vorgehen und kann online abgerufen werden [260]. Die Werteverteilung wird in Abbildung 6.13 anhand von Boxplots gezeigt, Tabelle D.8 im Anhang können die deskriptiven Werte entnommen werden.

Zur Prüfung der Voraussetzungen wird festgestellt, dass keine einzelnen Ausreißer mit dem Prädikat „extrem“ vorliegen. Gemäß des durchgeführten Boxschen M-Test liegt eine Verletzung der Homogenität der Kovarianz vor ($M = 26.1$ und $p = 0,004$), was nach Field et al. in Kombination mit den unterschiedlich großen Gruppengrößen eine Verletzung darstellt [225, S. 733]. Ein durchgeführter Levene-Test zeigt eine Verletzung der Homoskedastizität für die Skalen Intelligenz ($p = 0,026$), Kontextsensitivität ($p = 0,009$) und Nutzerkontrolle ($p = 0,023$) an. Der Spahiro-Wilk-Test zeigt eine Verletzung der multivariaten Normalverteilung an ($W = 0,912$ und $p < 0.001$). Aufgrund des explorativen Charakters der Untersuchung wird entschieden, mit der Durchführung des Tests fortzufahren, wenn auch die Aussagekraft der Ergebnisse eingeschränkt werden muss. Der p -Wert wird nachfolgend nach Field et al. über Pillai's Trace bestimmt [225, S. 733].

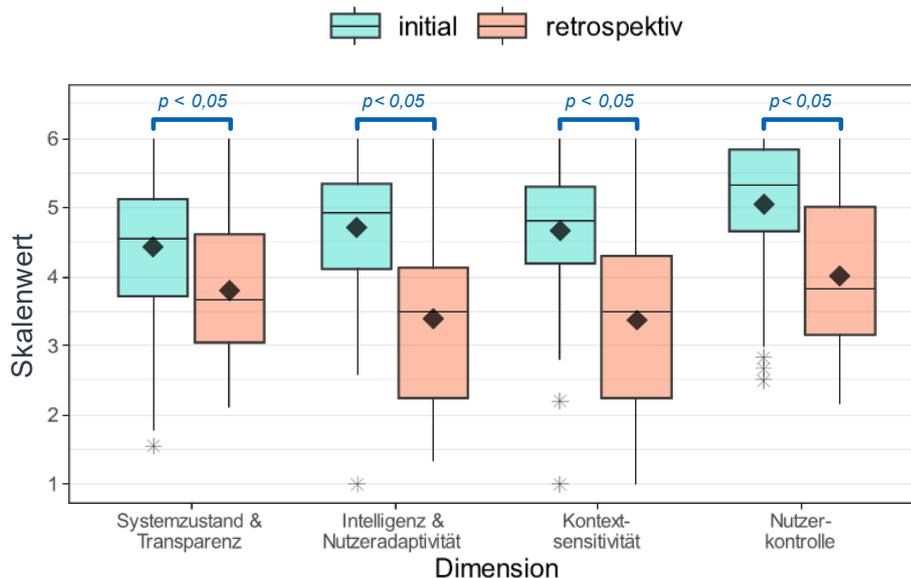


Abbildung 6.13: Boxplots des initialen und retrospektiven mentalen Modells mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern (1 = stimme überhaupt nicht zu, 6 = stimme voll zu) sowie eingezeichneten signifikanten Unterschieden

Die durchgeführte MANOVA zeigt einen signifikanten Einfluss des Zeitpunkts auf das mentale Modell an ($F(4, 101) = 10,158$ und $p < 0,001$). Zur Überprüfung, zwischen welchen Subskalen der Gruppen Unterschiede vorliegen, wird eine Post-Hoc Analyse mittels Varianzanalysen durchgeführt. Es wird ein Gruppenunterschied bei der Skala Systemzustand mit $F(1, 104) = 7,944$ und $p = 0,006$ sowie einer Effektstärke $\eta^2 = 0,071$ angezeigt, die als mittlerer Effekt nach Cohen einzuordnen ist [276, S. 283-287]. Für die Skala Intelligenz liegt ebenfalls ein Unterschied mit $F(1, 104) = 34,44$ und $p < 0,001$ sowie einer Effektstärke $\eta^2 = 0,249$ vor, die nach Cohen als großer Effekt zu interpretieren ist [276, S. 283-287]. Die Gruppen unterscheiden sich bezüglich der Skala Kontextsensitivität mit $F(1, 104) = 32,996$ und $p < 0,001$ sowie einem nach Cohen [276, S. 283-287] starken Effekt $\eta^2 = 0,241$ signifikant. Ein Unterschied liegt zudem bei der Skala der Nutzerkontrolle mit $F(1, 104) = 23,013$ und $p < 0,001$ sowie einer großen Effektstärke nach Cohen [276, S. 283-287] von $\eta^2 = 0,181$ vor.

Es wird geschlussfolgert, dass sich signifikante Differenzen zwischen dem initialen und retrospektiven mentalen Modell andeuten. Für alle vier Skalen des Fragebogens fällt das Wertenniveau in der Gruppe des retrospektiven Modells niedriger aus.

Offenes Feedback. Weiter wird das offene Feedback der Nutzer ausgewertet. Für die detaillierten Nennungshäufigkeiten der Vor- und Nachteile der aMMS und sMMS wird auf die Tabelle D.9 und Tabelle D.10 im Anhang verwiesen.

Eine Analyse der Nennungshäufigkeiten für die aMMS ergibt, dass die Probanden die zentrale Anordnung der Funktionen auf einem Bedienteil, die Beschriftung der Fahrzeugfunktionen, eine hohe Übersichtlichkeit der MMS sowie der kontextsensitive Charakter positiv wahrnehmen. Weiter wurden das haptische Feedback der aMMS, die eindeutige Bedienbarkeit sowie die verwendeten Symbole und Grafiken positiv hervorgehoben. Acht Probanden können auf mehrfache Nachfrage hin keine zu kritisierenden Aspekte der aMMS nennen, sechs Probanden regen eine höhere Positionierung des Bedienteils an. Weiter wird die ablenkende Bedienung während der Fahrt kritisiert sowie eine vergleichsweise lange benötigte Eingewöhnungsphase bemängelt.

Nach der Bedienung der sMMS berichten Probanden positiv von der einfachen Bedienung und nehmen die sMMS als ein altbewährtes Konzept wahr. Weiter fallen die hohe Übersichtlichkeit, die direkte Statusrückmeldung der Fahrzeugfunktionen sowie die physischen Hubtaster positiv auf. Zudem wird die Bedienung als selbsterklärend gelobt. Negativ fällt die Erreichbarkeit der Bedienfelder auf, insbesondere die Verortung von Funktionen im Kniebereich wird kritisiert. Weiter geben die Probanden an, teilweise die Symbole der Funktionen nicht zu kennen und Schwierigkeiten beim Unterscheiden ähnlich aussehender Symbole zu haben. Es wird die hohe räumliche Verteilung der Bedienfelder sowie die altmodische Anmutung der sMMS kritisiert.

6.3 Diskussion der Fahrsimulatorstudie

Im Rahmen der durchgeführten Fahrsimulatorstudie wurde unter Einbezug der anvisierten Zielgruppe die herkömmliche sMMS mit einer adaptiven und digitalisierten MMS verglichen.

6.3.1 Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der durchgeführten Hypothesentests können Abbildung 6.14 entnommen werden. Diese wurden durchgeführt, um die aufgestellten Forschungsfragen F1-F3 hinsichtlich der Sicherheit, Gebrauchstauglichkeit sowie Nutzerakzeptanz der beiden Systeme zu vergleichen.

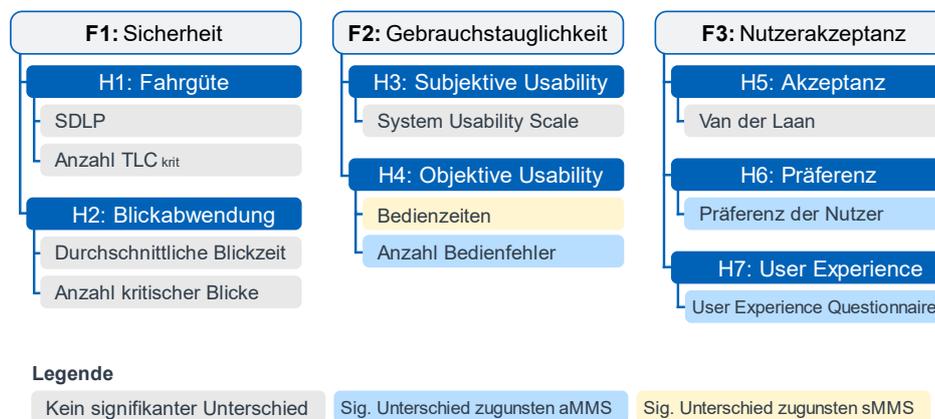


Abbildung 6.14: Übersicht über die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Fahrsimulatorstudie für die Forschungsfragen F1-F3 mit untergeordneten Hypothesen H1-H7

Forschungsfrage F1: Sicherheit. Für die Untersuchung der Sicherheit wurden die Fahrgüte sowie die visuelle Ablenkung von der Fahraufgabe untersucht und zwischen den Systemen verglichen. Die über die SDLP sowie die Anzahl kritischer TLC Ereignisse quantifizierte Fahrgüte zeigte bei einem Vergleich keine signifikanten Differenzen an. Anzumerken ist, dass das korrigierte Signifikanzniveau beim Vergleich der SDLP knapp verfehlt wurde. Die Korrektur wurde jedoch zur Vermeidung einer Alphafehler-Kumulierung durchgeführt. Das Wertenniveau fiel in der Gruppe aMMS höher aus, wobei höhere Werte auf eine Fahrerablenkung schließen lassen [69, S. 7]. Es wird daher empfohlen, in weiteren Studien unter Einbezug einer größeren Stichprobe zu überprüfen, ob Unterschiede aufgedeckt werden können.

Dieses Ergebnis steht im Kontrast zu Studienergebnissen aus dem Pkw-Bereich. So konnte Walter [9] durch die Einführung von Adaptivität bei zwei von vier auszuführenden Bedienungsaufgaben eine signifikante Reduktion der SDLP beobachten [9, S. 125]. Bei einer weiteren von Pätzold

durchgeführten Studie beeinflusste die Adaptivität hingegen die SDLP nicht [27, S. 153-154]. Dies wiederum steht im Einklang mit Resultaten von Seitz [8], nach denen keine positive Beeinflussung der Fahrgüte von Lkw-Fahrern durch ein adaptives Informationsmanagement erreicht werden konnte [8, S. 102-103].

Die Auswertung der Blickabwendung zeigt ein vergleichbares Bild. So wurde für beide Maße keine signifikante Differenz festgestellt, wodurch die Nullhypothese beibehalten wurde. Das Wertenniveau liegt bei der durchschnittlichen Blickzeit und bei der Anzahl kritischer Blicke in der Gruppe aMMS auf einem höheren Wertenniveau. In Kombination mit dem für beide Blickmaße knapp verfehlten Signifikanzniveau wird argumentiert, dass sich eine tendenziell höhere visuelle Ablenkung von der Fahraufgabe andeutet. Vergleichbare Resultate werden von Pätzold [27] berichtet, die bei einem adaptiven Informationssystem eine in bestimmten Fahrszenen laut deskriptiven Werten höhere Blickabwendung feststellte, wobei ein statistischer Vergleich das Signifikanzniveau knapp verfehlte [27, S. 152].

Für alle aufgezeichneten Maße der Fahrgüte sowie der visuellen Ablenkung von der Fahraufgabe fielen die Wertenniveaus zugunsten der sMMS aus. Weiter verfehlen drei der vier Teststatistiken das korrigierte Signifikanzniveau knapp. Die Forschungsfrage F1 wird daher damit beantwortet, dass im vorliegenden Versuch keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Sicherheit gefunden wurden. Eine höhere Ablenkung des adaptiven Bedienkonzepts deutet sich in Anbetracht der deskriptiven Werte an, weshalb die Durchführung von Folgeuntersuchungen mit einer größeren Stichprobe zugunsten einer erhöhten Teststärke empfohlen wird. Im Rahmen dieser sollte geprüft werden, inwiefern das Ablenkungsniveau der adaptiven MMS durch eine Weiterentwicklung gesenkt werden kann oder ob dieses sich durch eine höhere Vertrautheit mit dem Konzept mit der Zeit senkt.

Forschungsfrage F2: Gebrauchstauglichkeit. Die Ergebnisse des standardisierten Fragebogens System Usability Scale [85] zeigen, dass Werte beider Systeme im als „gut“ zu interpretierenden Bereich liegen und sich nicht signifikant voneinander unterscheiden. Daraus wird geschlossen, dass beide Systeme grundlegend als gut bedienbar wahrgenommen werden. Eine wie von Walter [9] berichtete Verbesserung der Usability durch Adaptivität [9, S. 127-128] stellt sich jedoch nicht ein.

Bei den zusätzlich erfassten objektiven Maßen liegen hingegen für die durchschnittliche Bedienzeit sowie die Anzahl durchschnittlicher Bedienfehler signifikante Differenzen vor. Auffällig ist, dass der Vorteil einmal beim adaptiven und einmal beim statischen Bedienkonzept liegt. So erfolgt die Bedienung mit der statischen MMS schneller, die Fahrer begehen hingegen mit der adaptiven MMS weniger Bedienfehler. Die im Vergleich zur statischen MMS langsamere Bedienung steht im Widerspruch zu den in Kapitel 2.2.2 theoretisch hergeleiteten Vorteile einer adaptiven MMS. So wurde argumentiert, dass gemäß dem Fitts'schen [112] sowie Hickschen Gesetz [111] eine verbesserte Bedienzeit erreicht werden kann. Die Resultate stehen zudem im Kontrast zu einer von Walter [9] durchgeführten Studie, die ergab, dass die Bedienzeit bei drei von vier Aufgaben durch Adaptivität verbessert werden konnte [9, S. 124]. Pätzold hingegen berichtet von keiner Verbesserung der Bedienzeit durch Adaptivität [27, S. 155].

Ein Erklärungsansatz hierfür ist die von Walter [9] getroffene Erkenntnis, dass ein adaptives System mit steigendem Schwierigkeitsgrad der Aufgabe einen stärkeren Vorteil entfalten kann [9, S. 128]. Es kann argumentiert werden, dass das in der vorliegenden Untersuchung durchgeführte Bedienen von Funktionen mit einem binären Status eine verhältnismäßig einfache Aufgabe darstellt. Weiter wird analog zu der Diskussion von Forschungsfrage F1 vermutet, dass das gegenteilige Resultat zumindest teilweise auf die hohe Vertrautheit mit der statischen MMS

zurückzuführen ist, wohingegen die Interaktion mit der adaptiven MMS als Erstkontakt umschrieben werden kann. Im Gegensatz zur vorliegenden Studie wird in den Ausführungen von Walter [9] und Pätzold [27] von keiner Vorerfahrung der Probanden mit dem verglichenen statischen Bedienkonzept berichtet. Folgestudien sollten deshalb die Entwicklung der Bedienzeit nach einer längeren Eingewöhnungsphase mit dem adaptiven System untersuchen.

Die höhere Anzahl an Fehlbedienungen bei der Interaktion mit der statischen MMS lässt vermuten, dass die Beschriftung der Funktionsbezeichnungen, die nur bei der aMMS vorhanden war, zu weniger Fehlbedienungen beigetragen hat.

Forschungsfrage F2 wird damit beantwortet, dass die Gebrauchstauglichkeit beider Systeme grundlegend auf einem vergleichbaren Niveau liegt, bei einzelnen Maßen jedoch Unterschiede bestehen. So erfolgt die Bedienung von Funktionen mit der sMMS schneller, mit der aMMS hingegen mit weniger Bedienfehlern. Es wird eine Analyse der Konsequenzen einer erhöhten Bedienzeit beziehungsweise vermehrten Bedienfehlern in Folgearbeiten empfohlen, um eine belastbare Abwägung der Vor- und Nachteile der Gebrauchstauglichkeit zu treffen. Weiter sollten Äquivalenztests für die Maße durchgeführt werden, bei denen keine signifikanten Differenzen gefunden wurden.

Forschungsfrage F3: Nutzerakzeptanz. Zur Überprüfung der Akzeptanz wurden die Systeme anhand eines standardisierten Fragebogens nach Van der Laan et al. [96] bewertet und die resultierenden Werte zwischen den beiden Bedienkonzepten statistisch verglichen. Für die Dimensionen der Nützlichkeit sowie Zufriedenheit wurden keine signifikanten Differenzen berichtet. Eine wie von Köhler [26] durch die Einführung eines adaptiven Informationssystems berichtete Erhöhung beider Skalen [26, S. 90] wird nicht erreicht.

Hingegen fiel die Präferenz eindeutig zugunsten der adaptiven MMS aus. Auf die Frage hin, welches Konzept die Fahrer bevorzugen würden, entschieden sich 22 der 31 Fahrer für das adaptive Bedienkonzept. Aus diesem Nutzungswunsch wird geschlussfolgert, dass eine hohe Bereitschaft in der Nutzergruppe vorliegt, das neuartige Konzept zu akzeptieren. Dies ist insofern ein positives Resultat, als dass nach Walter [9] das Erreichen von Nutzerakzeptanz für adaptive MMS wichtig ist [9, S. 61] und eine der hauptsächlichen Herausforderungen darstellt [9, IX].

Die Ergebnisse des standardisierten Fragebogens zur Erfassung der User Experience [278] bestätigen die positive Wahrnehmung des adaptiven Systems. Während für die Skalen der wahrgenommenen pragmatischen Qualität sowie Attraktivität keine Differenzen gefunden wurden, sprechen signifikante Differenzen bei der hedonischen Qualität für eine höhere User Experience der aMMS. Die vorliegende hohe hedonische Qualität der aMMS steht im Einklang mit Ergebnissen von Walter [9, S. 90] und Garzon [28, S. 154-155].

Forschungsfrage F3 wird damit beantwortet, dass die Nutzerakzeptanz zugunsten der aMMS ausfällt. Begründet wird dies damit, dass die Mehrheit der Nutzer das adaptive Bediensystem präferieren und das System als hedonischer wahrgenommen wird.

Explorative Auswertung des mentalen Modells. Das retrospektive mentale Modell der Nutzer und somit deren Vorstellung von den Ausprägungen des Systems wurde anhand eines entwickelten Fragebogens nach der Interaktion erhoben. Das resultierende MM wird mit dem zuvor erhobenen initialen MM (Kapitel 5.3 und Veröffentlichung [100]) verglichen. Der statistische Vergleich zeigt, dass die Werte aller vier Skalen signifikante Gruppenunterschiede anzeigen. Dabei liegt das Wertenniveau für das retrospektive MM auf einem niedrigeren Niveau. Daraus wird geschlussfolgert, dass die Nutzer dem System im Vorfeld höhere Ausprägungen der abgefragten

Eigenschaften wie der Intelligenz des Systems zuschreiben als nach der tatsächlichen Interaktion mit dem System. Dieses Ergebnis unterstützt die von Gena [120] getroffene Feststellung, dass Nutzer an adaptive Systeme eine hohe Erwartungshaltung haben [120, S. 1].

