

Fahrer-Fahrzeug Interaktion für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen

Jana Fank

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung einer
Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

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

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp
2. Prof. Dr. phil. Mark Vollrath

Die Dissertation wurde am 14.12.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Engineering and Design am 08.03.2023 angenommen.

„Alles ist schwer, bevor es leicht ist“ – Thomas Fuller

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München im Rahmen des Forschungsprojekts IMAGinE von 2016 bis 2021.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp für die Möglichkeit zur Promotion und das entgegengebrachte Vertrauen bedanken. Vielen Dank für Deine Betreuung, den kontinuierlichen fachlichen und konzeptionellen Rat und gleichzeitig den inhaltlichen Freiraum für die Erstellung dieser Arbeit. Deine Motivation und Optimismus zeichnen die Arbeitsatmosphäre des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik aus - ich habe hier gerne gearbeitet.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr.-phil. Mark Vollrath für die Zweitprüfung der Arbeit und bei Prof. rer. nat. Sonja Berensmeier für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ein weiterer Dank geht an die Mitglieder des IMAGinE-Konsortiums und der Arbeitsgruppe HMI für die fachlichen, interessanten Diskussionen.

Mein besonderer Dank gilt meinen Kollegen für die tolle und inspirierende Zeit am Lehrstuhl. Vielen Dank für den fachlichen Austausch während der Doktorandenkolloquien und den Kaffeepausen, sowie die unvergesslichen Momente bei FTM-Veranstaltungen. Insbesondere möchte ich mich bei Christian Knies, Natalie Richardson, Adam Waclaw, Alexander Heilmeyer, Tanja Gewalt und Michael Wittmann bedanken. Durch Euch wurde dieser Weg zu etwas ganz Besonderem für mich.

Ebenso möchte ich mich bei den Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften bedanken, die mit mir an diesem Projekt mit Engagement und Begeisterung gearbeitet haben. Mein Dank geht insbesondere an Lukas Gliniorz, Selina Smialy, Noyan Tillman und Jana Rolny. Ihr habt mit Eurem Einsatz wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Besonders Danken möchte ich den Korrektoren Natalie Richardson, Christian Knies, Jutta Stier, Lisa und Philippe Fank für die investierte Zeit und Mühe, wodurch die Qualität dieser Arbeit gesteigert wurde.

Der größte Dank gilt meinem Mann Philippe und meinen Kindern Mathilda und Benedikt. Für Eure Geduld und Euer Verständnis in allen Phasen sowie für den Rückhalt und die Bestärkung, auf dem richtigen Weg zu sein.

Garching, im Dezember 2022

Jana Fank

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Wissenschaft	7
2.1 Grundlagen der Fahrer-Fahrzeug Interaktion	7
2.1.1 Fahraufgabe.....	7
2.1.2 Fahrer-Fahrzeug Regelkreis.....	8
2.1.3 Automation	8
2.1.4 Mentales Modell.....	10
2.1.5 Situationsbewusstsein	11
2.2 Technologieakzeptanz	11
2.2.1 Vertrauen	12
2.2.2 Usability.....	13
2.2.3 User Experience	14
2.3 Vermenschlichung und Anthropomorphismus	15
2.3.1 Definition, Entstehung und Auswirkungen auf den Menschen	16
2.3.2 Bestehende vermenschlichte HMI-Konzepte im Fahrzeug.....	18
2.4 Kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen	19
2.4.1 Definition Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen.....	20
2.4.2 Dilemma des Lkw-Fahrers bei Überholmanövern.....	21
2.4.3 Kooperation im Straßenverkehr.....	21
2.4.4 CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen	24
2.5 Herausforderungen und Empfehlungen für die HMI-Gestaltung des CoDAS	27
2.5.1 Gemeinsame Wissensbasis der Kooperationspartner.....	27
2.5.2 Abstimmungsprozess zwischen den Kooperationspartnern	28
2.5.3 Zustimmung der Partner zur Kooperation	29
2.6 Bestehende HMI-Konzepte für das CoDAS	30

3	Forschungsfragen und Vorgehen	33
3.1	Fazit zum Stand der Wissenschaft	33
3.1.1	Anwendbarkeit bestehender HMI-Konzepte	34
3.1.2	Aufgabenstellung	35
3.2	Forschungsfragen	36
3.3	Vorgehen und Methodik	36
3.3.1	Nutzerzentrierter Entwicklungsprozess	36
3.3.2	Evaluationsmethode Fahrsimulatorstudien	38
4	Explorative Anforderungsanalyse	41
4.1	Fahrsimulatorstudie zur Ermittlung des Nutzungskontext	41
4.2	Befragungen zur Ermittlung der Nutzeranforderungen	44
4.2.1	Befragung I: Nutzeranforderungen an eine HMI für ein CoDAS	44
4.2.2	Befragung II: Nutzeranforderungen an eine vermenschlichte HMI im Lkw	45
5	Konzeptentwicklung und Evaluation	47
5.1	HMI-Konzept für das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen	47
5.1.1	Konzeptentwurf	47
5.1.2	Studie I: Evaluation Prototyp 1.0	50
5.1.3	Studie II: Evaluation Prototyp 2.0	53
5.1.4	Resultierendes HMI-Konzept	55
5.2	Vermenschlichtes HMI-Konzept	56
5.2.1	Konzeptentwurf	57
5.2.2	Studie III: Evaluation der menschlichen Charakteristiken Identität & Emotion	59
5.2.3	Studie IV: Evaluation der menschlichen Charakteristiken Mimik & Gestik	61
5.2.4	Resultierendes vermenschlichtes HMI-Konzept	63
6	Summative Evaluation	65
6.1	Zielsetzung und Fragestellung	65
6.1.1	Kooperatives Fahrverhalten	66
6.1.2	Qualitäten der HMI	67
6.2	Methodik	68
6.2.1	Versuchsaufbau	69
6.2.2	Studiendesign	69
6.2.3	Fahrszenarien und Versuchsstrecken	70
6.2.4	Datenerhebung	73
6.2.5	Versuchsplan	75

6.2.6	Stichprobe	75
6.3	Ergebnisse	77
6.3.1	Kooperatives Fahrverhalten	77
6.3.2	Qualität der HMI	81
6.3.3	Einfluss der Technikbereitschaft.....	83
6.3.4	Einfluss des Anthropomorphismus	83
6.3.5	Präferenz	84
6.4	Diskussion der Ergebnisse	85
6.4.1	Beantwortung der Studienfragen.....	85
6.4.2	Berücksichtigung der Präferenz	89
6.4.3	Limitation.....	89
6.4.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse.....	90
7	Diskussion und Ausblick.....	93
7.1	Erhöhung der Kooperationsbereitschaft.....	93
7.1.1	Wesentliche Gestaltungsempfehlungen.....	94
7.1.2	Weiterer Forschungsbedarf	95
7.1.3	Übertragbarkeit auf höhere Automatisierungsgrade	96
7.2	Gesteigerter Nutzen durch Vermenschlichung	97
7.2.1	Weitere Erkenntnisse.....	97
7.2.2	Weiterer Forschungsbedarf	98
8	Zusammenfassung.....	99
	Abbildungsverzeichnis.....	i
	Tabellenverzeichnis	v
	Literaturverzeichnis	vii
	Vorveröffentlichungsliste.....	xxxi
	Anhang.....	xxxiii

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

Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeine Deutsche Automobil-Club e.V.
ADAS	Advanced Driver Assistance System
CAM	Cooperative Awareness Message
CASA	Computer-are-Social-Actors
CoDAS	Cooperative Driver Assistance System
COFOR	Common Frame of Reference
COMPANION	Cooperative dynamic formation of Platoons for safe and energy-optimized goods transportation
CPM	Collective Perception Message
DENM	Decentralized Environmental Notification Message
F _L	Fahrzeuglänge
GUI	Graphical User Interface
HMI	Human Machine Interface
ICo	Intelligent Co-Driver for Truck Drivers
IDAQ	Individual Differences in Anthropomorphism Questionnaire
ITS	Intelligent Transportation System
JCS	Joint Cognitive System for driving
LCDAS	Lane Change Decision Aid Systems
LDW	Spurverlassenswarner
Lkw	Lastkraftwagen
M	Mittelwert
MCM	Maneuver Coordination Message
Pkw	Personenkraftwagen
RA	Roboter Assistent
ROS	Robot Operating System
SA	Sprachassistent
S _{APre}	Sicherheitsabstand vor dem Ausscheren
S _{APost}	Sicherheitsabstand nach dem Einscheren
SAM	Self-Assessment Manikin
SD	Standardabweichung

StVO	Straßenverkehrsordnung
SUS	System Usability Scale
TAM	Technologieakzeptanzmodell
TTC	Time-to-Collision
UbiTAM	Technologieakzeptanzmodell für zukünftige ubiquitäre Systeme
UEQ-S	User-Experience-Questionnaire short
UX	User Experience
VA	Virtueller Assistent
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-everything
WoZ	Wizard-of-Oz