Weiter zeigen die Ergebnisse, dass eine hohe Erwartungshaltung gegenüber der wahrnehmbaren Intelligenz des Systems besteht. Es wird angemerkt, dass in der vorliegenden Studie eine hohe Erkennungsgüte angenommen und simuliert wurde. Eine solche sollte bei der technischen Implementierung der Situationserkennung ebenfalls angestrebt werden, um nicht eine noch höhere Diskrepanz zwischen der Erwartungshaltung der Nutzer und der wahrgenommenen Intelligenz zu riskieren, die zu Lasten der Akzeptanz gehen könnte. Weiter sollte bei der Systemgestaltung darauf geachtet werden, dem Nutzer nicht durch Gestaltungshinweise oder Marketingunterlagen eine zu hohe Systemintelligenz zu vermitteln, um die ohnehin hohe Erwartungshaltung nicht zu überhöhen.

Die Studienergebnisse unterliegen Limitationen, auf die im Folgenden eingegangen wird.

6.3.2 Limitationen der Studie

In diesem Abschnitt werden limitierende Faktoren der Studie aufgeführt, die hinsichtlich der nach Bortz und Döring [143] wesentlichen Testgütekriterien der Reliabilität, Validität und Objektivität [143, S. 195] relevant sind. So wird die Validität von im Fahrsimulator durchgeführten Studien durch ein anderes Gefahrenempfinden der Probanden und technische Einschränkungen beeinflusst [67, S. 153]. Eine solche technische Limitation stellt im vorliegenden Versuch das Fehlen von Bewegungen und Vibrationen dar, welche die Interaktion möglicherweise beeinflusst hätten. Es wird daher empfohlen, die Bedienkonzepte in einer Realfahrzeugstudie unter Einwirkung von Schwingungen und Vibrationen zu wiederholen.

Weiter wurde in dem vorliegenden Versuch die Situationserkennung des adaptiven Bedienkonzepts unter Verwendung eines definierten Ablaufs nachgestellt, um in diesem frühen Entwicklungsstadium eine Erlebbarkeit des Prototyps zu ermöglichen. Dabei erkannte das System jederzeit die korrekte Arbeitsphase, wohingegen bei einer realen Implementierung teilweise mit falschen Erkennungen zu rechnen ist, wie die Arbeit von Wiedner et al. [139, S. 13015] anhand der Detektion von vergleichbar komplexen Fahrsituationen zeigt. Einbußen bei der Erkennungsgüte beeinflussen wiederum die Nützlichkeit und Akzeptanz adaptiver MMS, wie in Abschnitt 3.1.3 dargelegt wurde. Folgearbeiten sollten die Implementierung mit dem Ziel einer hohen Erkennungsgüte umsetzen, um das System unter Verwendung dieser technischen Umsetzung erneut hinsichtlich der Nutzerakzeptanz zu prüfen. Diese Prüfung sollte im Rahmen einer Feldstudie unter Berücksichtigung der verschiedenen Verkehrsarten und Einsatzzwecke von Nutzfahrzeugen erfolgen.

Die statistischen Tests zur Auswertung der Hypothesentests verfehlten in sechs von zehn Fällen das Signifikanzniveau. Nach Morey [279] besteht die Möglichkeit, dass ausbleibende Signifikanz auf einen kleinen Effekt zurückzuführen ist [279] und in der Studie nur nicht entdeckt wurde. Die praktische Relevanz eines Effekts hängt davon ab, welche Auswirkungen zu erwarten sind [280, S. 3-4]. Es wird argumentiert, dass bei sicherheitskritischen Maßen wie der Fahrgüte bereits kleine Effekte von Bedeutung sind, da bereits eine leichte Verschlechterung zu einem vermeidbaren Unfall führen kann. Um einen solchen kleinen Effekt im Rahmen einer Studie aufzudecken, ist unter anderem eine besonders große Stichprobe nötig, was sich bei Lkw-Fahrern als schwierig gestaltet. So ist die Anzahl an potenziellen Teilnehmern begrenzt, weil nur wenige Lkw-Fahrer bereit sind, an einer Studie vor Ort unter Laborbedingungen

teilzunehmen [64, S. 4]. Der benötigte Stichprobenumfang kann anhand der zu erwartenden Effektgröße im Voraus abgeschätzt werden [143, S. 627-633]. Da aus dem Stand der Technik keine übertragbaren Effektstärken abgeleitet werden konnten, wurde darauf verzichtet.

Insbesondere bei den Maßen der Fahrgüte sowie der visuellen Ablenkung können Unterschiede nicht ausgeschlossen werden. So zeigen die statistischen Tests keine signifikanten Differenzen an, jedoch wird anhand der deskriptiven Werte eine leicht beeinträchtigte Fahrgüte sowie erhöhte visuelle Ablenkung durch die adaptive MMS vermutet. Folgestudien sollten deshalb die Verwendung eines größeren Stichprobenumfangs anstreben, um die Teststärke zu erhöhen. Im Umkehrschluss könnte mit anhand von Lakens [229] empfohlenen Äquivalenztests [229, S. 355] geprüft werden, ob tatsächlich kein Unterschied zwischen den Systemen besteht.

Die unterschiedlich starke Vorerfahrung mit den beiden Bedienkonzepten stellt eine weitere Limitation dar. So befindet sich die statische MMS bei diversen Nutzfahrzeugherstellern in leicht abgeänderter Form seit geraumer Zeit im Serieneinsatz. Es ist davon auszugehen, dass das Probandenkollektiv aus Lkw-Fahrern in der Bedienung trainiert ist. Im Kontrast hierzu stellte die Interaktion mit der adaptiven MMS den Erstkontakt mit einer prototypischen Umsetzung dar. Trotz der durchgeführten Eingewöhnungsphase sind langfristig Lerneffekte beim Umgang mit der aMMS zu erwarten. Dieser Erfahrungsunterschied könnte die in der Studie vorgefundene Differenz der Bediengeschwindigkeit zugunsten der statischen MMS begünstigt haben. Weiter kann vermutet werden, dass die Fahrer sich die räumliche Verortung der Funktionen bei der sMMS aufgrund der hohen Vorerfahrung eingepägt haben. Dies könnte reflexartige und schnelle Bedienabläufe begünstigen und zu den kurzen Bedienzeiten beigetragen haben. Andererseits gilt es bei einem Wechsel auf die aMMS zu untersuchen, ob bei zeitkritischen Bedienhandlungen reflexartig nach der von der sMMS gewohnten Verortung der physischen Bedienteile am Fahrerarbeitsplatz gegriffen wird.

Das umgesetzte adaptive Bedienkonzept kombiniert zudem mehrere neue Aspekte. So verfügt die adaptive MMS über eine berührungssensitive Bedienhardware, ein sich an den Kontext adaptierendes Interaktionskonzept sowie eine örtliche Bündelung aller Funktionen in einen Bedienbereich in der Mittelkonsole. Welchen individuellen Anteil auf das Studienergebnis diese Faktoren hatten, vermag das gewählte Studiendesign nicht aufzuklären.

Die Rekrutierung der Probanden war aufgrund des Standorts des Fahrsimulators auf den Großraum München sowie deutschsprachige Teilnehmer beschränkt. Nach Diederichs et al. [64] handelt es sich bei Teilnehmern, die für eine Studienteilnahme im Labor bereit sind, um eine selektive Untergruppe an Lkw-Fahrern [64, S. 2]. Folglich dürfte die Stichprobe nicht der Grundgesamtheit an Lkw-Fahrern entsprechen, auch wenn die demografischen Daten im Einklang mit Ergebnissen einer groß angelegten Querschnittsstudie [54] liegen. Einen möglichen Lösungsansatz stellen Diederichs et al. [64] in Form eines mobilen Lkw-Fahrersimulators vor. Dieser erlaubt es, auf Rastplätzen Fahrer zu akquirieren und Versuche in deren gewohnter Umgebung durchzuführen [64, S. 4-7].

Wie in Abschnitt 2.1.3 dargelegt, existieren neben den primären Verkehrsarten des Verteiler-, Fern- und Baustellenverkehrs weitere hoch spezialisierte und diverse Anwendungsgebiete für Nutzfahrzeuge. Da sich nach Stecher [58] die Bedienhandlungen, Arbeitsaufgaben und Tätigkeiten der Fahrer je nach Einsatzsegment unterscheiden [58, S. 62], sollte eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Einsatzzwecke von Nutzfahrzeugen geprüft werden.

6.3.3 Zusammenfassung und Fazit

In Kapitel 6.1 wurden die Forschungsfragen F1-F3 aufgestellt, um zu prüfen, ob sich ein adaptives Bedienkonzept für Nutzfahrzeuge hinsichtlich der Sicherheit, Gebrauchstauglichkeit sowie Nutzerakzeptanz von einem statischen Bedienkonzept unterscheidet.

Anhand der in Abschnitt 6.2.4 dargelegten Ergebnisse der statistischen Tests und unter Berücksichtigung der in Abschnitt 6.3.2 aufgeführten Limitationen wird aus dem Vergleich geschlossen, dass sich die Systeme voneinander unterscheiden.

So weist die statische MMS eine tendenziell geringere visuelle Ablenkung auf, die sich auch in einer gemäß den deskriptiven Werten etwas besseren Fahrgüte niederschlägt. Zwar sind die Diskrepanzen zumindest anteilig auf die hohe Vorerfahrung mit der statischen MMS zurückzuführen, jedoch handelt es sich bei einem Nutzfahrzeug, wie in Abschnitt 2.1.3 dargelegt, vorrangig um ein Arbeitsgerät, bei dem die Sicherheit im Vordergrund steht. Daher sollte die Ablenkung von der Fahraufgabe weiter untersucht und verringert werden. Bezüglich der Gebrauchstauglichkeit liegen beide Bedienkonzepte in Summe gleichauf, wobei die adaptive MMS eine fehlerfreiere und die statische eine schnellere Bedienung aufweist. Die Nutzerakzeptanz fällt zugunsten der adaptiven MMS aus, weil sich mehr Fahrer für dieses Konzept entscheiden und die User Experience des Systems als hedonischer wahrgenommen wird. Weiter wurde gezeigt, dass das mentale Modell der Fahrer vor der Nutzung von der retrospektiven Wahrnehmung des Systems abweicht. Die Erwartungshaltung der Nutzer sollte durch die Gestaltung und Kommunikation des Produkts nicht noch weiter erhöht werden. Zudem sollte die Implementierung der Situationserkennung eine hohe Erkennungsgüte aufweisen.

Die Resultate der vorliegenden Studie bestätigen, dass die Einführung adaptiver Systeme wie in Abschnitt 2.2.2 und 2.2.3 dargelegt Vor- und Nachteile mit sich bringen. Dies legt den Schluss nahe, dass die resultierenden Vor- und Nachteile der Einführung eines adaptiven Systems von individuellen Faktoren wie der konkreten Umsetzung, den auszuführenden Aufgaben und deren Schwierigkeitsgrad, der Nutzergruppe sowie der als Referenz verwendeten statischen MMS abhängen. Die Einordnung der Studienergebnisse in den Stand der Forschung ist dementsprechend kein triviales Unterfangen. So stehen einzelne Ergebnisse der betrachteten Maße im Einklang mit einzelnen Untersuchungen vorheriger Forschungsarbeiten, wohingegen andere im Widerspruch stehen. Anzumerken ist, dass sich die referenzierten Forschungsarbeiten durch unterschiedlich umgesetzte Formen der Adaptivität und Anwendungsszenarien auszeichnen sowie mehrheitlich aus dem Pkw-Bereich stammen. Unterstützt wird diese Annahme einer eingeschränkten Übertragbarkeit durch die von Walter getroffene Erkenntnis, dass die konkrete Umsetzung der Adaptivität einen Einfluss darauf hat, ob die Usability verbessert wird oder nicht [9, S. 127-128]. Weiter zeigt sie auf, dass Adaptivität mit zunehmender Schwere der auszuführenden Bedienaufgabe einen stärkeren Vorteil entfalten kann [9, S. 128]. Der vorliegende Anwendungsfall der Aktivierung bzw. Deaktivierung von Funktionen ist verhältnismäßig einfach. Folgestudien sollten deshalb komplexere Anwendungsfälle bezüglich der Bedienung im Nutzfahrzeug untersuchen, etwa die Parametrierung von Fahrzeugfunktionen oder Interaktion mit Funktionen, die der tertiären Ebene der Fahrtätigkeit zuzuordnen sind.

Zusammenfassend ist die Übertragbarkeit von Studienergebnissen bezüglich adaptiver Systeme aufgrund einer Abhängigkeit vom verglichenen statischen Referenzsystem, der Form der Adaptivität und deren Umsetzung sowie der Schwere der Aufgaben und der Nutzergruppe nur eingeschränkt möglich.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Großteil unserer Güter wird heute und in absehbarer Zukunft durch Nutzfahrzeuge im Straßenverkehr transportiert. Entsprechend viel Zeit verbringen Lkw-Fahrer mit der Bedienung dieser Fahrzeuge, um unsere Waren sicher, schnell und wirtschaftlich zu befördern. Dem Fahrerarbeitsplatz von Nutzfahrzeugen ist daher bis zur Einführung von vollautomatisiert fahrenden Fahrzeugen eine hohe Bedeutung beizumessen. Er sollte zugunsten der Arbeitsbedingungen der Fahrer einfach zu bedienen und ansprechend sein. Aus Herstellersicht ist ebenfalls eine geringe Komplexität wünschenswert, weil möglichst viele Einsatzzwecke mit wenigen Hardwarevarianten abgedeckt werden sollen, um die Herstellungskosten zu senken. Dies stellt in Anbetracht einer bereits heute hohen und in Zukunft noch weiter ansteigenden Anzahl an Funktionen eine Herausforderung dar. Abhilfe versprechen adaptive Bedienkonzepte, die im Pkw-Bereich sowie bei Consumer-Electronics-Geräten bereits zum Einsatz kommen.

Der Ansatz klingt vielversprechend: Dem Fahrer werden über einen digitalisierten Bedienbereich nur noch die Funktionen angezeigt, die aktuell benötigt werden. Ein nutzerindividuelles Ändern der Funktionsbelegung kann über Software erfolgen, anstatt physische Hubtaster zu demontieren, umzustecken und neu zu verkabeln. Aus Herstellersicht können zahlreiche Einsatzzwecke mit einer einzigen Hardwarevariante abgedeckt werden, während das Markenimage durch das für die Branche neuartige Bedienkonzept erhöht wird.

Der Einsatz einer solchen Adaptivität geht mit Vor- und Nachteilen einher, die gegeneinander abzuwägen sind. Ob sich adaptive Bedienkonzepte für den Einsatz im Nutzfahrzeug eignen, wurde deshalb in Abschnitt 1.2 als zentrale Forschungsfrage definiert und im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Zur Beantwortung dieser Frage wurde im ersten Schritt des in Abschnitt 1.3 vorgestellten Vorgehens ein adaptives MMS für die Bedienung von Fahrzeugfunktionen im Nutzfahrzeug nutzerzentriert entwickelt. Dieses adaptive Bedienkonzept stellt den zentralen Neuheitswert dieser Arbeit dar und ist ein Novum für die Nutzfahrzeugbranche.

Im Rahmen der Gestaltung wurde zunächst festgelegt, was die Anpassung des Systems auslösen und wie diese definiert werden soll. Hierfür wurde der typische Arbeitsalltag der Lkw-Fahrer analysiert, woraufhin vier Arbeitsphasen als Kontext definiert wurden: Die *Vor- und Nachbereitung*, der Vorgang des *Be- und Entladens*, die eigentliche Ausübung der Fahraufgabe *Fahren* sowie das Einlegen von *Pausen*. Weiter wurde untersucht, zu welchem Zeitpunkt die Fahrer welche Fahrzeugfunktionen benötigen. Diese sollen dem Nutzer in Abhängigkeit von der aktuellen Arbeitsphase angezeigt werden. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Gestaltung der Adaptivität aus Nutzersicht liegt, wurden Implementierungsansätze und deren Auswirkungen auf das Nutzererlebnis diskutiert.

Adaptive MMS setzen voraus, dass die Funktionsbelegung von Bedienelementen dynamisch geändert werden kann. Hierfür wurde eine digitalisierte Bedienmodalität unter Einbezug von Nutzfahrzeugexperten sowie Lkw-Fahrern selektiert, bewertet und evaluiert. Als Ergebnis

entstand eine berührungssensitive displaybasierte Bedienhardware, die das Auffinden von interaktiven Bereichen durch auf dem Display aufgebrachten Fühlhilfen ermöglicht und die Betätigung von Funktionen durch haptisches Feedback bestätigt. Dies erleichtert, verglichen mit herkömmlichen Touchscreens, die Bedienung unter der im Nutzfahrzeug vorherrschenden Schwingungen und Vibrationen und reduziert die visuelle Ablenkung von der Fahraufgabe.

Unter Berücksichtigung der definierten Adaptivität und der festgelegten Bedienhardware wurde das Interaktionskonzept entworfen. In diesem Rahmen wird das initiale mentale Modell der Nutzer von einer adaptiven MMS im Nutzfahrzeug durch die Entwicklung eines dedizierten Fragebogens geprüft, um auf die Vorstellung der Nutzer von einem derartigen System eingehen zu können. Im Rahmen des folgenden iterativen Gestaltungsprozesses wurden ein Grob- und ein nachfolgendes Feinkonzept entwickelt, deren Gebrauchstauglichkeit durch eine Nutzerstudie und eine heuristische Evaluation getestet wurden. Die Erkenntnisse flossen in ein finales Interaktionskonzept ein.

Im zweiten Schritt der Arbeit wurde die entwickelte adaptive MMS im Rahmen einer Fahrsimulatorstudie mit einer heutzutage in Nutzfahrzeugen verbauten statischen MMS hinsichtlich der Sicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Nutzerakzeptanz verglichen. Der unter Einbezug von Lkw-Fahrern durchgeführte Vergleich offenbart, dass die Sicherheit durch die adaptive MMS nicht verbessert werden kann. Es werden sogar gegenteilige Tendenzen bezüglich der Ablenkung von der Fahraufgabe und der Fahrgüte festgestellt, weshalb diese weiter untersucht und adressiert werden sollten. Die Bedeutsamkeit der Vorerfahrung mit der statischen Ausgangslänge kann durch die vorliegende Arbeit nicht vollumfänglich aufgeklärt werden. Diese sollte in Folgestudien untersucht werden.

Die Gebrauchstauglichkeit der adaptiven MMS übersteigt nicht das Niveau der statischen MMS, liegt jedoch in einem vergleichbaren Bereich. Während die Anzahl an Bedienfehlern durch das adaptive Konzept gesenkt werden kann, steigt die Bedienzeit, weshalb diese Faktoren gegeneinander abgewogen werden müssen. Die Auswertung der Nutzerakzeptanz zeigt, dass die Fahrer bereit für eine Veränderung des Fahrerarbeitsplatzes und neue Bedienkonzepte sind. So wird die adaptive MMS von den Lkw-Fahrern präferiert und mit einer höheren wahrgenommenen hedonischen Qualität bewertet.

Der Vergleich zeugt von einem hohen Potenzial adaptiver MMS für den Einsatz im Nutzfahrzeug. Während es sich bei der statischen MMS um ein über Produktgenerationen hinweg weiterentwickeltes und den Fahrern vertrautes Bedienkonzept handelt, stellt die vorliegende adaptive MMS einen ersten prototypischen Stand mit zahlreichen Verbesserungsmöglichkeiten dar.

Aufgrund der hohen Bedeutung der Sicherheit während der Fahrt wird in Anbetracht der vorliegenden Studienergebnisse empfohlen, diese durch Langzeitstudien und gegebenenfalls einer Weiterentwicklung zu adressieren. Weiteren Forschungsbedarf stellt die Implementierung einer zuverlässigen Erkennung der Arbeitsphasen dar, die im Rahmen dieser Arbeit nur konzeptuell betrachtet wurde. Die daraus resultierende und im Feldeinsatz zu überprüfende Erkennungsgüte wird den tatsächlichen Nutzen der adaptiven MMS maßgeblich beeinflussen.

Vorbehaltlich der technischen Umsetzung wird adaptiven MMS eine Eignung für den Einsatz im Nutzfahrzeug zugesprochen. Adaptive Bedienkonzepte vermögen zukünftige Herausforderungen einer steigenden Funktionsanzahl und weiterer Digitalisierung des Fahrerarbeitsplatzes zu lösen und dabei die User Experience zu steigern.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Lkw-Fahrer Arbeitsplatz mit zusätzlich verbauten Bedienteilen für Aufbaufunktionen und rot markierten Bedienorten für Fahrzeugfunktionen [4]	1
Abbildung 1.2:	Zweistufiges Vorgehen zur Beantwortung der aufgestellten Forschungsfrage	4
Abbildung 2.1:	Modell der menschlichen Informationsverarbeitung mit begrenzten Ressourcen der Aufmerksamkeit nach Wickens et al. [33, S. 22]	6
Abbildung 2.2:	Vierdimensionales Modell multipler Ressourcen nach Wickens [34, S. 163, 35, S. 450]	7
Abbildung 2.3:	Unterteilung der Fahraufgabe nach Bubb [38, S. 27-29, 39, S. 21]	8
Abbildung 2.4:	LASR Level der Adaptivität nach Rittger et al. [104] mit Anwendungsbeispielen	18
Abbildung 2.5:	Veranschaulichung des Zielkonflikts zwischen der Komplexität der MMS und deren technischer Umsetzung, angelehnt an Tesler's Law [123, S. 87]	23
Abbildung 3.1:	Einstellungsmenü für adaptive App-Vorschläge im Betriebssystem Android 13 (links) und Vorschläge auf dem Homescreen unter iOS 12 (rechts)	27
Abbildung 3.2:	Kontextadaptive Funktionsanzeige des von Apple Inc. entwickelten MacBook Pro am Beispiel eines geöffneten Programms zur Textverarbeitung [98, S. 38]	28
Abbildung 3.3:	Ansätze der technischen Implementierung von adaptiven MMS im Fahrzeug	29
Abbildung 3.4:	Schritte sowie methodische Teilschritte zur Definition der Adaptivität des Systems	32
Abbildung 3.5:	Exemplarischer Arbeitsalltag mit benannten Teilschritten eines Probanden im Verteilerverkehr [98, S. 39]	33
Abbildung 3.6:	Fahrer Arbeitsplatz eines Studienteilnehmers mit benannten und hinsichtlich Nutzungshäufigkeit sowie Wichtigkeit für den Arbeitsalltag bewerteten Funktionen am Beispiel des Nebenabtriebs	33
Abbildung 3.7:	In qualitativen Interviews identifizierte neun Arbeitsphasen während des typischen Arbeitsalltags von N = 5 Lkw-Fahrern	34
Abbildung 3.8:	Dendrogramm der neun Arbeitsphasen mit zusammengefassten Kategorien nach der Actual Agreement Method anhand von Cut-Off-Werten bei 26 % und 40 %	36

Abbildung 3.9:	Aus der Card Sorting Studie mit N = 31 Lkw-Fahrern resultierende vier Arbeitsphasen zur Definition der Adaptivität.....	37
Abbildung 4.1:	Anwendungsbeispiel von physischen Tasten mit zugeordnetem Display des Automobilherstellers Audi AG [160].....	40
Abbildung 4.2:	Anwendungsbeispiel von Displaytastern aus dem Consumer-Electronics-Bereich des Herstellers Elgato [165]	40
Abbildung 4.3:	Anwendungsbeispiel kapazitiver Tasten mit hinterlegtem Display des Automobilherstellers Mercedes-Benz AG [167].....	41
Abbildung 4.4:	Anwendungsbeispiel eines Touchscreen des Automobilherstellers Polestar [172].....	41
Abbildung 4.5:	Vier Phasen der haptischen Verarbeitung bei der Interaktion nach Breitschaft et al. [166, S. 13]	43
Abbildung 4.6:	Funktionsprinzip von auf Topologieänderungen der Bildschirmoberfläche basierenden statischen Fühlhilfen	45
Abbildung 4.7:	Anwendungsbeispiel einer Topologieänderung der berührungsempfindlichen Bildschirmoberfläche des Automobilherstellers BMW AG.....	45
Abbildung 4.8:	Funktionsprinzip von auf Reibwertänderungen der Bildschirmoberfläche basierenden statischen Fühlhilfen	46
Abbildung 4.9:	Anwendungsbeispiel einer Reibwertänderung der berührungsempfindlichen Bedienoberfläche eines Kaffeevollautomaten des Herstellers Koninklijke Philips N.V.	46
Abbildung 4.10:	Technisches Funktionsprinzip von auf elektrostatischer Reibwertänderung über Elektroadhäsion basierenden dynamischen Fühlhilfen nach Meyer et al. [190].....	46
Abbildung 4.11:	Funktionsprinzip von auf positionsabhängigem Vibrationsfeedback basierenden dynamischen Fühlhilfen	47
Abbildung 4.12:	Nutzung des Displayrands als Abstützmöglichkeit am Beispiel eines Tesla Model 3.....	49
Abbildung 4.13:	Teilschritte und angewandte Methoden zur Auswahl der Bedienhardware..	52
Abbildung 4.14:	Nach VDI Richtlinie 2222 Blatt 1 [220] und Zwicky [219] aufgebauter morphologischer Kasten mit Eigenschaften und deren mögliche Ausprägungen für Bedienhardwarekonzepte	53
Abbildung 4.15:	Die drei in Folge der Expertenbewertung höchstplatzierten Hardwarekonzepte	55
Abbildung 4.16:	Ablauf des Fahrsimulatorversuchs mit messwiederholtem Versuchsdesign	57
Abbildung 4.17:	Für den Versuch eingesetzter statischer Lkw-Fahrsimulator der MAN Truck & Bus SE	58
Abbildung 4.18:	Für den Versuch prototypisch aufgebaute Hardwarekonzepte mit einheitlichem Interaktionskonzept [60, S. 19].....	58

Abbildung 4.19:	Boxplot der für Fragestellung 1 relevanten Metriken mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert, signifikanten Gruppenunterschieden und als Sternchen markierten Ausreißern nach [60, S. 20]	60
Abbildung 4.20:	Boxplot für die Erfassung der Akzeptanz über die Nützlichkeit und Zufriedenheit nach Van der Laan et al. [96] mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern nach [60, S. 21]	61
Abbildung 5.1:	Wesentliche Einflussfaktoren auf die Bildung mentaler Modelle nach [100, S. 4].....	66
Abbildung 5.2:	Gewähltes Vorgehen und zugehörige Schritte zur Erstellung des Interaktionskonzepts.....	70
Abbildung 5.3:	Zweistufiges Vorgehen inklusive ausgeführter Teilschritte zur Erstellung des Fragebogens mit jeweiliger Anzahl an Aussagen bzw. Items nach [100, S. 7]	71
Abbildung 5.4:	Anhand des erstellten Fragebogens erfasstes initiales mentales Modell der N = 75 Lkw-Fahrer von einer adaptiven MMS mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Punkt markierten Ausreißern (1 = stimme überhaupt nicht zu, 6 = stimme voll zu) nach [100, S. 12].....	73
Abbildung 5.5:	Erstelltes Grobkonzept mit neun Arbeitsphasen als Kontext und annotierten Funktionsbeschreibungen und abstrahierten Funktionssymbolen nach [99, S. 22].....	75
Abbildung 5.6:	Erstelltes Feinkonzept mit vier Arbeitsphasen als Kontext und annotierten Funktionsbeschreibungen sowie verfremdeten Funktionssymbolen	77
Abbildung 5.7:	Finales Interaktionskonzept der adaptiven MMS mit vier Arbeitsphasen als Kontext und annotierten Funktionsbeschreibungen sowie unkenntlich gemachten Funktionssymbolen.....	79
Abbildung 6.1:	Übersicht über die Forschungsfragen F1-F3 (hellgrau) des Versuchs sowie die untergeordneten Hypothesen H1-H7 (blau) und deren Operationalisierung (dunkelgrau)	83
Abbildung 6.2:	Ablauf des Fahrsimulatorversuchs mit messwiederholtem Versuchsdesign	84
Abbildung 6.3:	Für den Versuch prototypisch aufgebaute und im statischen Lkw-Fahrsimulator integrierte adaptive (Markierung 1) und statische (Markierungen 2-6) MMS.....	86
Abbildung 6.4:	Prototypische Umsetzung der adaptiven MMS mit haptischem Touchdisplay und auf der Displayoberfläche aufgetragenen Fühlstegen.....	86
Abbildung 6.5:	Physische Hubtaster der statischen MMS mit haptischer Abtrennung durch Fühlstege zwischen den Tasten sowie LED-Leuchte zur Rückmeldung des Funktionsstatus	87
Abbildung 6.6:	Boxplots der für die Fahrgüte relevanten Metriken SDLP und TLC_{krit} mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern	89
Abbildung 6.7:	Boxplots der für die Blickabwendung relevanten Metriken der durchschnittlichen Blickzeit sowie der Anzahl von kritisch langen	

	Blickzuwendungen mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern.....	89
Abbildung 6.8:	Boxplot der subjektiven Gebrauchstauglichkeit anhand des System Usability Scale Fragebogens mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern.....	90
Abbildung 6.9:	Boxplots der für die objektive Erfassung der Gebrauchstauglichkeit relevanten Metriken mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern mit eingezeichneten signifikanten Gruppenunterschieden.....	91
Abbildung 6.10:	Boxplots der Skalen des Fragebogens nach Van der Laan et al. [96] zur Messung der Akzeptanz mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern.....	91
Abbildung 6.11:	Balkendiagramm der Präferenz der Lkw-Fahrer mit eingezeichneten signifikanten Gruppenunterschieden.....	92
Abbildung 6.12:	Boxplots der anhand User Experience Questionnaire erfassten User Experience mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern sowie eingezeichneten signifikanten Gruppenunterschieden.....	93
Abbildung 6.13:	Boxplots des initialen und retrospektiven mentalen Modells mit als Raute eingezeichnetem Mittelwert und als Sternchen markierten Ausreißern (1 = stimme überhaupt nicht zu, 6 = stimme voll zu) sowie eingezeichneten signifikanten Unterschieden.....	94
Abbildung 6.14:	Übersicht über die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Fahrsimulatorstudie für die Forschungsfragen F1-F3 mit untergeordneten Hypothesen H1-H7.....	95
Abbildung A.1:	Durchschnittliche Häufigkeit der Arbeitsphasen von 1 (tritt nie auf) bis 7 (tritt immer auf) mit eingezeichneter Standardabweichung nach [144].....	xxxiii
Abbildung A.2:	Durchschnittliche Verwendungshäufigkeit der Funktionsgruppen von 1 (so gut wie nie) bis 7 (so gut wie immer) mit eingezeichneter Standardabweichung nach [144].....	xxxiii
Abbildung B.1:	Kombination der Ausprägungen je Eigenschaft zur Ableitung der zu bewertenden Hardwarekonzepte.....	xxxiv
Abbildung B.2:	An Schweizer [222, S. 177] angelehnte Skala zur Bewertung der Lösungen anhand identifizierter Kriterien mit Adjektiven und farblicher Codierung ..	xxxvi
Abbildung B.3:	Durch Fachexperten bewertete Hardwarekonzepte.....	xxxvii
Abbildung D.1:	Während des Versuchs durchlaufene Fahrsituationen zur Nachstellung eines Ausschnitts eines typischen Arbeitsalltags.....	xl
Abbildung D.2:	Einordnung der Ergebnisse der anhand des Fragebogens System Usability Score erfassten subjektiven Gebrauchstauglichkeit nach Bangor et al. [86, S. 121].....	xli

Abbildung D.3: Einordnung der Ergebnisse für das System aMMS der anhand des Fragebogens UEQ erfassten subjektiven User Experience nach Schrepp et al. [278]..... xlii

Abbildung D.4: Einordnung der Ergebnisse für das System sMMS der anhand des Fragebogens UEQ erfassten subjektiven User Experience nach Schrepp et al. [278]..... xliii

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Bei der primären Fahraufgabe benötigte Kanäle der Sinneswahrnehmung nach Fortmüller [46, S. 23] und Zuordnung zur Fahraufgabe nach Jentsch [47, S. 24].....	10
Tabelle 3.1:	Für die Fahraufgabe relevante Eigenschaften des Fahrers nach Langer et al. [126, S. 688]	26
Tabelle 4.1:	Anhand des Stands der Wissenschaft abgeleiteter visueller Workload der vorgestellten digitalen Hardwarekonzepte ohne technische Erweiterungen	42
Tabelle 5.1:	Vier identifizierte und benannte Dimensionen des mentalen Modells der Benutzergruppe mit der Anzahl untergeordneter Items sowie einer inhaltlichen Beschreibung	72
Tabelle A.1	Übersicht über die im Rahmen der Online-Umfrage abgefragten Funktionsgruppen nach [144].....	xxxii
Tabelle B.1	Identifizierte und gewichtete Bewertungsfaktoren zur Bewertung der Hardwarekonzepte	xxxv
Tabelle B.2	Ausprägungen der Eigenschaften aller 14 abgeleiteter Hardwarekonzepte	xxxvi
Tabelle B.3	Deskriptive Statistik der für Fragestellung 1 relevanten Metriken.....	xxxviii
Tabelle B.4	Deskriptive Statistik der für Fragestellung 2 relevanten Metriken.....	xxxviii
Tabelle C.1	Deskriptive Statistik des anhand des erstellten Fragebogens erfassten initialen mentalen Modells der N = 75 Lkw-Fahrer von einer adaptiven MMS	xxxix
Tabelle D.1	Deskriptive Statistik der für Hypothese H1 relevanten Metriken	xl
Tabelle D.2	Deskriptive Statistik der für Hypothese H2 relevanten Metriken	xl
Tabelle D.3	Deskriptive Statistik des System Usability Scale Fragebogens für Hypothese H3.....	xli
Tabelle D.4	Deskriptive Statistik der für Hypothese H4 relevanten Metriken	xli
Tabelle D.5	Deskriptive Statistik der Skalen Nützlichkeit und Zufriedenheit des Fragebogens zur Erfassung der Akzeptanz nach Van der Laan et al. [96] für Hypothese H5.....	xli
Tabelle D.6	Überprüfung der Annahme normalverteilter Differenzen zwischen den Gruppen aMMS und sMMS für den Fragebogen User Experience Questionnaire	xlii

Tabelle D.7	Deskriptive Statistik des Fragebogens User Experience Questionnaire für die Gruppen aMMS und sMMS für Hypothese H7.....	xlii
Tabelle D.8	Deskriptive Statistik des explorativen Vergleichs des initialen und retrospektiven mentalen Modells.....	xliii
Tabelle D.9	Positive und negative genannte Aspekte der aMMS mit respektiver Nennungshäufigkeit nach [273].....	xliv
Tabelle D.10	Positive und negative genannte Aspekte der sMMS mit respektiver Nennungshäufigkeit nach [273].....	xlv

Literaturverzeichnis

- [1] D. A. Norman, *Living with complexity*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2011.
- [2] E. Hoepke und S. Breuer, "Einführung in die Nutzfahrzeugtechnik," in *Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten*, E. Hoepke und S. Breuer, Hrsg. 8th Aufl, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 1–36.
- [3] Statistisches Bundesamt (Destatis), "Verkehr aktuell - Fachserie 8 Reihe 1.1 - 09/2020 - Stand: 30. September 2020," Verkehr Fachserie 8, Sep. 2020. [Online] Verfügbar: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Publikationen/Downloads-Querschnitt/verkehr-aktuell-pdf-2080110.pdf>.
- [4] MAN Truck & Bus SE, *Brandportal MAN*. [Online] Verfügbar: <https://brandportal.man/>. Gefunden am: Sep. 12 2020.
- [5] W. Appel, "Elektrik und Elektronik," in *Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten*, E. Hoepke und S. Breuer, Hrsg. 8th Aufl, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 583–636.
- [6] M. Hilgers, "Functions of the Cab," in *Commercial Vehicle Technology, The Driver's Cab*, M. Hilgers, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, S. 11–29.
- [7] W. Kraus, "Ergonomie & Design von Fahrerarbeitsplätzen in Nutzfahrzeugen," in *VDI-Berichte 1768: Anforderungen, Anwendungen, Aspekte für Mensch-Maschine-Systeme*, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003, S. 271–287.
- [8] M. Seitz, "Informationsmanagement im Nutzfahrzeug," Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2013.
- [9] N. Walter, "Personalization and context-sensitive user interaction of in-vehicle infotainment systems," Dissertation, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, München, 2018.
- [10] U. Class, "Sicheres automatisiertes Fahren braucht System," *ATZ Automobiltech Z*, Bd. 121, Rn. 12, S. 82, 2019.
- [11] S. Summerskill, R. Marshall, und J. Lenard, "The design of category N3 vehicles for improved driver direct vision: Final Report," [Online] Verfügbar: https://repository.lboro.ac.uk/articles/report/The_design_of_category_N3_vehicles_for_improved_driver_direct_vision/9353474.
- [12] Transport for London, "HGV safety permit guidance for operators entering London," 2020. [Online] Verfügbar: <https://content.tfl.gov.uk/hgv-safety-permit-guidance-for-operators-entering-london.pdf>.
- [13] M. J. Pitts, L. Skrypchuk, T. Wellings, A. Attridge, und M. A. Williams, "Evaluating User Response to In-Car Haptic Feedback Touchscreens Using the Lane Change Test," *Advances in Human-Computer Interaction*, Bd. 2012, Rn. 1, S. 1–13, 2012.