1 Einleitung

Der Güterverkehr auf der Straße steht außer Konkurrenz [1, 2]. Zuletzt lief in Deutschland rund drei Viertel der Beförderungsleistung im Güterverkehr über die Straße [3]. Und auch in Zukunft wird der Lastkraftwagen (Lkw) ein wichtiger Leistungsträger der Wirtschaft bleiben [2]. Mittel-, als auch langfristig wird mit einer Steigerung des Straßengüterverkehrs gerechnet [4, 5]. Besonders der stetig wachsende E-Commerce Logistikmarkt [6] bringt eine erhöhte Nachfrage von Post-, Kurier- und Expressdienste [7] mit sich. Bis 2030 soll der weltweite Straßengüterverkehr 31.000 und bis zum Jahr 2050 bis zu 51.000 Milliarden Tonnenkilometer zurücklegen (vgl. 2015 - 20.000 Milliarden Tonnenkilometer) [8].

Das autonome Fahren zeichnet sich zwar bereits am Horizont ab – Forschung und Wirtschaft gehen von einem Zeitraum zwischen 15 und 25 Jahren aus [9] – bis dahin ist der Lkw-Fahrer jedoch weiterhin fester Bestandteil des Güterverkehrs.

Trotz dieser hohen Relevanz ist das Berufsbild des Lkw-Fahrers wenig attraktiv: Den Lkw-Fahrer setzt der zunehmende Leistungsdruck bzw. Zeitstress bei der Lieferung ihrer Ware zu [10]. Die Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Ruhe- und Lenkzeiten bei gleichzeitigem Druck, die transportierte Ware pünktlich anzuliefern, führt zu mentalem Stress [11, 12] und einem negativen Arbeitsklima unter den Fahrern [13]. Gleichzeitig sehen sich Lkw-Fahrer einem steigenden gesellschaftlichen Druck ausgesetzt. So beklagen die Lkw-Fahrer gehäuft die negative Einstellung der Öffentlichkeit gegenüber ihrem Beruf und werben um mehr Verständnis [14]. Sie fühlen sich von der Gesellschaft, insbesondere Pkw-Fahrern, respektlos behandelt und nicht wertgeschätzt [15–18].

Ein Verkehrsmanöver, in dem der beschriebene Konflikt zwischen gesetzlich geregelten Ruhe- und Lenkzeiten, Lieferdruck, steigender Auslastung der Straße und das steigende Konfliktpotenzial mit anderen Verkehrsteilnehmern unmittelbar aufeinandertreffen, ist das Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen. In einer Befragung unter Mitglieder des Allgemeine Deutsche Automobil-Club e.V. (ADAC) gehört es seit Jahren zu der Liste der heftig kritisierten Fahrsituationen [19].

„Elefantenrennen“ beschreibt ein langes Überholmanöver zweier Lkw auf der Autobahn (Abbildung 1.1), das durch die geringe relative Geschwindigkeit zwei Fahrsteifen über eine lange Distanz für den rückwärtigen Verkehr blockiert. Der Lkw überholt, um nicht durch langsamere Fahrzeuge Zeit zu verlieren. Für Personalkraftwagen (Pkw)-Fahrer oftmals nicht begreiflich [20], kann ein geringfügig langsames Fahrzeug, das den Lkw bremst, ein zeitliches Risiko sein. Bereits 30 Minuten Verzögerung (5 km/h Differenz, bei 600 km Tagesdistanz [21]) können dafür sorgen, dass ein Fahrer unter Einhaltung der gesetzlich geregelten Lenk- und Ruhezeiten, die Ware nicht wie geplant abliefern kann. Der positive Verlauf eines Lkw-Überholmanöver hängt maßgeblich von der Einschätzung des überholenden Lkw-Fahrers ab. Dieser bereitet das Manöver unter Berücksichtigung der vorausliegenden Straßentopologie sowie einer Einschätzung des Leistungsgewicht des zu überholenden Lkw vor.



Abbildung 1.1: Ein Lkw-Überholmanöver auf einer Autobahn

Sind die Abschätzungen falsch, ungenau oder ist dem Lkw-Fahrer der rückwärtige Verkehr schlichtweg egal, führt dies zu dem beschriebenen Elefantenrennen oder gar zum Abbruch des Überholmanövers. In jedem Fall wird dadurch der Verkehrsfluss erheblich behindert [22].