- [14] C. B. Watkins *et al*, "Development of touchscreen displays for the gulfstream g500 and g600 symmetry™ flight deck," in *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*: IEEE, Sep. 2018 - Sep. 2018, S. 1–10.
- [15] M. Ziegler, "Nutzfahrzeuge für den globalen Einsatz," in *Forschung für das Auto von Morgen: Aus Tradition entsteht Zukunft; mit 6 Tabellen*, V. Schindler und I. Sievers, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, S. 193–212.
- [16] F. D. Vikström, *Physical buttons outperform touchscreens in new cars, test finds*. [Online] Verfügbar: <https://www.vibilagare.se/nyheter/physical-buttons-outperform-touchscreens-new-cars-test-finds>. Gefunden am: Aug. 26 2022.
- [17] S. Hanisch, "Nach Tesla-Unfall: Gericht verbietet Touchscreen-Bedienung," *BR24*, 06 Aug, 2020, <https://www.br.de/nachrichten/wirtschaft/nach-tesla-unfall-gericht-verbietet-touchscreen-bedienung,S6nsrLT>.
- [18] National Highway Traffic Safety Administration, "Traffic Safety Facts: 2019 Data," DOT HS 813 110, Washington, DC, Mai. 2021. [Online] Verfügbar: <https://crash-tats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/813110>.
- [19] G. Meixner *et al*, "Retrospective and Future Automotive Infotainment Systems—100 Years of User Interface Evolution," in *Human–Computer Interaction Series, Automotive User Interfaces*, G. Meixner und C. Müller, Hrsg, Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 3–53.
- [20] V. Alvarez-Cortes, B. E. Zayas-Perez, V. H. Zarate-Silva, und J. A. Ramirez Uresti, "Current Trends in Adaptive User Interfaces: Challenges and Applications," in *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA 2007)*: IEEE, 2007, S. 312–317.
- [21] L. Findlater und J. McGrenere, "Impact of screen size on performance, awareness, and user satisfaction with adaptive graphical user interfaces," in *Proceeding of the twenty-sixth annual CHI conference on Human factors in computing systems - CHI '08*, New York, New York, USA: ACM Press, 2008, S. 1247.
- [22] M. Ablaßmeier, "Multimodales, kontextadaptives Informationsmanagement im Automobil," Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München, München, 2009.
- [23] A. Amditis *et al*, "Towards the Automotive HMI of the Future: Overview of the AIDE-Integrated Project Results," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst*, Bd. 11, Rn. 3, S. 567–578, 2010.
- [24] R. Bader, O. Siegmund, und W. Woerndl, "A study on user acceptance of proactive in-vehicle recommender systems," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '11*, New York, New York, USA: ACM Press, 2011, S. 47.
- [25] R. Broström, J. Engström, A. Agnvall, und G. Markkula, "Towards the next generation intelligent driver information system (IDIS): The volvo car interaction manager concept," London, 2006. [Online] Verfügbar: <https://trid.trb.org/view/847227>.
- [26] M. L. Köhler, "Adaptives Informationskonzept für beanspruchende urbane Fahrsituationen," Dissertation, Maschinenwesen, Technische Universität München, Garching, 2019.

- [27] A. Pätzold, "Adaptive Human Machine Interfaces in a Vehicle Cockpit: Indication, Impacts and Implications," Dissertation, Human- und Sozialwissenschaftliche Fakultät, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2021.
- [28] S. R. Garzon, "Kontextsensitive Personalisierung automotiver Benutzerschnittstellen," Dissertation, Elektrotechnik und Informatik, Technische Universität Berlin, Berlin, 2013.
- [29] F. Thomasen, *First of a new breed: Ford Mustang Mach-E ready to accelerate zero-emission driving thrills and bring on tomorrow*. [Online] Verfügbar: <https://media.ford.com/content/fordmedia/feu/en/news/2020/12/09/first-of-a-new-breed--ford-mustang-mach-e-ready-to-accelerate-ze.html>. Gefunden am: Apr. 08 2021.
- [30] G. Walthart, *EQS with unique MBUX Hyperscreen: the big in-car cinema. An assistant for the driver and front passenger who is constantly learning, thanks to artificial intelligence*. [Online] Verfügbar: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/ko/en/48584064>. Gefunden am: Apr. 08 2021.
- [31] D. Knoedler und B. Stanley, "Truck 2030: Digitally reinventing for the long haul," IBM Institute for Business Value, Armonk, NY, 2021. [Online] Verfügbar: <https://www.ibm.com/downloads/cas/7PVEWQLD>.
- [32] H. Bubb, M. Vollrath, K. Reinprecht, E. Mayer, und M. Körber, "Der Mensch als Fahrer," in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Automobilergonomie*, H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, und M. Vollrath, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [33] C. D. Wickens, J. G. Hollands, S. Banbury, und R. Parasuraman, *Engineering psychology and human performance*, 4th Aufl. New York, NY, USA: Pearson, 2013.
- [34] C. D. Wickens, "Multiple resources and performance prediction," *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, Bd. 3, Rn. 2, S. 159–177, 2002.
- [35] C. D. Wickens, "Multiple resources and mental workload," (eng), *Human factors*, Bd. 50, Rn. 3, S. 449–455, 2008.
- [36] L. Hackenberg, "Maschinen als kollaborative Gesprächspartner.: Nutzer- und situationsorientierte Gestaltung automotiver Sprachdialogsysteme," Dissertation, Fakultät für Lebenswissenschaften, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Berlin, 2013.
- [37] J. Rasmussen, "Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models," *IEEE Trans. Syst, Man, Cybern*, Bd. SMC-13, Rn. 3, S. 257–266, 1983.
- [38] H. Bubb, "Fahrerassistenz - primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit?," in *VDI-Berichte 1768: Anforderungen, Anwendungen, Aspekte für Mensch-Maschine-Systeme*, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003, S. 25–44.
- [39] H. Bubb, "Einführung," in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Automobilergonomie*, H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, und M. Vollrath, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 1–64.
- [40] G. Geiser, "Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug," *ATZ Automobiltech Z*, S. 77–84.
- [41] M. Jentsch, P. Roßner, A. Mißbach, und A. C. Bullinger, "Adaptivität oder Adaptierbarkeit im Fahrzeug - Leitfaden und Konzepte zur optimalen Fahrerunterstützung: Adaptivity or Adaptability in the vehicle - Guidelines and concepts for optimal driver support," in

- Verantwortung für die Arbeit der Zukunft: 61. GfA-Frühjahrskongress*, Dortmund: GfA Press, 2015.
- [42] S. Müller, "Das optimale Bedienelement und der optimale Bedienort für eine Nutzerfunktion: Aufbau und Anwendung eines Katalogs für Bedienelemente im Kontext des Personenkraftwagens," Dissertation, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, Garching, 2016.
- [43] H. Wolf, R. Zöllner, und H. Bubb, "2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz," in *2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, 2006, S. 1–18.
- [44] M. Schweigert, "Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben," Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, München, 2003.
- [45] R. Bruder und M. Didier, "Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 633–647.
- [46] T. Fortmüller, "Der Einfluss der Bewegungsdarstellung auf die subjektive Beurteilung des Fahreindrucks in der Fahrsimulation unter besonderer Berücksichtigung der Gierbewegung," Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr, 2021.
- [47] M. Jentsch, *Eignung von objektiven und subjektiven Daten im Fahrsimulator am Beispiel der aktiven Gefahrenbremsung: Eine vergleichende Untersuchung*. Dissertation. Chemnitz: Univ.-Verl, 2014.
- [48] T. Glohr, N. Wahn, M. Fritz, und T. Maier, "Haptics as an Aspect of the Perceived Quality of Control Devices in Trucks," *Procedia Manufacturing*, Bd. 3, S. 3226–3233, 2015.
- [49] M. Jendis, "Deutlich langlebiger und robuster: Was unterscheidet ein Anzeige- und Bediensystem im Pkw von einem im Lkw?," in *OEM Supplier 2018: Wettbewerbs- und Wachstumsstrategien*, Hanser Automotive, Hrsg, 2018.
- [50] B. Lenz, A. Lischke, und G. Knitschky, "Shell Lkw-Studie: Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030," Hamburg, Apr. 2010.
- [51] R. Olbrich und D. Battenfeld, "Variantenvielfalt und Komplexität — kostenorientierte vs. marktorientierte Sicht," *Journal für Marketing*, Bd. 44, Rn. 3-4, S. 161–173, 2005.
- [52] J. Ohlsen, "Beherrschung der Variantenvielfalt," *ATZ Automobiltech Z*, Bd. 118, Rn. 1, S. 82, 2016.
- [53] U. Burkhart und C. Pfeifle, *Revolution im Lkw-Fahrerhaus – Zehn Fragen und Antworten zum vernetzten und intuitiv bedienbaren Multimedia-Cockpit des Mercedes-Benz Actros*. [Online] Verfügbar: <https://media.daimlertruck.com/marsMediaSite/ko/de/46968111>. Gefunden am: Dez. 16 2022.
- [54] D. Lohre, T. Bernecker, und W. Stock, "ZF-Zukunftsstudie Fernfahrer 2.0: Der Mensch im Transport- und Logistikmarkt," Sep. 2014. [Online] Verfügbar: https://www.zf.com/master/media/corporate/m_zf_com/company/download_center/company_3/zukunftsstudie_1/zf_zukunftsstudie_2014_gesamt.pdf.
- [55] I. L. D. Houtman, J. K. Hesselink, und S. den van Bossche, *EU road freight transport sector: Work and employment conditions*. Luxembourg: Publications Office, 2004.

- [56] J. Baals, S. Emde, und M. Turkensteen, "Minimizing earliness-tardiness costs in supplier networks—A just-in-time truck routing problem," *European Journal of Operational Research*, Bd. 306, Rn. 2, S. 707–741, 2023.
- [57] C. Hermann, *Arbeitsbedingungen im Straßengütertransport*. Wien: Kammer für Arbeiter und Angestellte für Wien, 2004.
- [58] M. W. Stecher, "Ergonomische Gestaltung und Bewertung berührungsfreier Gestensteuerungen für Nutzfahrzeuge," Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2019.
- [59] C. Evers, "Auswirkungen von Belastungen und Stress auf das Verkehrsverhalten von Lkw-Fahrern," Dissertation, Philosophische Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn, 2009.
- [60] L. Schölkopf, A. Kneuper, V. Hutmann, und F. Diermeyer, "Digitizing Buttons: A Comparison of Digital Input Modalities to Replace Physical Buttons in Truck Cockpits," in *Human Factors in Transportation: AHFE International*, 2022.
- [61] A. W. Stedmon, H. Howells, J. R. Wilson, und I. Dianat, "Ergonomics/Human factors needs of an ageing workforce in the manufacturing sector," (eng), *Health promotion perspectives*, Bd. 2, Rn. 2, S. 112–125, 2012.
- [62] Statistisches Bundesamt (Destatis), *Lkw-Verkehr: Ein Drittel aller Berufskraftfahrer und -fahrerinnen ist 55 und älter: Pressemitteilung Nr. N 023 vom 4. Mai 2022*. Wiesbaden, 2022.
- [63] *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme*, DIN EN ISO 9241-210, 2020.
- [64] F. Diederichs, F. Niehaus, und L. Hees, "Guerilla Evaluation of Truck HMI with VR," in *Lecture Notes in Computer Science, Virtual, Augmented and Mixed Reality. Design and Interaction*, J. Y. C. Chen und G. Fragomeni, Hrsg, Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 3–17.
- [65] J. D. Lee, C. D. Wickens, Y. Liu, und L. N. Boyle, *Designing for people: An introduction to human factors engineering*, 3rd Aufl. Charleston, SC: CreateSpace, 2017.
- [66] U. Lindemann, *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [67] H.-P. Schöner und B. Morys, "Dynamische Fahrsimulatoren," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 139–154.
- [68] R. A. Wynne, V. Beanland, und P. M. Salmon, "Systematic review of driving simulator validation studies," *Safety Science*, Bd. 117, S. 138–151, 2019.
- [69] G. Knappe, A. Keinath, und C. Meinecke, "Empfehlungen für die Bestimmung der Spurhaltegüte im Kontext der Fahrsimulation," in *Aufmerksamkeit und Situationawareness beim Autofahren*, 2006.
- [70] Y. Wang *et al*, "The validity of driving simulation for assessing differences between in-vehicle informational interfaces: A comparison with field testing," (eng), *Ergonomics*, Bd. 53, Rn. 3, S. 404–420, 2010.

- [71] J. Fank, C. Knies, und F. Diermeyer, "Analysis of a Human-Machine Interface for Cooperative Truck Overtaking Maneuvers on Freeways: Increase Success Rate and Assess Driving Behavior during System Failures," *MTI*, Bd. 5, Rn. 11, S. 69, 2021.
- [72] N. T. Richardson, "Konzeption und Langzeittest der Mensch-Maschine-Schnittstelle für das hochautomatisierte Fahren im Lkw," Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, München, 2020.
- [73] S. Hofauer, "Fahrer-Fahrzeug-Interaktion einer automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung," Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2017.
- [74] G. Knappe, "Empirische Untersuchungen zur Querregelung in Fahrsimulatoren: Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen und Sensitivität von Messgrößen," Dissertation, Philosophischen Fakultät, Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg, 2009.
- [75] H. Godthelp, P. Milgram, und G. J. Blaauw, "The Development of a Time-Related Measure to Describe Driving Strategy," *Human factors*, Bd. 26, Rn. 3, S. 257–268, 1984.
- [76] L. Malta, "Impact and Cost Benefit Analysis - Safety: Final Event," Brüssel, Jun. 2012. [Online] Verfügbar: https://www.eurofot-ip.eu/download/final_event_PDFs/eurofot_session_31_lucas_malta_v7.pdf.
- [77] *Road vehicles — Measurement and analysis of driver visual behaviour with respect to transport information and control systems*, ISO 15007:2020(E), 2020.
- [78] G. Underwood, P. Chapman, N. Brocklehurst, J. Underwood, und D. Crundall, "Visual attention while driving: sequences of eye fixations made by experienced and novice drivers," (eng), *Ergonomics*, Bd. 46, Rn. 6, S. 629–646, 2003.
- [79] National Highway Traffic Safety Administration, "Visual-Manual NHTSA Driver Distraction Guidelines for In-Vehicle Electronic Devices: Docket No. NHTSA-2010-0053," Department of Transportation, 78 81, Apr. 2013.
- [80] D. Theofanou, "Maße zur Erfassung von visueller Ablenkung bei verschiedenen komplexen Streckenabschnitten," Dissertation, Universität Regensburg, 2004.
- [81] *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Interaktionsprinzipien*, DIN EN ISO 9241-110, 2020.
- [82] H. Bubb *et al*, "Messmethoden," in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Automobilergonomie*, H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, und M. Vollrath, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 618–662.
- [83] J. Sauro und E. Kindlund, "A method to standardize usability metrics into a single score," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA: ACM, 2005, S. 401–409.
- [84] H. Bubb, K. Bengler, J. Breuninger, C. Gold, und M. Helmbrecht, "Systemergonomie des Fahrzeugs," in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Automobilergonomie*, H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, und M. Vollrath, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [85] J. Brooke, "SUS: A 'Quick and Dirty' Usability Scale," in *Usability Evaluation In Industry*, P. W. Jordan, B. Thomas, I. L. McClelland, und B. Weerdmeester, Hrsg.: CRC Press, 1996.

-
- [86] A. Bangor, P. Kortum, und J. Miller, "Determining what individual SUS scores mean: adding an adjective rating scale," in 3, Bd. 4, *Journal of Usability Studies*, ACM Digital Library, Hrsg, 2009.
- [87] R. Hartson und P. S. Pyla, *The UX book: Process and guidelines for ensuring a quality user experience*. Amsterdam: Morgan Kaufmann, 2012.
- [88] M. Hassenzahl, "User experience (UX)," in *Proceedings of the 20th Conference on Interaction Homme-Machine*, New York, NY, USA: ACM, 2008, S. 11–15.
- [89] M. Hassenzahl, M. Burmester, und F. Koller, "AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität," in *Berichte des German Chapter of the ACM, Mensch & Computer 2003*, G. Szwillus und J. Ziegler, Hrsg, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2003, S. 187–196.
- [90] M. Hassenzahl, "The Thing and I: Understanding the Relationship Between User and Product," in *Human-Computer Interaction Series, Funology*, J. Karat, J. Vanderdonck, G. Abowd, G. Calvary, J. Carroll, G. Cockton, M. Czerwinski, S. Feiner, E. Furtado, K. Höök, R. Jacob, R. Jeffries, P. Johnson, K. Nakakoji, P. Palanque, O. Pastor, F. Paternò, C. Pribeanu, M. Salzman, C. Schmandt, M. Stolze, G. Szwillus, M. Tscheligi, G. van der Veer, S. Zhai, M. A. Blythe, K. Overbeeke, A. F. Monk, und P. C. Wright, Hrsg, Dordrecht: Springer Netherlands, 2005, S. 31–42.
- [91] Duden.de, *Hedonismus: Wörterbuch*. [Online] Verfügbar: <https://www.duden.de/recht-schreibung/Hedonismus>. Gefunden am: Apr. 15 2023.
- [92] B. Laugwitz, T. Held, und M. Schrepp, "Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire," in *Lecture Notes in Computer Science, HCI and Usability for Education and Work*, A. Holzinger, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 63–76.
- [93] E. Adell, A. Várhelyi, und L. Nilsson, "The Definition of Acceptance and Acceptability," in *Driver acceptance of new technology, Human Factors in Road and Rail Transport: Driver Acceptance of New Technology: Theory, Measurement and Optimisation*, M. A. Regan, T. Horberry, und A. Stevens, Hrsg, Franham: Ashgate Publishing Limited, 2014, S. 11–22.
- [94] E. Adell, "Driver experience and acceptance of driver support systems - a case of speed adaptation," Dissertation, Department of Technology and Society, Lund University, Lund, 2009.
- [95] F. D. Davis, "Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology," *MIS Quarterly*, Bd. 13, Rn. 3, S. 319, 1989.
- [96] J. D. van der Laan, A. Heino, und D. de Waard, "A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 5, Rn. 1, S. 1–10, 1997.
- [97] N. Walter, B. Kaplan, T. Altmüller, und K. Bengler, "Erhöhung der Transparenz eines adaptiven Empfehlungsdiensts," in *Mensch und Computer 2015 – Workshopband*, A. Weisbecker, M. Burmester, und A. Schmidt, Hrsg.: De Gruyter, 2015, S. 475–482.
- [98] L. Schölkopf, A. Kneuper, V. Hutmann, und F. Diermeyer, "Methods for Reducing the Complexity of Driving Workplaces in Commercial Vehicles," in *Lecture Notes in Networks*

- and Systems, Advances in Human Aspects of Transportation*, N. Stanton, Hrsg, Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 34–44.
- [99] L. Schölkopf, M.-M. Wolf, V. Hutmann, und F. Diermeyer, “Conception, Development and First Evaluation of a Context-Adaptive User Interface for Commercial Vehicles,” in *13th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, New York, NY, USA: ACM, 2021, S. 21–25.
- [100] L. Schölkopf, C. Gatto von der Heyde, A. Sprung, und F. Diermeyer, “Reducing the Gap between Mental Models of Truck Drivers and Adaptive User Interfaces in Commercial Vehicles,” *MTI*, Bd. 6, Rn. 2, S. 14, 2022.
- [101] C. Bauer und A. K. Dey, “Considering context in the design of intelligent systems: Current practices and suggestions for improvement,” *Journal of Systems and Software*, Bd. 112, S. 26–47, 2016.
- [102] D. Browne, Hrsg, *Adaptive user interfaces*. London: Academic Press, 1990.
- [103] G. Zimmermann, G. C. Vanderheiden, und C. Strobbe, “Towards Deep Adaptivity – A Framework for the Development of Fully Context-Sensitive User Interfaces,” in *Lecture Notes in Computer Science, Universal Access in Human-Computer Interaction. Design and Development Methods for Universal Access*, D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, A. Kobsa, F. Mattern, J. C. Mitchell, M. Naor, O. Nierstrasz, C. Pandu Rangan, B. Steffen, D. Terzopoulos, D. Tygar, G. Weikum, C. Stephanidis, und M. Antona, Hrsg, Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 299–310.
- [104] L. Rittger, D. Engelhardt, O. Stauch, und I. Muth, “Adaptive User Experience und empathische HMI-Konzepte,” *ATZ Automobiltech Z*, Bd. 122, Rn. 11, S. 16–21, 2020.
- [105] L. Rittger, D. Engelhardt, und R. Schwartz, “Adaptive User Experience in the Car—Levels of Adaptivity and Adaptive HMI Design,” *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst*, Bd. 23, Rn. 5, S. 4866–4876, 2022.
- [106] L. Findlater und J. McGrenere, “A comparison of static, adaptive, and adaptable menus,” in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA: ACM, 2004, S. 89–96.
- [107] N. Sarter, “Coping with Complexity Through Adaptive Interface Design,” in *Lecture Notes in Computer Science, Human-Computer Interaction. HCI Intelligent Multimodal Interaction Environments*, D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell, M. Naor, O. Nierstrasz, C. Pandu Rangan, B. Steffen, M. Sudan, D. Terzopoulos, D. Tygar, M. Y. Vardi, G. Weikum, und J. A. Jacko, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, S. 493–498.
- [108] D. Browne und Norman, M, Riches, D, “Why Build Adaptive Systems?: Chapter 2,” in *Computers and people series, Adaptive user interfaces*, D. Browne, Hrsg, London: Academic Press, 1990, S. 15–57.
- [109] R. Oppermann, “Introduction,” in *Computers, Cognition, and Work, Adaptive User Support: Ergonomic Design of Manually and Automatically Adaptable Software*, R. Oppermann, Hrsg. 1st Aufl, Mahwah: CRC Press, 1994, S. 3–12.
- [110] M. Hartmann, “Challenges in Developing User-Adaptive Intelligent User Interfaces,” in *17th Workshop on Adaptivity and User Modeling in Interactive Systems*, 2009.

- [111] W. E. Hick, "On the Rate of Gain of Information," *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Bd. 4, Rn. 1, S. 11–26, 1952.
- [112] P. M. Fitts, "The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement," *Journal of Experimental Psychology*, Bd. 47, Rn. 6, S. 381–391, 1954.
- [113] A. T. Welford, *Fundamentals of skill*. London: Methuen, 1968.
- [114] J. L. Wesson, A. Singh, und B. van Tonder, "Can Adaptive Interfaces Improve the Usability of Mobile Applications?," in *IFIP Advances in Information and Communication Technology, Human-Computer Interaction*, P. Forbrig, F. Paternó, und A. Mark Pejtersen, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, S. 187–198.
- [115] J. Graefe, D. Engelhardt, und K. Bengler, "What does Well-Designed Adaptivity Mean for Drivers? A Research Approach to Develop Recommendations for Adaptive In-Vehicle User Interfaces that are Understandable, Transparent and Controllable," in *13th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, New York, NY, USA: ACM, 2021, S. 43–46.
- [116] *Ergonomics of human-system interaction*, ISO 9241-112:2017(E), 2017.
- [117] T. Lavie und J. Meyer, "Benefits and costs of adaptive user interfaces," *International Journal of Human-Computer Studies*, Bd. 68, Rn. 8, S. 508–524, 2010.
- [118] B. Y. Lim, A. K. Dey, und D. Avrahami, "Why and why not explanations improve the intelligibility of context-aware intelligent systems," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA: ACM, 2009, S. 2119–2128.
- [119] T. F. Paymans, J. Lindenberg, und M. Neerincx, "Usability trade-offs for adaptive user interfaces," in *Proceedings of the 9th international conference on Intelligent user interfaces*, New York, NY: ACM, 2004, S. 301.
- [120] C. Gena, "Methods and techniques for the evaluation of user-adaptive systems," *The Knowledge Engineering Review*, Bd. 20, Rn. 1, S. 1–37, 2005.
- [121] C. Ussat, "Personalisierte Optionsauswahl im Fahrzeuginformationssystem," Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, 2012.
- [122] J. Graefe, S. Paden, D. Engelhardt, und K. Bengler, "Human Centered Explainability for Intelligent Vehicles – A User Study," in *Proceedings of the 14th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, New York, NY, USA: ACM, 2022, S. 297–306.
- [123] J. Yablonski, *Laws of UX: Using psychology to design better products et services*. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2020.
- [124] Mercedes-Benz Group AG, *MBUX Hyperscreen. Ganz großes Auto-Kino*. [Online] Verfügbar: <https://group.mercedes-benz.com/innovation/digitalisierung/konnektivitaet/mbux-hyperscreen.html>. Gefunden am: Apr. 11 2022.
- [125] K. M. Feigh, M. C. Dorneich, und C. C. Hayes, "Toward a characterization of adaptive systems: a framework for researchers and system designers," (eng), *Human factors*, Bd. 54, Rn. 6, S. 1008–1024, 2012.

- [126] I. Langer, B. Abendroth, und R. Bruder, "Fahrerzustandserkennung," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 687–699.
- [127] W. Piechulla, C. Mayser, H. Gehrke, und W. König, "Reducing drivers' mental workload by means of an adaptive man–machine interface," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Bd. 6, Rn. 4, S. 233–248, 2003.
- [128] P. Tchankue, J. Wesson, und D. Vogts, "The impact of an adaptive user interface on reducing driver distraction," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '11*, New York, New York, USA: ACM Press, 2011, S. 87–94.
- [129] M. Seitz, D. Feldmeier, A. Zimmermann, und M. Lienkamp, "Eine Feldstudie zur Erfassung der kognitiven Beanspruchung von Lkw-Fahrern," in *CVT 2012 - 2. Commercial Vehicle Technology Symposium*, S. 59–68.
- [130] D. Johnson, *How to turn off Siri suggestions on your iPhone or customize which ones you receive*. [Online] Verfügbar: <https://www.businessinsider.com/guides/tech/how-to-turn-off-siri-suggestions>. Gefunden am: Jan. 17 2023.
- [131] J. Callaham, *How to enable or disable app suggestions on Google Pixel phones*. [Online] Verfügbar: <https://www.androidauthority.com/enable-or-disable-app-suggestions-on-google-pixel-3216194/>. Gefunden am: Jan. 17 2023.
- [132] Volvo Car Corporation, *Your new Volvo EX90 gives you the info you need – when you need it*. [Online] Verfügbar: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/press-releases/305225/your-new-volvo-ex90-gives-you-the-info-you-need-when-you-need-it>.
- [133] A. K. Dey, "Understanding and Using Context," *Personal and Ubiquitous Computing*, Bd. 5, Rn. 1, S. 4–7, 2001.
- [134] S. Hoch, "Kontextmanagement und Wissensanalyse im kognitiven Automobil der Zukunft," Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität München, München, 2009.
- [135] C. Bauer und A. Novotny, "A consolidated view of context for intelligent systems," *AIS*, Bd. 9, Rn. 4, S. 377–393, 2017.
- [136] A. Soultana, F. Benabbou, und N. Sael, "Context-awareness in the smart car," in *Proceedings of the 4th International Conference on Smart City Applications*, New York, NY, USA: ACM, 2019, S. 1–8.
- [137] C. Kaspar, T. Diekmann, und S. Hagenhoff, "Kontextadaptive Systeme," *WIST*, Bd. 34, Rn. 9, S. 529–532, 2005.
- [138] T. Schempp, A. Kaufmann, I. Stoehr, M. Schmid, und S. Boettinger, "Adaptive Control Elements to Improve the HMI of an Agricultural Tractor," in *Advances in Intelligent Systems and Computing, Advances in Usability, User Experience and Assistive Technology*, T. Z. Ahram und C. Falcão, Hrsg, Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 153–165.
- [139] M. Wiedner, F. Branca, E. Mion, A. Censi, und E. Frazzoli, "Contextual Driving Scene Perception from Anonymous Vehicle Bus Data for Automotive Applications," in *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*: IEEE, 2022, S. 13010–13017.

- [140] C. Molnar, *Interpretable machine learning: A guide for making Black Box Models interpretable*. Morisville, North Carolina: Selbstverlag, 2019.
- [141] K. Z. Gajos, K. Everitt, D. S. Tan, M. Czerwinski, und D. S. Weld, "Predictability and accuracy in adaptive user interfaces," in *Proceeding of the twenty-sixth annual CHI conference on Human factors in computing systems - CHI '08*, New York, New York, USA: ACM Press, 2008, S. 1271.
- [142] N. Fecher und J. Hoffmann, "Fahrerwarnelemente," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [143] J. Bortz und N. Döring, *Forschungsmethoden und Evaluation: In den Sozial- und Humanwissenschaften*, 5th Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2016.
- [144] A. Kneuper, "Situations- und Funktionsanalyse für die Weiterentwicklung von Lkw-Fahrerarbeitsplätzen," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2020.
- [145] G. A. Miller, "The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information," *Psychological Review*, Bd. 63, Rn. 2, S. 81–97, 1956.
- [146] A. Cooper, R. Reimann, und D. Cronin, *About face 3: The essentials of interaction design*. Indianapolis, Ind.: Wiley, 2007.
- [147] J. Wood und L. Wood, "Card Sorting: Current Practices and Beyond," in Bd. 4, *Journal of Usability Studies*, Usability Professionals Association, Hrsg. 1st Aufl, 2008, S. 1–6.
- [148] UXtweak Research Group, *The only UX research platform you need: Powerful research tools for improving usability of your digital products, from prototypes to production*. [Online] Verfügbar: <https://www.uxtweak.com/>. Gefunden am: Apr. 01 2023.
- [149] J. Nielsen, *Card Sorting: How Many Users to Test: Testing ever-more users in card sorting has diminishing returns, but test at least 15 users — 3 times more than you would in traditional usability tests*. [Online] Verfügbar: <https://www.nngroup.com/articles/card-sorting-how-many-users-to-test/>. Gefunden am: Apr. 02 2023.
- [150] A. Nawaz, "A Comparison of Card-sorting Analysis Methods," in *Proceedings of the 10th Asia Pacific Conference on Computer-Human Interaction*, New York, 2012, S. 583–592.
- [151] A. McKay, *How to interpret your card sort results Part 1: open and hybrid card sorts*. [Online] Verfügbar: <https://blog.optimalworkshop.com/how-to-interpret-your-card-sort-results-part-1-open-and-hybrid-card-sorts/>. Gefunden am: Apr. 02 2023.
- [152] Volvo Group, *Volvo Trucks Instrumentenanzeige: Die Entwicklung des Kombiinstruments*. [Online] Verfügbar: <https://www.volvotrucks.de/de-de/innovationen/fahrerhaus/driver-interface.html>. Gefunden am: Jan. 13 2023.
- [153] H. Sacher, *Gesamtheitliche Analyse des Bedienverhaltens von Fahrzeugfunktionen in der täglichen Nutzung*. Dissertation, 1st Aufl. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2009.
- [154] D. Saffer, *Designing for interaction: Creating smart applications and clever devices*. Berkeley, Calif.: New Riders, 2007.
- [155] D. Schmidt, F. Block, und H. Gellersen, "A Comparison of Direct and Indirect Multi-touch Input for Large Surfaces," in *Lecture Notes in Computer Science, Human-Computer Interaction – INTERACT 2009*, T. Gross, J. Gulliksen, P. Kotzé, L. Oestreicher, P.

- Palanque, R. O. Prates, und M. Winckler, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 582–594.
- [156] R. J. K. Jacob, "Human-computer interaction," *ACM Comput. Surv*, Bd. 28, Rn. 1, S. 177–179, 1996.
- [157] C. Harvey, N. A. Stanton, C. A. Pickering, M. McDonald, und P. Zheng, "To twist or poke? A method for identifying usability issues with the rotary controller and touch screen for control of in-vehicle information systems," (eng), *Ergonomics*, Bd. 54, Rn. 7, S. 609–625, 2011.
- [158] R. Bernotat und K.-P. Gärtner, "Anthropotechnische Gesichtspunkte bei der Gestaltung der Kommunikation zwischen Mensch und hochautomatisierten Systemen," in *Fachberichte Messen • Steuern • Regeln*, Bd. 5, *Meß- und Automatisierungstechnik: Technologien, Verfahren, Ziele INTERKAMA-Kongreß 1980*, D. Ernst und M. Thoma, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1980, S. 843–863.
- [159] H. Wang, Da Tao, J. Cai, und X. Qu, "Effects of vibration and target size on the use of varied computer input devices in basic human-computer interaction tasks," *Hum Frts & Erg Mfg Svc*, Bd. 32, Rn. 2, S. 199–213, 2022.
- [160] Audi AG, *Audi Q4: Infotainment und Vernetzung: Topvernetzung: MMI plus und MMI pro*. [Online] Verfügbar: <https://www.audi-mediacycenter.com/de/elektro-suvs-im-premium-kompaktsegment-der-audi-q4-e-tron-und-der-q4-sportback-e-tron-13887/infotainment-und-vernetzung-13898>. Gefunden am: Sep. 13 2022.
- [161] M. Wertheimer, "Untersuchungen zur Lehre von der Gestalt. II," *Psychol. Forsch*, Bd. 4, Rn. 1, S. 301–350, 1923.
- [162] NKK Switches of America, Inc, *NKK Smart Display: Combining a graphic programmable display with an electromechanical switch*. [Online] Verfügbar: <https://www.nkkswitches.com/smartdisplay/>. Gefunden am: Okt. 20 2022.
- [163] W. Küchler und R. Schaare, "Technologien für eine neuartige HMI-Gestaltung," *ATZ Elektron*, Bd. 5, Rn. 4, S. 34–39, 2010.
- [164] Nissan Motor Corporation, *Nissan Juke*. [Online] Verfügbar: <https://www.nissan-global.com/EN/NISSAN/JUKE/>.
- [165] Elgato Systems GmbH, *Stream Deck: Das nächste Level für deinen Content*. [Online] Verfügbar: <https://www.elgato.com/de/stream-deck>. Gefunden am: Sep. 12 2022.
- [166] S. J. Breitschaft, S. Clarke, und C.-C. Carbon, "A Theoretical Framework of Haptic Processing in Automotive User Interfaces and Its Implications on Design and Engineering," (eng), *Frontiers in psychology*, Bd. 10, S. 1–18, 2019.
- [167] Mercedes-Benz Group Media, *Mercedes-AMG GT 63 S 4MATIC+ 4-Türer Coupé: Ablagenummer 18C0223_07*. [Online] Verfügbar: https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/de/instance/picture.xhtml?oid=34347794&ls=L3NIYXJjaHJlc3VsdC9zZWZyY2hyZXN1bHQeGh0bWw_c2VhcmNoU3RyaW5nPWZtZytndCZzZWZyY2hJZD0yJnNIYXJjaFR5cGU9ZGV0YWls-ZWQmcmVzdWx0SW5mb1R5cGVJZD0xNzImc3R5bGVJZD01MDAzJnZpZXdUeXBIPWdyaWQmc29ydERIZmluaXRpb249UFVCTEITSEVEX0FULTlmdGh1bWJTY2FsZU-luZGV4PTEmcm93Q291bnRzSW5kZXg9NSZhamF4UmVxdWVzdHNHNYWRIPTlhcHJldklkPTM0MzQ3Nzk0&rs=115. Gefunden am: Okt. 20 2022.