Das Lkw-Überholmanöver ist häufig energetisch und bezogen auf den Verkehrsfluss ineffizient [23], darüber hinaus geprägt durch ein hohes Konfliktpotential unter den Verkehrsteilnehmern [16] und sicherheitskritisch [24]. In der Absicht, den rückwärtigen Verkehr nicht länger als notwendig zu behindern und damit das Konfliktpotential mit den anderen Verkehrsteilnehmern zu minimieren, nimmt der Lkw-Fahrer einen reduzierten Sicherheitsabstand in Kauf [25] und schert zu knapp vor bzw. zu knapp nach dem zu überholenden Lkw aus und ein. Pkw-Fahrer fühlen sich durch diesen abrupten Spurwechsel und dem erforderlichen raschen Bremsmanöver in ihrer Sicherheit gefährdet [16]. 2021 waren ca. ein Drittel (32 %) aller Unfälle auf deutschen Autobahnen mit Personenschaden unter Beteiligung von Lkw [26]. War der Lkw-Fahrer Unfallverursacher, war in 27 % der Fälle ein zu geringer Abstand Grund für den Unfall und in 9 % Fehler während des Überholvorgangs [27].

1.1 Motivation

Um die Sicherheit und Verkehrseffizienz zu erhöhen sowie das Konfliktpotential zwischen den Pkw- und Lkw-Fahrer zu reduzieren, können Lkw-Überholmanöver auf bestimmten Autobahnabschnitten (wie z.B. Autobahnkreuze, enge Kurven etc.) verboten werden [28, 29]. Ein allgemeines Verbot ist jedoch nicht zielführend [23]. Verkehrsuntersuchungen zeigen, dass ein pauschales Verbot vermehrt zu Lkw-Staus auf der rechten Fahrspur [30] und damit zu erheblichen Zeitverlusten für die gesamte Lkw-Flotte führen [31]. Unter Berücksichtigung des steigenden Volumens des Güterverkehrs ist dies gesamtwirtschaftlich betrachtet ein erheblicher Schaden und keine umsetzbare Lösung.

Nach Ansicht der Logistikbranche ist der Einsatz von Technologie und Automation unabdingbar, um der Nachfrage des Straßengüterverkehrs gerecht zu werden, die Verkehrssicherheit zu erhöhen und die Arbeitsbedingungen zu verbessern [8]. Die beschriebene Problematik von Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen kann durch eine kollektive Sensorik der beteiligten

Verkehrsteilnehmer untereinander abgestimmt werden. Dadurch wird das Manöver effizienter und sicherer [21, 23, 25, 32]: Durch den Austausch relevanter Fahr- sowie Fahrzeugdaten kann der ideale Streckenabschnitt, -zeitpunkt sowie Geschwindigkeiten für ein Überholmanöver bestimmt werden. Die zugrunde liegende Vehicle-to-Everything (V2X) Technologie findet bereits im Lkw-Platoon Anwendung ([33]; Platoon = Fahrzeuge fahren mit reduziertem Sicherheitsabstand vernetzt in einer Kolonne). Bezogen auf Lkw-Überholmanöver kann der reduzierte Sicherheitsabstand durch V2X abgesichert werden, wodurch sich die Überholstrecke und damit die Überholzeit reduzieren lässt [25].

Das hier beschriebene kooperative Fahrerassistenzsystem wird weiterhin die volle Verantwortung der Fahrer erfordern (SAE Level 0-2). Es könnte aber im Vergleich zu Lösungen mit einem höheren Automatisierungsgrad (SAE-Level 3-5) zeitnah auf den Markt gebracht werden. Die für dieses System notwendige Technologie (ITS-G5 – V2X Kommunikation in Echtzeit), ist bereits heute schon im Fahrzeug verfügbar [34]. MERTENS [21] zeigt in seiner Untersuchung, dass ein solches Fahrerassistenzsystem technologisch machbar und auch zielführend ist.

Neben der technologischen Machbarkeit als Voraussetzung entscheidet die eigentliche Nutzung über den Erfolg dieses Fahrerassistenzsystems für kooperative Lkw-Überholmanöver. Das bedeutet, die Verkehrsteilnehmer müssen sowohl in der Lage sein, die Technik nutzen zu können, als auch dem kooperativen Manöver zustimmen, die Technologie also nutzen wollen. Insbesondere gilt dies für den überholenden Lkw: Er stellt seinen Überholwunsch so lange zurück, bis der ideale Ort und Zeitpunkt erreicht ist. Der zu überholende Lkw passt seine Geschwindigkeit an, sodass das Manöver mit möglichst geringer Verzögerung für den rückwärtigen Verkehr abgeschlossen werden kann.