- [168] T. M. Müller, I. Muth, und O. Stauch, “Mit Audi auf Tuchfühlung,” *ATZ Automobiltech Z*, Bd. 120, Rn. S3, S. 114–119, 2018.
- [169] K. Kidd, *Buick to the Future: The First Touch Screen Infotainment*. [Online] Verfügbar: <https://thenewswheel.com/buick-to-the-future-the-first-touch-screen-infotainment-system/>. Gefunden am: Mrz. 12 2020.
- [170] J. Barbé, N. Chatrenet, R. Mollard, M. Wolff, und P. Bérard, “Physical ergonomics approach for touch screen interaction in an aircraft cockpit,” in *Proceedings of the 2012 Conference on Ergonomie et Interaction homme-machine - Ergo'IHM '12*, New York, New York, USA: ACM Press, 2012, S. 9–16.
- [171] P. Palanque, A. Cockburn, L. Désert-Legendre, C. Gutwin, und Y. Deleris, “Brace Touch: A Dependable, Turbulence-Tolerant, Multi-touch Interaction Technique for Interactive Cockpits,” in *Lecture Notes in Computer Science, Computer Safety, Reliability, and Security*, A. Romanovsky, E. Troubitsyna, und F. Bitsch, Hrsg, Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 53–68.
- [172] Polestar Performance AB, *Polestar 2: Genau so sollte ein Elektroauto sein*. [Online] Verfügbar: <https://www.polestar.com/de/polestar-2/>. Gefunden am: Sep. 12 2022.
- [173] R. I. Tivadar, R. C. Arnold, N. Turoman, J.-F. Knebel, und M. M. Murray, “Digital haptics improve speed of visual search performance in a dual-task setting,” (eng), *Scientific reports*, Bd. 12, Rn. 9728, 2022.
- [174] A. Stevens, A. Quimby, A. Board, T. Kersloot, und P. Burns, “Design Guidelines for Safety of In-Vehicle Information Systems,” Transport Research Laboratory PA3721/01, 2002.
- [175] A. Colley, L. Virtanen, T. Ojala, und J. Häkkinen, “Guided touch screen,” in *Pervasive Displays 2016: The 5th ACM International Symposium on Pervasive Displays: proceedings: Oulu, Finland, June 20-22, 2016*, New York, New York: Association for Computing Machinery, 2016, S. 80–86.
- [176] M. J. Pitts *et al*, “Visual–haptic feedback interaction in automotive touchscreens,” *Displays*, Bd. 33, Rn. 1, S. 7–16, 2012.
- [177] X. Zhao, Z. Li, R. Fu, C. Wang, und Y. Guo, “Differences in Drivers’ Glance Behavior and Lateral Control Ability during Full-Touch Interaction Mode and Conventional Interaction Mode: A Case Study of Road Experiments,” *Journal of Advanced Transportation*, Bd. 2022, S. 1–13, 2022.
- [178] F. Kremser, D. Lorenz, W. Remlinger, und K. Bengler, “Nutzerzentrierte Fahrerplatzauslegung des Elektrofahrzeugs MUTE mit dem digitalen Menschmodell RAMSIS,” *Z. Arb. Wiss*, Bd. 66, Rn. 2-3, S. 104–114, 2012.
- [179] M. Mischke, *Multimodale Bedienkonzepte im Dualtask: Ein Ansatz für komplexe Bedienungsaufgaben im Fahrzeug*. Dissertation, 1st Aufl. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2009.
- [180] S. Bell, *Ctrl-Bar Gives Tesla Model 3 And Y Physical Buttons (As Long As You Have WiFi): Tesla's sparse interiors may leave you wishing for some physical buttons, and there may soon be a solution*. [Online] Verfügbar: <https://www.carscoops.com/2023/01/ctrl-bar-gives-tesla-model-3-and-y-some-physical-buttons-as-long-as-you-have-wifi/>. Gefunden am: Mrz. 05 2023.

- [181] S. Mayer *et al*, “The Effect of Road Bumps on Touch Interaction in Cars,” in *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, [Place of publication not identified]: ACM, 2018, S. 85–93.
- [182] N. Goode, M. G. Lenné, und P. Salmon, “The impact of on-road motion on BMS touch screen device operation,” (eng), *Ergonomics*, Bd. 55, Rn. 9, S. 986–996, 2012.
- [183] P. M. Salmon *et al*, “The effects of motion on in-vehicle touch screen system operation: A battle management system case study,” *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Bd. 14, Rn. 6, S. 494–503, 2011.
- [184] C.-C. Carbon und M. Jakesch, “A Model for Haptic Aesthetic Processing and Its Implications for Design,” *Proc. IEEE*, Bd. 101, Rn. 9, S. 2123–2133, 2013.
- [185] M. Götz, “Die Gestaltung von Bedienelementen unter dem Aspekt ihrer kommunikativen Funktion,” Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, TU München, Garching, 2007.
- [186] S. Zimmermann, S. Rümelin, und A. Butz, “I feel it in my fingers,” in *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, New York, NY: ACM, 2013, S. 9–12.
- [187] D. Orf, *Tactile Keyboards That Rise Out of Touchscreens Are Finally Here*. [Online] Verfügbar: <https://gizmodo.com/keyboards-that-rise-out-of-a-touchscreen-are-finally-he-1685246880>. Gefunden am: Sep. 14 2022.
- [188] M. Kuehner, “Joule or Newton, That is the Question: The Benefits of Mechanical Control Elements in Automotive User Interfaces,” in *Smart Haptics Conference*, 2022.
- [189] M. L. Gordon und S. Zhai, “Touchscreen Haptic Augmentation Effects on Tapping, Drag and Drop, and Path Following,” in *CHI 2019: Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems : May 4-9, 2019, Glasgow, Scotland, UK*, New York, New York: The Association for Computing Machinery, 2019, S. 1–12.
- [190] D. J. Meyer, M. A. Peshkin, und J. E. Colgate, “Fingertip friction modulation due to electrostatic attraction,” in *2013 World Haptics Conference (WHC)*: IEEE, 2013, S. 43–48.
- [191] K. Klein, “Rethinking Touch HMI Controls for Automotive Displays and Smart Surfaces,” *Information Display*, Bd. 38, Rn. 1, S. 24–29, 2022.
- [192] A. Isleyen, Y. Vardar, und C. Basdogan, “Tactile Roughness Perception of Virtual Gratings by Electro-vibration,” (eng), *IEEE transactions on haptics*, Bd. 13, Rn. 3, S. 562–570, 2020.
- [193] S. J. Breitschaft, A. Pastukhov, und C.-C. Carbon, “Where's My Button? Evaluating the User Experience of Surface Haptics in Featureless Automotive User Interfaces,” (eng), *IEEE transactions on haptics*, Bd. 15, Rn. 2, S. 292–303, 2022.
- [194] C. Bernard, S. Ystad, J. Monnoyer, und M. Wiertelwski, “Detection of Friction-Modulated Textures is Limited by Vibrotactile Sensitivity,” (eng), *IEEE transactions on haptics*, Bd. 13, Rn. 3, S. 542–551, 2020.
- [195] O. Bau und I. Poupyrev, “REVEL: Tactile Feedback Technology for Augmented Reality,” *ACM Trans. Graph*, Bd. 31, Rn. 4, S. 1–11, 2012.
- [196] K. A. Kaczmarek *et al*, “Polarity effect in electrovibration for tactile display,” (eng), *IEEE transactions on bio-medical engineering*, Bd. 53, Rn. 10, S. 2047–2054, 2006.

- [197] C. Bernard, J. Monnoyer, S. Ystad, und M. Wiertelwski, "Eyes-Off Your Fingers: Gradual Surface Haptic Feedback Improves Eyes-Free Touchscreen Interaction," in *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA: ACM, 2022, S. 1–10.
- [198] E. Tunca, R. Fleischer, L. Schmidt, und T. Tille, "Advantages of Active Haptics on Touch Surfaces," in *AutomotiveUI 2016, 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications: In-cooperation with ACM SIGCHI : October 24-26, 2016, Ann Arbor, MI, USA : proceedings*, New York, NY: ACM, 2016, S. 137–144.
- [199] A. Ng und S. Brewster, "An Evaluation of Touch and Pressure-Based Scrolling and Haptic Feedback for In-Car Touchscreens," in *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, New York, NY: ACM, 2017, S. 11–20.
- [200] A. Blattner, "Bedienkonzeptentwicklung für Fahrerinformationssysteme basierend auf einem Touchpad mit haptischer Rückmeldung," Dissertation, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, Garching, 2014.
- [201] A. Nashel und S. Razzaque, "Tactile virtual buttons for mobile devices," in *CHI '03 extended abstracts on Human factors in computing systems - CHI '03*, New York, New York, USA: ACM Press, 2003, S. 854.
- [202] J. Lisseman, L. Diwischek, S. Essers, und D. Andrews, "In-Vehicle Touchscreen Concepts Revisited: Approaches and Possibilities," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst*, Bd. 7, Rn. 1, S. 141–148, 2014.
- [203] A. Weddle und H. Yu, "Confirmation Haptics for Automotive Interfaces: Cadillac CUE User Study," San Jose California, Jun. 2013. Gefunden am: Jan. 07 2020.
- [204] G. Burnett und A. Irune, "Drivers' quality ratings for switches in cars," in *Proceedings of the 1st International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '09*, New York, New York, USA: ACM Press, 2009, S. 107.
- [205] J. Reisinger, "Parametrisierung der Haptik von handbetätigten Stellteilen," Dissertation, Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, München, 2009.
- [206] K. E. MacLean, "Haptic Interaction Design for Everyday Interfaces," *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, Bd. 4, Rn. 1, S. 149–194, 2008.
- [207] M. Lust und R. Schaare, "Bedienoberflächen mit aktivem haptischem Feedback," *ATZ Automobiltech Z*, Bd. 118, Rn. 6, S. 48–53, 2016.
- [208] T. A. Kern *et al*, *Entwicklung Haptischer Geräte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [209] E. Tunca, I. Zoller, und P. Lotz, "An Investigation into Glance-free Operation of a Touchscreen With and Without Haptic Support in the Driving Simulator," in *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, [Place of publication not identified]: ACM, 2018, S. 332–340.
- [210] Audi AG, *Audi A8 10,1 Zoll-Touch-Display*. [Online] Verfügbar: <https://www.audi-mediacenter.com/de/fotos/detail/audi-a8-53730>.
- [211] H. Richter, R. Ecker, C. Deisler, und A. Butz, "HapTouch and the 2+1 state model," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Automotive User Interfaces and*

- Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '10*, New York, New York, USA: ACM Press, 2010, S. 72.
- [212] F. Beruscha, W. Krautter, A. Lahmer, und M. Pauly, "An evaluation of the influence of haptic feedback on gaze behavior during in-car interaction with touch screens," in *2017 IEEE World Haptics Conference (WHC): 6-9 June 2017*, Piscataway, NJ: IEEE, 2017, S. 201–206.
- [213] M. J. Pitts, G. E. Burnett, M. A. Williams, und T. Wellings, "Does haptic feedback change the way we view touchscreens in cars?," in *International Conference on Multimodal Interfaces and the Workshop on Machine Learning for Multimodal Interaction*, New York, NY: ACM, 2010, S. 1.
- [214] H. Kang und G. Shin, "Effects of touch target location on performance and physical demands of computer touchscreen use," (eng), *Applied Ergonomics*, Bd. 61, S. 159–167, 2017.
- [215] D. R. Large, G. Burnett, E. Crundall, G. Lawson, und L. Skrypchuk, "Twist It, Touch It, Push It, Swipe It," in *AutomotiveUI 2016, 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications: In-cooperation with ACM SIGCHI : October 24-26, 2016, Ann Arbor, MI, USA : proceedings*, New York, NY: ACM, 2016, S. 161–168.
- [216] A. Cockburn *et al*, "Turbulent Touch," in *Explore, innovate, inspire: CHI 2017 : May 6-11, Denver, CO, USA*, New York, NY: Association for Computing Machinery Inc. (ACM), 2017, S. 6742–6753.
- [217] A. Cockburn *et al*, "Design and evaluation of braced touch for touchscreen input stabilisation," *International Journal of Human-Computer Studies*, Bd. 122, S. 21–37, 2019.
- [218] J. Schwarz, R. Xiao, J. Mankoff, S. E. Hudson, und C. Harrison, "Probabilistic palm rejection using spatiotemporal touch features and iterative classification," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA: ACM, 2014, S. 2009–2012.
- [219] F. Zwicky, *Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild*. München, Zürich: Droemer Knauer, 1966.
- [220] Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung, "Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien: VDI 2222 Blatt 1," Jun. 1997.
- [221] J. Feldhusen *et al*, "Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses," in *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*, J. Feldhusen und K.-H. Grote, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 291–409.
- [222] P. Schweizer, *Systematisch Lösungen finden: Eine Denkschule für Praktiker*, 3rd Aufl. Zürich: vdf Hochsch.-Verl. an der ETH Zürich, 2008.
- [223] J. E. Wulf, *Elementarmethoden zur Lösungssuche*. Dissertation, 1st Aufl. München: Verl. Dr. Hut, 2002.
- [224] A. Kneuper, "Nutzerzentrierte Analyse von digitalisierten Anzeige- und Bedienelementen für den Einsatz im Nutzfahrzeug," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2021.

- [225] A. Field, J. Miles, und Z. Field, *Discovering statistics using R*. Los Angeles, London, New Delhi, Singapore, Washington, DC: Sage, 2012.
- [226] F. Feng, Y. Liu, und Y. Chen, "Effects of Quantity and Size of Buttons of In-Vehicle Touch Screen on Drivers' Eye Glance Behavior," *International Journal of Human-Computer Interaction*, Bd. 34, Rn. 12, S. 1105–1118, 2017.
- [227] D. C. Visentin, M. Cleary, und G. E. Hunt, "The earnestness of being important: Reporting non-significant statistical results," (eng), *Journal of advanced nursing*, Bd. 76, Rn. 4, S. 917–919, 2020.
- [228] D. G. Altman und J. M. Bland, "Absence of evidence is not evidence of absence," (eng), *BMJ (Clinical research ed.)*, Bd. 311, Rn. 7003, S. 485, 1995.
- [229] D. Lakens, "Equivalence Tests: A Practical Primer for t Tests, Correlations, and Meta-Analyses," (eng), *Social psychological and personality science*, Bd. 8, Rn. 4, S. 355–362, 2017.
- [230] Tesla Incorporated, *Tesla Semi - The Future of Trucking*. [Online] Verfügbar: <https://www.tesla.com/semi>. Gefunden am: Dez. 16 2022.
- [231] M. Herczeg, *Interaktionsdesign: Gestaltung interaktiver und multimedialer Systeme*. München [u.a.]: Oldenbourg, 2009.
- [232] T. Schilling, "Mentale Modelle der Benutzer von Fahrerinformationssystemen," Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, 2008.
- [233] N. A. Streitz, *Learning issues for intelligent tutoring systems* (eng), Cognitive science. New York: Springer.
- [234] M. Vollrath, B. Leplow, und H. Selg, *Ingenieurpsychologie: Psychologische Grundlagen und Anwendungsgebiete*, 1st Aufl. Stuttgart: Kohlhammer, 2015.
- [235] D. A. Norman, *The design of future things*. New York, NY: Basic Books, 2007.
- [236] D. A. Norman, "Some Observations on Mental Models," in *Mental Models*, D. Gentner und A. L. Stevens, Hrsg.: Psychology Press, 1983, S. 7–14.
- [237] L. Westbrook, "Mental models: a theoretical overview and preliminary study," *Journal of Information Science*, Bd. 32, Rn. 6, S. 563–579, 2006.
- [238] W. Zhang und P. Xu, "Do I have to learn something new? Mental models and the acceptance of replacement technologies," *Behaviour & Information Technology*, Bd. 30, Rn. 2, S. 201–211, 2011.
- [239] B. C. Buckley und C. J. Boulter, "Investigating the Role of Representations and Expressed Models in Building Mental Models," in *Developing Models in Science Education*, J. K. Gilbert und C. J. Boulter, Hrsg., Dordrecht: Springer Netherlands, 2000, S. 119–135.
- [240] D. A. Norman, *The Design of Everyday Things*. New York: Basic Books, 2002.
- [241] S. Greenberg, S. Carpendale, N. Marquardt, und B. Buxton, "Uncovering the Initial Mental Model," in *Sketching User Experiences: The Workbook*. Elsevier, 2012, S. 217–226.
- [242] N. T. Richardson, A. Sprung, und B. Michel, "Entwicklung und Validierung eines Fragebogens zur Erfassung des mentalen Modells für das hochautomatisierte Fahren," *Z. Arb. Wiss.*, Bd. 73, Rn. 3, S. 312–323, 2019.

- [243] M. Beggiato und J. F. Krems, "The evolution of mental model, trust and acceptance of adaptive cruise control in relation to initial information," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Bd. 18, S. 47–57, 2013.
- [244] W. Schnotz und C. Kürschner, "External and internal representations in the acquisition and use of knowledge: visualization effects on mental model construction," *Instr Sci*, Bd. 36, Rn. 3, S. 175–190, 2008.
- [245] S. S. Silva und R. J. Hansman, "Divergence Between Flight Crew Mental Model and Aircraft System State in Auto-Throttle Mode Confusion Accident and Incident Cases," *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, Bd. 9, Rn. 4, S. 312–328, 2015.
- [246] K. Lyons, *Two people killed in fiery Tesla crash with no one driving: Authorities said it took four hours to extinguish the fire*. [Online] Verfügbar: <https://www.theverge.com/2021/4/18/22390612/two-people-killed-fiery-tesla-crash-no-driver>. Gefunden am: Jan. 21 2022.
- [247] K. Blömacher, G. Nöcker, und M. Huff, "The evolution of mental models in relation to initial information while driving automated," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Bd. 68, S. 198–217, 2020.
- [248] A. P. Wright *et al*, "A Comparative Analysis of Industry Human-AI Interaction Guidelines," Okt. 2020. [Online] Verfügbar: <http://arxiv.org/pdf/2010.11761v1>.
- [249] *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 125: Empfehlungen zur visuellen Informationsdarstellung*, EN ISO 9241-125:2017.
- [250] B. Shneiderman und C. Plaisant, *Designing the user interface: Strategies for effective human-computer interaction*. Hoboken: Pearson, 2016.
- [251] J. Nielsen, "Enhancing the explanatory power of usability heuristics," in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems celebrating interdependence - CHI '94*, New York, New York, USA: ACM Press, 1994, S. 152–158.
- [252] Apple Inc, *Human Interface Guidelines: The HIG contains guidance and best practices that can help you design a great experience for any Apple platform*. [Online] Verfügbar: <https://developer.apple.com/design/human-interface-guidelines/guidelines/overview/>. Gefunden am: Feb. 23 2023.
- [253] Google LLC, *Material Design System*. [Online] Verfügbar: <https://material.io/design>. Gefunden am: Apr. 15 2021.
- [254] *Verordnung zum Neuerlass der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung: StVZO*, 2012.
- [255] *Road vehicles — Ergonomic aspects of transport information and control systems — Specifications and test procedures for in-vehicle visual presentation*, ISO 15008:2017(E), 2017.
- [256] *Straßenfahrzeuge - Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und -assistenzsystemen - Grundsätze des Dialogmanagements und Konformitätsprüfungen*, DIN EN ISO 15005:2017-07, 2007.
- [257] *SAE J2395 ITS In-Vehicle Message Priority*, SAE J2395, 2002.
- [258] C. Gatto von der Heyde, "Fragebogenkonstruktion zur Erfassung mentaler Modelle von adaptiven Systemen," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2021.

- [259] M. Rothhämel, J. IJkema, und L. Drugge, “On a Method for Generating a Word Pool for the Description of Steering Feel,” in *AVEC 10 proceedings*, 2010.
- [260] L. Schölkopf, Gatto von der Heyde, Camilla, und F. Diermeyer, “Survey Data from 75 Truck Drivers on their Mental Models of adaptive interfaces,” Technische Universität München, Okt. 2021. [Online] Verfügbar: <https://mediatum.ub.tum.de/1631619>.
- [261] A. J. Nederhof, “Methods of coping with social desirability bias: A review,” *Eur. J. Soc. Psychol*, Bd. 15, Rn. 3, S. 263–280, 1985.
- [262] M.-M. Wolf, “Entwicklung und Evaluation eines adaptiven User Interfaces im Nutzfahrzeug,” Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2021.
- [263] M. McCurdy, C. Connors, G. Pyrzak, B. Kanefsky, und A. Vera, “Breaking the fidelity barrier,” in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA: ACM, 2006, S. 1233–1242.
- [264] I. Alvarez, L. Rumbel, und R. Adams, “Skyline,” in *Burnett, Gabbard et al. (Hg.) – Proceedings of the 7th International*, S. 101–108.
- [265] K. Pernice, *F-Shaped Pattern of Reading on the Web: Misunderstood, But Still Relevant (Even on Mobile)*. [Online] Verfügbar: <https://www.nngroup.com/articles/f-shaped-pattern-reading-web-content/>. Gefunden am: Mrz. 02 2023.
- [266] M. Quinker, “Guidelines zur Erstellung von HMI-Prototypen für Usability Studien im Nutzfahrzeugbereich,” Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2022.
- [267] J. Nielsen, “Finding usability problems through heuristic evaluation,” in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '92*, New York, New York, USA: ACM Press, 1992, S. 373–380.
- [268] J. Nielsen, *Interactive Technologies: Usability Engineering*. San Diego, Palo Alto: Elsevier Science & Technology Books; Ebrary, Incorporated [distributor], 1994.
- [269] R. Molich und J. Nielsen, “Improving a human-computer dialogue,” *Commun. ACM*, Bd. 33, Rn. 3, S. 338–348, 1990.
- [270] J. Schuster, “Designsystem für ein GUI eines digitalen Anzeige- und Bedienelements im Nutzfahrzeug,” Bachelorarbeit, Fakultät für Design, Hochschule München, München, 2022.
- [271] B. Y. Lim und A. K. Dey, “Evaluating Intelligibility Usage and Usefulness in a Context-Aware Application,” in *Lecture Notes in Computer Science, Human-Computer Interaction. Towards Intelligent and Implicit Interaction*, D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell, M. Naor, O. Nierstrasz, C. Pandu Rangan, B. Steffen, M. Sudan, D. Terzopoulos, D. Tygar, M. Y. Vardi, G. Weikum, und M. Kurosu, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 92–101.
- [272] T. Tsandilas und m. c. schraefel, “An empirical assessment of adaptation techniques,” in *CHI '05 extended abstracts on Human factors in computing systems - CHI '05*, New York, New York, USA: ACM Press, 2005, S. 2009–2012.

- [273] M. Quinker, "Akzeptanz, Usability und User Experience adaptiver Mensch-Maschine-Schnittstellen für Nutzfahrzeuge: und," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2022.
- [274] T. Boger, "Bediensicherheit und Blindbedienbarkeit adaptiver Mensch-Maschine-Schnittstellen für Nutzfahrzeuge," Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2022.
- [275] J. Bortz und C. Schuster, *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*, 7th Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [276] J. Cohen, *Statistical power analysis for the behavioral sciences*, 2nd Aufl. Hove, London: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.
- [277] J. Cohen, "A power primer," (eng), *Psychological bulletin*, Bd. 112, Rn. 1, S. 155–159, 1992.
- [278] M. Schrepp, Hinderks, Andreas, und J. Thomaschewski, *User Experience Questionnaire (UEQ)*. [Online] Verfügbar: <https://www.ueq-online.org/>. Gefunden am: Apr. 16 2021.
- [279] R. Morey, *New paper: "Why most of psychology is statistically unfalsifiable"* [Online] Verfügbar: <https://richarddmorey.medium.com/new-paper-why-most-of-psychology-is-statistically-unfalsifiable-4c3b6126365a>. Gefunden am: Feb. 15 2023.
- [280] R. J. Grissom und J. J. Kim, *Effect sizes for research: Univariate and multivariate applications*, 2nd Aufl. New York: Routledge, 2012.
- [281] L. Schölkopf *et al*, "Haptic feedback is more important than VR experience for the user experience assessment of in-car human machine interfaces," *Procedia CIRP*, Bd. 100, S. 601–606, 2021.

Vorveröffentlichungsliste

Während der Anfertigung dieser Dissertation entstanden Veröffentlichungen, Software und Studienarbeiten, in denen Teilaspekte dieser Arbeit vorgestellt wurden.

Zeitschriften; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)

[100] L. Schölkopf, C. Gatto von der Heyde, A. Sprung, und F. Diermeyer, "Reducing the Gap between Mental Models of Truck Drivers and Adaptive User Interfaces in Commercial Vehicles," *MTI*, Bd. 6, Rn. 2, S. 14, 2022.

Konferenzen, Magazine, etc.; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)

[98] L. Schölkopf, A. Kneuper, V. Hutmann, und F. Diermeyer, "Methods for Reducing the Complexity of Driving Workplaces in Commercial Vehicles," in *Lecture Notes in Networks and Systems, Advances in Human Aspects of Transportation*, N. Stanton, Hrsg, Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 34–44.

[99] L. Schölkopf, M.-M. Wolf, V. Hutmann, und F. Diermeyer, "Conception, Development and First Evaluation of a Context-Adaptive User Interface for Commercial Vehicles," in *13th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, New York, NY, USA: ACM, 2021, S. 21–25.

Patente

L. Schölkopf, V. Harsandi, H. Mohra, F. Kremser, M.-M. Wolf „Digitalisierte Bedienelemente: Contextsensitive User Interface CUI“ (am 11.10.2022 Erfindungsmeldung eingereicht)

H. Mohra, V. Harsandi, F. Kremser, M. Schwenk, D. F. Gerlinger, L. Schölkopf „Digitalisierte Bedienelemente: Anzeige & Bedienkonzept mit Favoritenfunktionen“ (am 11.10.2022 Erfindungsmeldung eingereicht)

Zeitschriften, Konferenzen, Magazine, Berichte, Konferenzvorträge und -poster, etc.; nicht Scopus/ Web of Science gelistet

[60] L. Schölkopf, A. Kneuper, V. Hutmann, und F. Diermeyer, "Digitizing Buttons: A Comparison of Digital Input Modalities to Replace Physical Buttons in Truck Cockpits," in *Human Factors in Transportation: AHFE International*, 2022.

Nicht-dissertationsrelevante Veröffentlichungen; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)

[281] L. Schölkopf *et al*, "Haptic feedback is more important than VR experience for the user experience assessment of in-car human machine interfaces," *Procedia CIRP*, Bd. 100, S. 601–606, 2021.

Dissertationsrelevante Open-Source Software

Betreute Studienarbeiten

[144] A. Kneuper, "Situations- und Funktionsanalyse für die Weiterentwicklung von Lkw-Fahrer-arbeitsplätzen," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2020.

[224] A. Kneuper, "Nutzerzentrierte Analyse von digitalisierten Anzeige- und Bedienelementen für den Einsatz im Nutzfahrzeug," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2021.

[258] C. Gatto von der Heyde, "Fragebogenkonstruktion zur Erfassung mentaler Modelle von adaptiven Systemen," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2021.

[262] M.-M. Wolf, "Entwicklung und Evaluation eines adaptiven User Interfaces im Nutzfahrzeug," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2021.

[266] M. Quinker, "Guidelines zur Erstellung von HMI-Prototypen für Usability Studien im Nutzfahrzeugbereich," Semesterarbeit, Technische Universität München, Garching, 2022.

[270] J. Schuster, "Designsystem für ein GUI eines digitalen Anzeige- und Bedienelements im Nutzfahrzeug," Bachelorarbeit, Fakultät für Design, Hochschule München, München, 2022.

[273] M. Quinker, "Akzeptanz, Usability und User Experience adaptiver Mensch-Maschine-Schnittstellen für Nutzfahrzeuge," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2022.

[274] T. Boger, "Bediensicherheit und Blindbedienbarkeit adaptiver Mensch-Maschine-Schnittstellen für Nutzfahrzeuge," Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2022.

Anhang

Anhang A	Definition der Adaptivität.....	xxxii
Anhang B	Auswahl der Bedienhardware	xxxiv
Anhang C	Konzeption und Evaluation des Interaktionskonzepts	xxxix
Anhang D	Vergleich zwischen adaptiver und statischer MMS	xl

Anhang A Definition der Adaptivität

Tabelle A.1 Übersicht über die im Rahmen der Online-Umfrage abgefragten Funktionsgruppen nach [144]

Funktionsgruppe

Innenbeleuchtung

Warnblinker

Warnbeleuchtung

Arbeitsleuchten

Klimaautomatik und Sitzklimatisierung

Manuelle Klimatisierung

Sicht

Assistenzsysteme für Fahrzeugstabilität

Dieselpartikelfilter

Differentialsperren

Traktion

Anfahrhilfen

Achsenlift

Fahrzeugniveau

Bremsfunktionen

Batterie

Audioanlage

Aufbauerfunktionen

Nebenabtrieb

Fahrerkabinenfunktionen

Lenkradverstellung

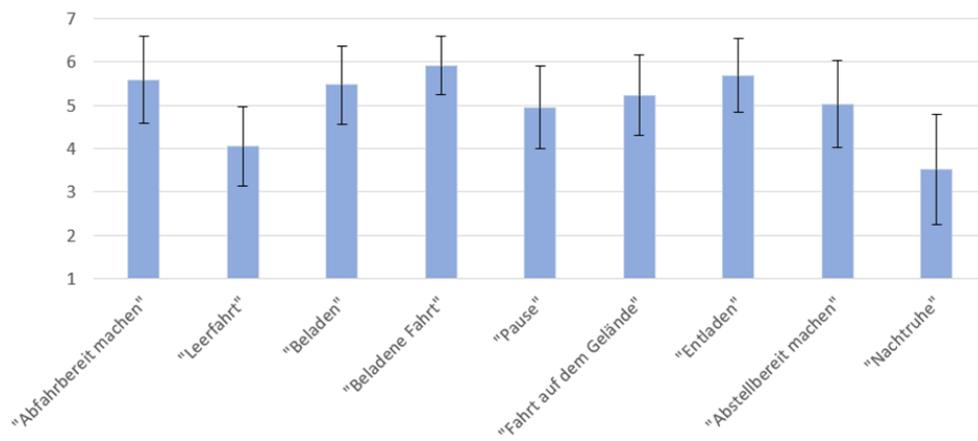


Abbildung A.1: Durchschnittliche Häufigkeit der Arbeitsphasen von 1 (tritt nie auf) bis 7 (tritt immer auf) mit eingezeichneter Standardabweichung nach [144]

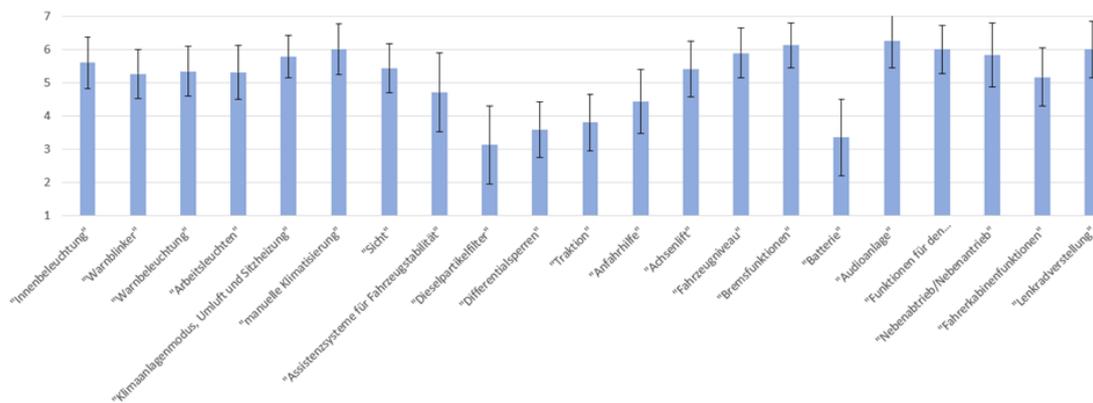


Abbildung A.2: Durchschnittliche Verwendungshäufigkeit der Funktionsgruppen von 1 (so gut wie nie) bis 7 (so gut wie immer) mit eingezeichneter Standardabweichung nach [144]

Anhang B Auswahl der Bedienhard- ware

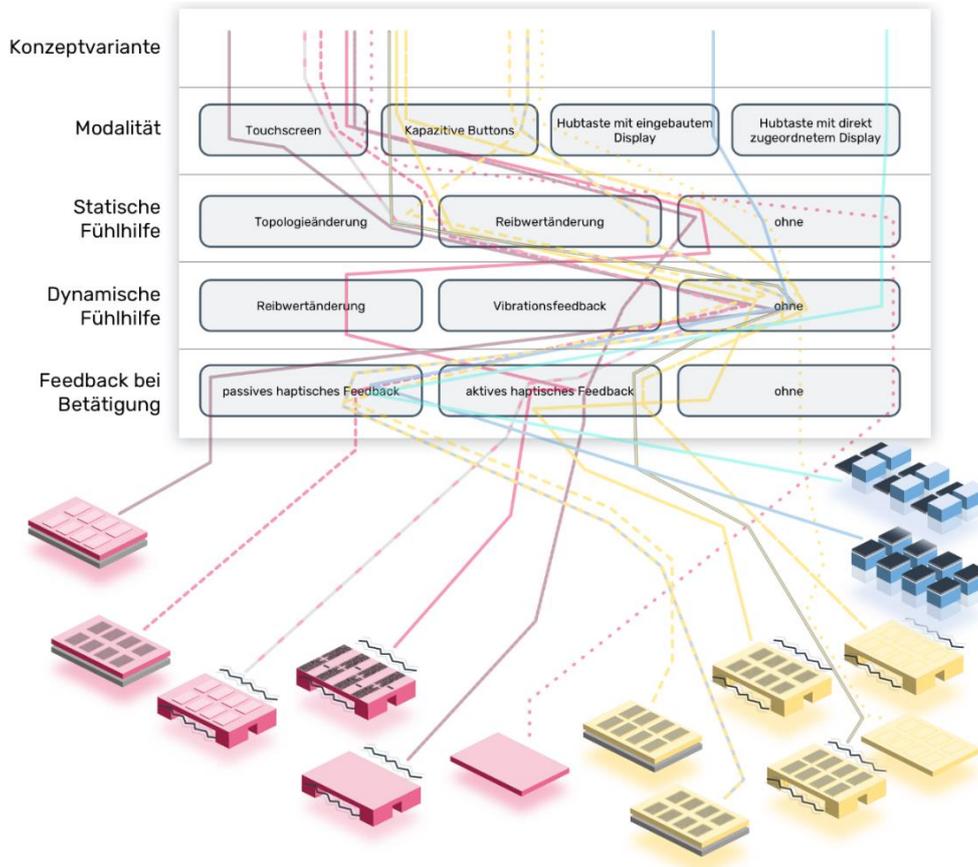


Abbildung B.1: Kombination der Ausprägungen je Eigenschaft zur Ableitung der zu bewertenden Hardwarekonzepte

Tabelle B.1 Identifizierte und gewichtete Bewertungsfaktoren zur Bewertung der Hardwarekonzepte

Kriterium	Beschreibung	Gewichtung	
		<i>M</i>	<i>SD</i>
Anpassungsfähigkeit	Begeistert die Technik durch Individualisierbarkeit und ist auf die Nutzergruppe zugeschnitten?	6.57	1.40
Design	Ist eine Cockpit Gestaltung gemäß der markenspezifische Designrichtlinien gerechte Gestaltung möglich?	5.86	2.91
Außenwirkung und Prestige	Wie wichtig ist die Außenwirkung auf dem Markt?	7.29	1.89
Vereinbarkeit mit Markenphilosophie	Fügt sich die Technologie in die Umgebung ein, die der Nutzer von anderen Produkten des Herstellers ein?	6.71	2.06
Flexibilität	Wie flexibel und dynamisch kann die GUI gestaltet bzw. Interaktionselemente angeordnet werden?	5.86	3.39
Blindbedienbarkeit	Lassen sich Interaktionselemente blind auffinden und ist bei der Betätigung ein Feedback vorhanden?	6.43	2.15
Technologiereife	Eignet sich die Technologie für den Einsatz in Serienprodukten?	7.14	2.19
Zukunftssicherheit	Wird die Technologie in naher Zukunft durch bessere technische Lösung überholt?	5.86	2.19
Robustheit	Ist die Bedienhardware mechanisch robust und langlebig?	8.57	1.90
Bauraum	Ist der Platzbedarf der Bedienhardware mit den Bauraumanforderungen eines Nutzfahrzeugs vereinbar?	5.00	2.65
Ausfallsicherheit	Können auch sicherheitskritische Funktionen, welche nach ASIL Anforderungen ausfallsicher sein müssen, bedient werden?	5.86	2.79
Ergonomie	Ist eine ermüdungsfreie und kraftarme Bedienung gewährleistet?	5.71	2.69
Bediensicherheit	Ist eine Bedienung auch bei Schwingung und Vibration des Fahrzeugs sicher möglich?	5.86	2.41
Wirtschaftlichkeit	Sind die Kosten für den Einsatz in einem Serienprodukt tragbar?	7.00	3.70
Wertigkeit in der Bedienung	Wie wertig wirkt die Bedienhardware hinsichtlich Haptik, Akustik und taktilen Eigenschaften?	8.00	1.15
Reduktion der Variantenvielfalt	Können durch den Einsatz ausstattungspezifische Hardwarevarianten reduziert und somit Kosten eingespart werden?	6.00	3.74
Alltagstauglichkeit	Werden Aspekte der Alltagstauglichkeit gewährleistet (Vermeidung von Fugen und Fingerabdrücken, Gewährleistung einer Bedienbarkeit mit Handschuhen) und sind alle Einsatzszenarien des Lkw abdeckbar?	7.33	2.16
Ablenkung	Sind benötigte Blickabwendung von der Straße und kognitive Einbindung in die Interaktion für ein Nutzfahrzeug angemessen?	7.67	1.51

Tabelle B.2 Ausprägungen der Eigenschaften aller 14 abgeleiteter Hardwarekonzepte