Sowohl für die Befähigung, als auch für die Motivation des Lkw-Fahrers zur Kooperation ist die Fahrer-Fahrzeug Interaktion von größter Bedeutung: Der Lkw-Fahrer kann durch die Bereitstellung der relevanten Informationen zum richtigen Zeitpunkt ein besseres und erfolgreiches Überholmanöver durchführen. Jedoch kann die angebotene Technologie erst dann wirksam werden, wenn die Fahrer-Fahrzeug Interaktion darüber hinaus so gestaltet ist, dass die Interaktion vom Lkw-Fahrer akzeptiert wird, er der „Fairness“ der stellvertretenden Kommunikation zwischen den Fahrerassistenzsystemen vertraut und damit bereit und motiviert ist, gemäß der von den Fahrzeugen ausgehandelten Vorgehensweise, zu kooperieren.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen effizienter, sicherer und konfliktärmer zu machen – für den überholenden Lkw sowie für die restlichen Verkehrsteilnehmer. Fokus ist die Gestaltung einer Fahrer-Fahrzeug Interaktion für ein kooperatives Fahrerassistenzsystem durch die Entwicklung einer Mensch-Maschine Schnittstelle (engl. Human-Machine Interface - HMI). Fahrer-Fahrzeug Interaktion beschreibt die gesamte Interaktion des Fahrers mit dem kooperativen Assistenzsystem durch die Nutzung einer HMI. Insbesondere die hohe Komplexität des Manövers erfordert eine explizit dafür gestaltete Interaktion.

Um eine hohe Akzeptanzrate gegenüber dem System und die gleichermaßen notwendige hohe Kooperationsbereitschaft unter den Fahrern zu erreichen, wird der Nutzer früh in den Entwicklungsprozess einbezogen.

Es wird ein Interaktionskonzept erarbeitet, das den Lkw-Fahrer in der Nutzung des kooperativen Assistenzsystems für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen begleitet und unterstützt. Hierbei

wird eine hohe Gebrauchstauglichkeit (engl. Usability) angestrebt, um Fehlbedienungen so weit wie möglich auszuschließen.

Parallel wird ein Interaktionskonzept entwickelt, das besonders auf die Kooperationsbereitschaft des Lkw-Fahrers bei Lkw-Überholmanövern abzielt. Hierzu wird ein Ansatz geprüft, der in verschiedenen Anwendungsbereichen eine positive Wirkung gezeigt hat: Von Vermenschlichung und Anthropomorphismus ist bekannt, dass sie die Wahrnehmung des Nutzers gezielt beeinflussen und sein Verhalten verändern können [35–38]. Zum Beispiel wird in der Mensch-Roboter Interaktion Vermenschlichung in Form von Mimik und/oder Gestik eingesetzt, um die Überzeugungskraft von Robotern zu erhöhen [38]. In dieser Arbeit wird untersucht, inwieweit Vermenschlichung einen positiven Effekt auf die Kooperationsbereitschaft im Kontext des Überholmanövers hat. Es werden verschiedene menschliche Charakteristiken (z.B. Identität, Emotionen, Mimik oder Gestik) in eine HMI integriert und die Akzeptanz der Lkw-Fahrer gegenüber diesen Charakteristiken getestet. In einer abschließenden summativen Evaluation wird das vermenschlichte HMI-Konzept in das HMI-Konzept für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen integriert, um so einen möglichen zusätzlichen Nutzen der Vermenschlichung auf die Kooperationsbereitschaft der Lkw-Fahrer während Überholmanövern und der Fahrer-Fahrzeug Interaktion ermitteln.

Abbildung 1.2 zeigt den Aufbau der vorliegenden Arbeit:

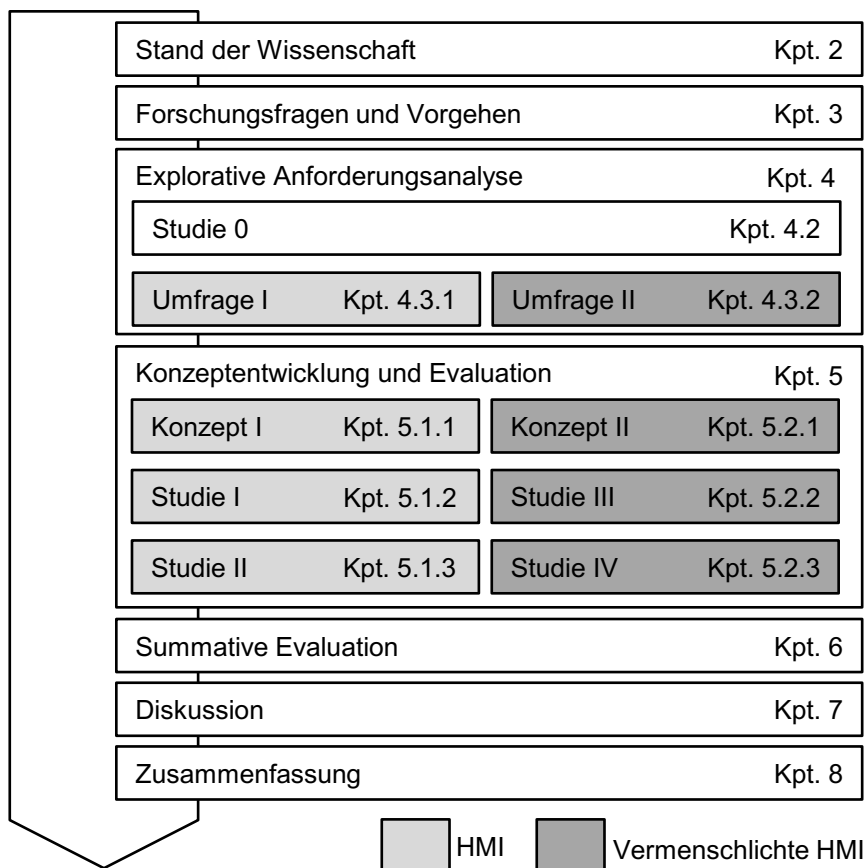


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit

Auf Basis des Stands der Wissenschaft (Kapitel 2), werden Forschungsfrage und Vorgehen ausgearbeitet (Kapitel 3), der die parallele Entwicklung sowohl der HMI für ein kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen als auch die Untersuchung einer geeigneten vermenschlichten

Form erlauben. In Summe werden in dieser Arbeit zehn Studien durchgeführt. Durch eine explorative Anforderungsanalyse (Kapitel 4), bestehend aus einer Fahrsimulatorstudie (Studie 0 – Kapitel 4.1) und zwei Fahrerbefragungen (Befragung I - Kapitel 4.2.1 und Befragung II Kapitel 4.2.2), werden das HMI-Konzept (Kapitel 5.1.1) und die vermenschlichte HMI (Kapitel 5.2.1) ausgearbeitet. Die Evaluation erfolgt innerhalb von vier Fahrsimulatorstudien: Zwei Fahrsimulatorstudien (Studie I - Kapitel 5.1.2 und Studie II – Kapitel 5.1.3) widmen sich der Evaluation des HMI-Konzept, weitere zwei Fahrsimulatorstudien (Studie III – Kapitel 5.2.2 und Studie IV – Kapitel 5.2.3) des vermenschlichten HMI-Konzepts. Abschließend erfolgt eine summative Evaluation (Kapitel 6), die das HMI-Konzept für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen final evaluiert und den Einfluss der Vermenschlichung quantifiziert. Hierbei werden neben der Kooperationsbereitschaft zusätzlich die Usability, das Vertrauen, die Akzeptanz und User Experience gemessen, um Qualitäts- und damit mögliche Unterscheidungsmerkmale herauszustellen. Die Erkenntnisse dieser Arbeit werden diskutiert und in Gestaltungsempfehlungen überführt (Kapitel 7). Zum Schluss erfolgt die Zusammenfassung (Kapitel 8)

2 Stand der Wissenschaft

Dieses Kapitel zeigt im Kontext von kooperativen Überholmanövern von Lkw auf Autobahnen den Stand der Wissenschaft zur Fahrer-Fahrzeug Interaktion, Faktoren der Technologieakzeptanz und Vermenschlichung auf. Es werden Konzepte und wissenschaftliche Erkenntnisse zur Gestaltung einer Fahrer-Fahrzeug Interaktion für kooperative Fahrerassistenzsysteme vorgestellt und Aspekte der Kooperation näher beleuchtet. Abschließend werden die Erkenntnisse zusammengeführt, um die relevanten Bedingungen für den Erfolg des technologiegeführten Überholmanövers im oben genannten Kontext abzuleiten.