Konzept	Modalität	Statische Fühlhilfe	Dynamische Fühlhilfe	Feedback bei Betätigung
Touch 1	Touchdisplay	Ohne	Ohne	Ohne
Touch 2	Touchdisplay	Ohne	Ohne	Aktives haptisches Feedback
Touch 3	Touchdisplay	Fühlstege	Ohne	Aktives haptisches Feedback
Touch 4	Touchdisplay	Fühlstege	Ohne	Passives haptisches Feedback
Touch 5	Touchdisplay	Oberflächenrauheit	Ohne	Passives haptisches Feedback
Touch 6	Touchdisplay	Ohne	Elektrostatische Reibwertänderung	Aktives haptisches Feedback
Kapazitiv 1	Kapazitive Tasten	Ohne	Ohne	Ohne
Kapazitiv 2	Kapazitive Tasten	Oberflächenrauheit	Ohne	Passives haptisches Feedback
Kapazitiv 3	Kapazitive Tasten	Oberflächenrauheit	Ohne	Passives haptisches Feedback
Kapazitiv 4	Kapazitive Tasten	Nicht vorhanden	Ohne	Aktives haptisches Feedback
Kapazitiv 5	Kapazitive Tasten	Oberflächenrauheit	Ohne	Aktives haptisches Feedback
Kapazitiv 6	Kapazitive Tasten	Oberflächenrauheit	Ohne	Aktives haptisches Feedback
Taster 1	Hubtaster mit zugeordneten Displays	Durch Hubtaster	Ohne	Passives haptisches Feedback
Taster 2	Hubtaster mit integrierten Displays	Durch Hubtaster	Ohne	Passives haptisches Feedback

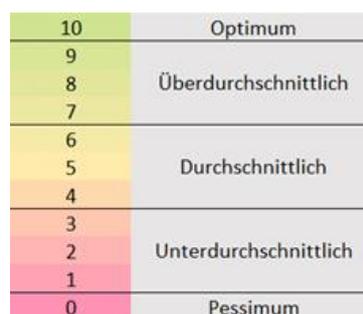


Abbildung B.2: An Schweizer [222, S. 177] angelegte Skala zur Bewertung der Lösungen anhand identifizierter Kriterien mit Adjektiven und farblicher Codierung

Kriterium	Touch 1		Touch 2		Touch 3		Touch 4		Touch 5		Touch 6		Kapazitiv 1		Kapazitiv 2		Kapazitiv 3		Kapazitiv 4		Kapazitiv 5		Kapazitiv 6		Taster 1		Taster 2					
	Punkte	Gewichtete Punkte																														
Anpassungsfähigkeit	10	65,71	10	65,71	8	52,57	10	65,71	8	52,57	10	65,71	8	52,57	8	52,57	8	52,57	8	52,57	8	52,57	8	52,57	8	52,57	8	52,57	8	52,57		
Design	10	58,57	9	52,71	9	52,71	9	52,71	9	52,71	9	52,71	9	46,86	7	41,00	7	41,00	7	41,00	7	41,00	7	41,00	7	41,00	7	41,00	7	41,00	7	41,00
Außenwirkung und Prestige	7	51,00	8	58,29	9	65,57	9	65,57	8	58,29	10	72,86	6	43,71	7	51,00	8	58,29	7	51,00	8	58,29	7	51,00	8	48,71	7	51,00	6	43,71	7	51,00
Vereinbarkeit mit Marktpolizist	4	26,86	5	33,57	6	40,29	6	40,29	5	33,57	4	26,86	4	26,86	5	33,57	5	33,57	5	33,57	5	33,57	5	33,57	5	33,57	5	33,57	5	33,57	5	33,57
Flexibilität	10	58,57	10	58,57	6	35,14	6	35,14	6	35,14	6	35,14	10	58,57	5	29,29	5	29,29	5	29,29	5	29,29	5	29,29	5	29,29	5	29,29	5	29,29	5	29,29
Blindbenutzbarkeit	0	0,00	4	25,71	7	45,00	5	32,14	5	32,14	5	32,14	5	32,14	0	0,00	5	32,14	7	45,00	4	25,71	7	45,00	5	32,14	10	64,29	10	64,29	9	64,29
Technologieerf.	10	71,43	9	64,29	9	64,29	5	35,71	5	35,71	5	35,71	4	28,57	10	71,43	5	35,71	5	35,71	9	64,29	9	64,29	9	64,29	10	71,43	9	64,29	9	64,29
Zukunftsicherheit	5	29,29	7	45,00	7	45,00	5	35,71	5	35,71	5	35,71	4	28,57	4	28,57	4	28,57	4	28,57	5	35,71	5	35,71	6	42,86	3	17,14	3	17,14	3	17,14
Robustheit	8	68,57	7	60,00	7	60,00	6	51,43	6	51,43	6	51,43	7	60,00	6	51,43	6	51,43	6	51,43	7	60,00	7	60,00	7	60,00	5	42,86	4	34,29	5	42,86
Barraum	9	45,00	5	25,00	5	25,00	2	10,00	2	10,00	2	10,00	4	20,00	6	30,00	2	10,00	2	10,00	5	25,00	5	25,00	5	25,00	5	25,00	5	25,00	5	25,00
Ausfallicherheit	5	29,29	5	29,29	6	42,86	6	42,86	5	35,71	5	35,71	5	35,71	5	35,71	6	42,86	6	42,86	6	42,86	6	42,86	6	42,86	6	42,86	6	42,86	6	42,86
Ergonomie	0	0,00	3	17,14	7	42,86	4	28,57	5	35,71	5	35,71	4	28,57	0	0,00	5	35,71	6	42,86	3	17,14	7	42,86	6	42,86	6	42,86	6	42,86	6	42,86
Bedienbarkeit	4	25,71	4	25,71	3	21,00	3	21,00	3	21,00	3	21,00	4	28,57	5	35,71	3	21,00	3	21,00	4	28,57	4	28,57	4	28,57	4	28,57	4	28,57	4	28,57
Wirtschaftlichkeit	8	56,00	7	49,00	6	42,00	6	42,00	6	42,00	6	42,00	6	42,00	6	42,00	6	42,00	6	42,00	6	42,00	6	42,00	6	42,00	6	42,00	6	42,00	6	42,00
Wertigkeit in der Bedienung	7	56,00	8	64,00	9	72,00	8	64,00	8	64,00	8	64,00	8	64,00	8	64,00	8	64,00	8	64,00	8	64,00	8	64,00	8	64,00	8	64,00	8	64,00	8	64,00
Reduktion der Variantenvielfalt	8	48,00	7	42,00	7	42,00	8	48,00	8	48,00	8	48,00	8	48,00	8	48,00	8	48,00	8	48,00	8	48,00	8	48,00	8	48,00	8	48,00	8	48,00	8	48,00
Alltagstauglichkeit	2	14,67	4	29,33	5	36,67	5	36,67	5	36,67	5	36,67	5	36,67	2	14,67	5	36,67	5	36,67	4	29,33	5	36,67	4	29,33	7	51,33	7	51,33	8	58,67
Ablenkung	3	23,00	5	38,33	6	46,00	6	46,00	6	46,00	6	46,00	6	46,00	3	23,00	6	46,00	6	46,00	5	38,33	6	46,00	5	38,33	4	30,67	4	30,67	8	61,33
Punkte ungewichtet	107	117	109	109	102	102	116	116	99	99	104	104	107	107	122	122	115	115	113	113	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	
Punkte gewichtet	707,61	777,52	840,00	840,00	680,33	680,33	772,86	772,86	680,81	680,81	696,67	696,67	716,10	716,10	815,14	815,14	767,24	767,24	767,24	767,24	826,00	826,00	826,00	826,00	826,00	826,00	826,00	826,00	826,00	826,00	826,00	826,00
Platzierung	10	5	8	8	12	12	6	6	14	14	13	13	9	9	4	4	7	7	7	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	

Abbildung B.3: Durch Fachexperten bewertete Hardwarekonzepte

Tabelle B.3 Deskriptive Statistik der für Fragestellung 1 relevanten Metriken

	Durchschnittliche Anzahl krit. Blicke		Mittlere Blickdauer [ms]		SDLP [m]		Mittlere Bedienzeit [ms]	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
Taster 1	6,60	5,04	711,93	541,83	0,17	0,05	6691,26	1028,28
Taster 2	6,00	6,55	688,58	611,65	0,17	0,05	6667,45	1000,87
Touch 3	4,60	5,23	479,73	467,74	0,19	0,06	8103,09	2628,69

Tabelle B.4 Deskriptive Statistik der für Fragestellung 2 relevanten Metriken

	Nützlichkeit		Zufriedenheit	
	MW	SD	MW	SD
Taster 1	0,63	0,61	0,38	0,62
Taster 2	0,63	0,56	0,17	0,44
Touch 3	0,51	0,66	0,04	0,62

Anhang C Konzeption und Evaluation des Interaktionskonzepts

Tabelle C.1 Deskriptive Statistik des anhand des erstellten Fragebogens erfassten initialen mentalen Modells der N = 75 Lkw-Fahrer von einer adaptiven MMS

Dimension	Mittelwert	Standardabweichung
Systemzustand und Transparenz	4,43	1,00
Intelligenz und Nutzeradaptivität	4,72	0,95
Kontextsensitivität	4,67	0,92
Nutzerkontrolle	5,06	0,92

Anhang D Vergleich zwischen adaptiver und statischer MMS



Abbildung D.1: Während des Versuchs durchlaufene Fahrsituationen zur Nachstellung eines Ausschnitts eines typischen Arbeitsalltags

Tabelle D.1 Deskriptive Statistik der für Hypothese H1 relevanten Metriken

	SDLP		Anzahl TLC _{krit}	
	MW	SD	MW	SD
aMMS	0,12	0,06	11	10,06
sMMS	0,11	0,07	9,71	10,96

Tabelle D.2 Deskriptive Statistik der für Hypothese H2 relevanten Metriken

	Gesamte Blickzeit [ms]		Anzahl kritischer Blicke	
	MW	SD	MW	SD
aMMS	3837,39	2365,68	7,56	10,12
sMMS	3120,05	2263,74	4,93	6,76

Tabelle D.3 Deskriptive Statistik des System Usability Scale Fragebogens für Hypothese H3

System Usability Scale		
	MW	SD
aMMS	71,37	21,85
sMMS	65,81	21,86

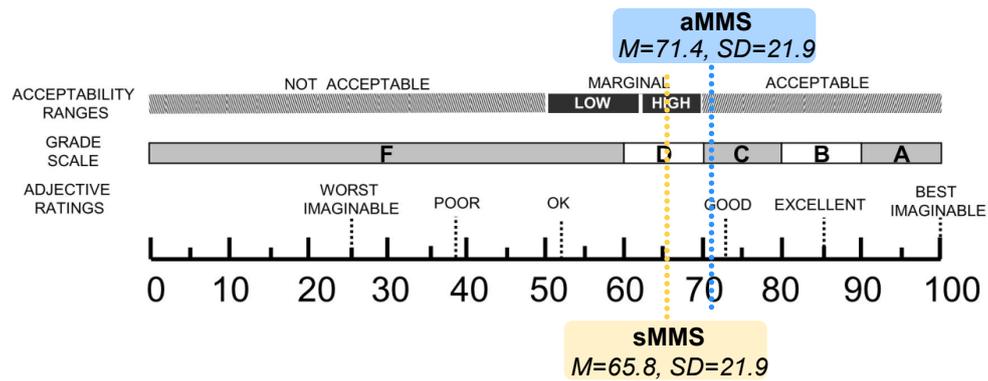


Abbildung D.2: Einordnung der Ergebnisse der anhand des Fragebogens System Usability Score erfassten subjektiven Gebrauchstauglichkeit nach Bangor et al. [86, S. 121]

Tabelle D.4 Deskriptive Statistik der für Hypothese H4 relevanten Metriken

	Durchschnittliche Bedienzeit [s]		Anzahl Bedienfehler	
	MW	SD	MW	SD
aMMS	7,36	2,09	2,55	2,86
sMMS	4,79	2,22	5,58	4,20

Tabelle D.5 Deskriptive Statistik der Skalen Nützlichkeit und Zufriedenheit des Fragebogens zur Erfassung der Akzeptanz nach Van der Laan et al. [96] für Hypothese H5

	Nützlichkeit		Zufriedenheit	
	MW	SD	MW	SD
aMMS	1,08	0,69	0,97	0,83
sMMS	0,76	0,76	0,69	0,90

Tabelle D.6 Überprüfung der Annahme normalverteilter Differenzen zwischen den Gruppen aMMS und sMMS für den Fragebogen User Experience Questionnaire

Dimension	W-Wert	p-Wert
Attraktivität	0,979	0,792
Durchschaubarkeit	0,977	0,716
Effizienz	0,974	0,624
Originalität	0,973	0,584
Steuerbarkeit	0,968	0,254
Stimulation	0,975	0,664

Tabelle D.7 Deskriptive Statistik des Fragebogens User Experience Questionnaire für die Gruppen aMMS und sMMS für Hypothese H7

	Attraktivität		Durchschaubarkeit		Effizienz		Originalität		Steuerbarkeit		Stimulation	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
aMMS	1,35	1,31	0,97	1,51	1,07	1,13	1,49	0,93	1,02	1,33	1,69	0,86
sMMS	0,82	1,33	0,95	1,49	0,94	1,19	-0,69	1,34	1,08	1,28	0,32	1,15

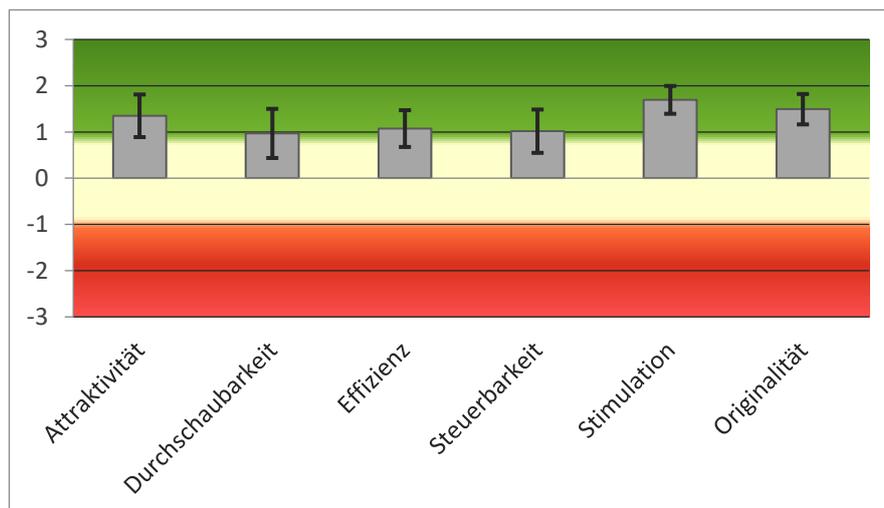


Abbildung D.3: Einordnung der Ergebnisse für das System aMMS der anhand des Fragebogens UEQ erfassten subjektiven User Experience nach Schrepp et al. [278]

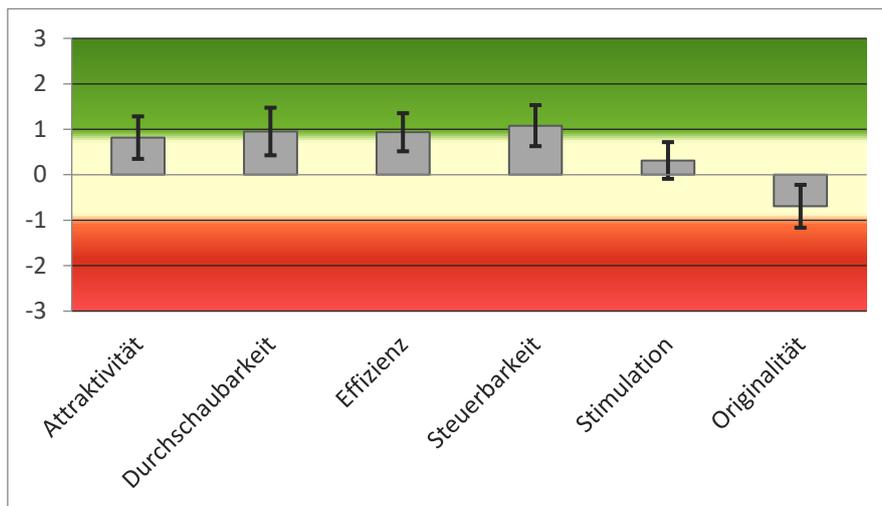


Abbildung D.4: Einordnung der Ergebnisse für das System sMMS der anhand des Fragebogens UEQ erfassten subjektiven User Experience nach Schrepp et al. [278]

Tabelle D.8 Deskriptive Statistik des explorativen Vergleichs des initialen und retrospektiven mentalen Modells

	Systemzustand und Transparenz		Intelligenz und Nutzeradaptivität		Kontextsensitivität		Nutzerkontrolle	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
Initial	4,43	1,00	4,72	0,95	4,67	0,92	5,06	0,92
retrospektiv	3,81	1,12	3,39	1,29	3,37	1,32	4,02	1,22

Tabelle D.9 Positive und negative genannte Aspekte der aMMS mit respektiver Nennungshäufigkeit nach [273]

Positive Aspekte	Negative Aspekte
Zentrale Anordnung der MMS (10)	Nichts zu kritisieren (8)
Beschriftung der Funktionen (8)	Position der MMS zu weit unten (6)
Übersichtlichkeit (8)	Ablenkende Bedienung (5)
Kontextsensitivität (7)	Lange Eingewöhnung (5)
Haptische Rückmeldung der MMS (6)	Suchen der Funktionen notwendig (3)
Intuitivität / Eindeutigkeit (6)	Wirkt Überladen (2)
Symbole und Icons (4)	Wirkt unübersichtlich (2)
Einfache Bedienung (4)	Bedienung der Rückfallebene ablenkend (2)
Möglichkeit der Individualisierung (3)	
Größe der Bedienelemente (3)	
Grafische Darstellung (2)	
Modern (2)	
Möglichkeit der statischen Rückfallebene (2)	

Tabelle D.10 Positive und negative genannte Aspekte der sMMS mit respektiver Nennungshäufigkeit nach [273]

Positive Aspekte	Negative Aspekte
Einfache Bedienung (10)	Erreichbarkeit der Taster im Kniebereich (18)
Altbewährtes Konzept (10)	Icons der Funktionen teilweise unbekannt (8)
Übersichtlichkeit (7)	Hohe räumliche Verteilung (7)
Direkte Statusrückmeldung der Funktionen (5)	Icons der Funktionen schwer zu unterscheiden (6)
Eigenschaften der physischen Taster (5)	Wirkt altmodisch (2)
Selbsterklärende Bedienung (3)	
Verortung der Funktionen Sonnenrollo, Glashubdach und Innenlicht (3)	
Schnelle Bedienung (3)	
Taster im Bereich der Mittelkonsole (3)	
Größe der Taster (2)	
Einzelne Taster dürfen versteckt sein, z.B. im Kniebereich oder Dachhimmel (2)	