2.1 Grundlagen der Fahrer-Fahrzeug Interaktion

Fokus dieser Arbeit ist die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine: Welche Gestaltungsmerkmale steigern die Fähigkeiten des Fahrers die Assistenztechnik korrekt zu nutzen und sie nutzen zu wollen. Hierfür werden im Folgenden zunächst die theoretischen Ansätze zur Beschreibung der Fahraufgabe (Kapitel 2.1.1), der Einfluss eines zunehmenden Automatisierungsgrads auf die Fahrer-Fahrzeug Interaktion (Kapitel 2.1.3) und die Rolle des Fahrers hinsichtlich des Situationsbewusstseins (Kapitel 2.1.5) zusammengefasst.

2.1.1 Fahraufgabe

Die Fahraufgabe wird in primäre und sekundäre Aufgaben unterteilt [39, 40].

Die primären Aufgaben entsprechen den Handlungen des Fahrers, die das Fahrzeug vom Start zum Ziel bewegen. Sie werden in drei Ebenen unterteilt [40, S. 28, 41–43]:

- Navigation (strategische Ebene)
- Fahrzeugführung (taktische Ebene)
- Stabilisierung (operative Ebene)

Auf der Navigationsebene legt der Fahrer die zu fahrende Strecke fest. Auf der Führungsebene übernimmt der Fahrer die Manöverplanung (Sollkurs und -geschwindigkeit) für die Strecke und reagiert damit auf die sich ständig ändernde Verkehrssituation (z.B. Straßenverlauf, Verkehrsdichte, etc.). Auf der Stabilisierungsebene folgt der Fahrer der in der Führungsebene geplanten Trajektorie mit Hilfe von Bedienelementen (Gas- sowie Bremspedal, Lenkrad und ggf. Kupplung) und bestimmt damit die Quer- und Längsdynamik des Fahrzeugs.

Die sekundären Aufgaben umfassen alle Tätigkeiten des Fahrers, um mit anderen Verkehrsteilnehmern zu interagieren (z.B. Blinken, Hupen etc.) oder auf Umwelteinflüsse zu reagieren.

Im Zusammenspiel mit der Umwelt als Störgröße bildet sich ein Fahrer-Fahrzeug Regelkreis [40].

2.1.2 Fahrer-Fahrzeug Regelkreis

Im Fahrer-Fahrzeug Regelkreis (Abbildung 2.1) werden die zwei Subsysteme Fahrer und Fahrzeug betrachtet [44]. Das Subsystem Fahrer nimmt Informationen in Form von Reizen über seine Sinne auf und leitet diese an das Gehirn weiter. Die Informationen werden dort je nach Erfahrung und Übungsgrad des Fahrers wissens-, regel- oder fertigkeitbasiert automatisiert verarbeitet [42, 45]. Die Informationsverarbeitung als letzter Schritt im Subsystem Fahrzeug erfolgt über die Verwendung der im Fahrzeug zur Verfügung stehenden Bedienelemente (z.B. Gaspedal, Lenkrad, Blinker etc.). Das Fahrzeug nimmt die vom Fahrer über die Bedienelemente kommunizierten Informationen auf und setzt diese in Quer- und Längsdynamik um. Rückmeldung erhält der Fahrer durch die Bewegung und Beschleunigung des Fahrzeugs sowie über visuelle Ausgabegeräte, wie z.B. dem Kombidisplays hinter dem Lenkrad.

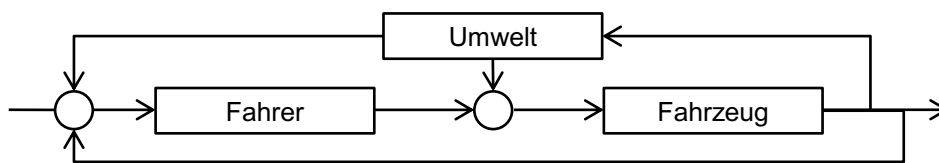


Abbildung 2.1: Vereinfachte Darstellung des Fahrer-Fahrzeug Regelkreis nach [40, S. 29]

Die beschriebenen Subsysteme Fahrer und Fahrzeug sind dem Einfluss der Umwelt ausgesetzt und der Fahrer muss darauf reagieren, um die Fahraufgabe auszuführen. Im sogenannten Joint Cognitive System for driving (JCS) [46, 47] wird die Umwelt in weitere Subsysteme aufgeteilt: Verkehrsteilnehmer, Straße, Verkehrsinfrastruktur, Wetter etc.. Die Koordination sowie die Kommunikation zwischen diesen Subsystemen stellen Herausforderungen dar (Kapitel 2.5.1)

2.1.3 Automation

Mit steigender Automation im Fahrzeug verändert sich die Fahraufgabe. Automation bedeutet die Übertragung von vom Menschen ausgeführten Aufgaben auf die Maschine [48] mit dem Ziel, den Menschen zu entlasten. Je nach Automatisierungsgrad (Abbildung 2.2) werden Aufgaben aus der Führungs- und Stabilisierungsebene vom Fahrzeug übernommen.

	Assistiert	Teil-automatisiert	Hoch-automatisiert	Voll-automatisiert	
Fahrer	Quer- oder Längsführung	Überwachung	Bereit zur Übernahme	Keine Übernahme	Autonomes Fahrzeug
	Quer- oder Längsführung	Quer- und Längsführung	Übernahmeaufforderung	keine Übernahmeaufforderung	
Level 0	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5

Abbildung 2.2: Automatisierungsgrad nach SAE Level Stufen [49]

Durch die fortschreitende Implementierung von Fahrerassistenzsystemen (engl. Advanced Driver Assistance Systems – ADAS; [50]) und die damit verbundene Weiterentwicklung der Sensor-

technik vergrößert sich der Wahrnehmungsbereich des Fahrzeugs, was wiederum die Entwicklung einer umfassenden Modellierung der Fahrzeugumgebung ermöglicht [51]. Die Fahraufgabe verändert sich. Der Anteil von passiven, überwachenden Tätigkeiten steigt, während der aktive, regelnde Anteil sinkt [52].

Die Führungsebene in der primären Fahraufgabe wird in Folge der Automatisierung in eine Manöver- und Trajektorienebene unterteilt [53–55]. Die definierten Manöver (z.B. Folgefahrt, Überholen etc.) werden an die Trajektorienplanung übergeben [53]. Je nach Automatisierungsgrad, wird der rein vom Fahrer durchgeführte mentale Entscheidungs- und Handlungsvorbereitungsprozess [53, S. 33] teilweise an das Fahrzeug übertragen.

Folglich verändert sich auch die Interaktion zwischen den an der Fahraufgabe beteiligten Subsystemen. Die Kooperation zwischen den Systemen rückt in den Vordergrund [56, 57]. Die individuelle Sicht auf eine Fahrsituation wandelt sich von einem Tauschhandel [58, S. 243] zu einer kooperativen Tätigkeit mit Fahrzeugen als Team-Player [59], die den Fahrer in den einzelnen Ebenen der primären Fahraufgabe unterstützen und gemeinsam geeignete Interaktionsmuster [60] für die aktuelle Situation und die jeweiligen Fähigkeiten der beiden Interaktionspartnern entwickeln, bereitstellen und anbieten [61].

Die effektive Koordination und Kommunikation zwischen Fahrer und ADAS tragen maßgeblich zum Erfolg dieser bei [56]. Verantwortlich hierfür ist die HMI. Nach dem Model-View-Controller Prinzip [62, 63] kann das ADAS in drei hierarchisch aufgebauten Abstraktionsebenen unterteilt werden: HMI, Funktion und Daten ([63]; Abbildung 2.3).

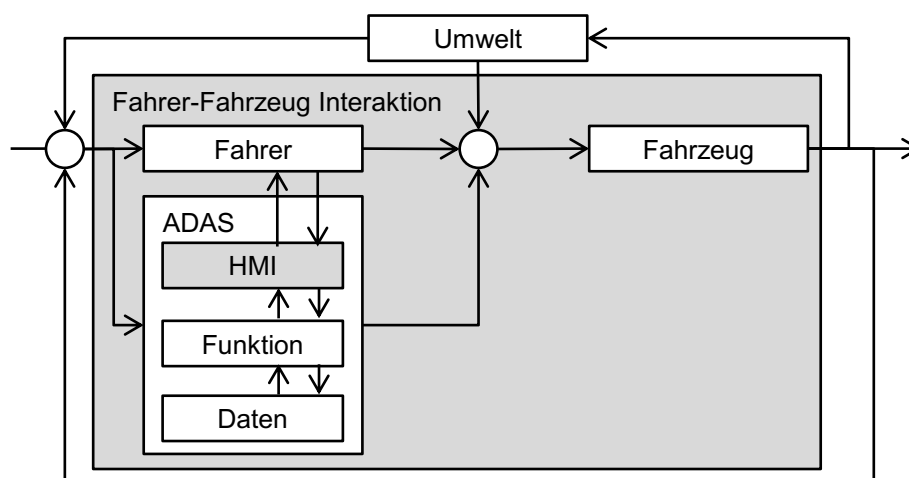


Abbildung 2.3: Erweiterung des Fahrer-Fahrzeug Regelkreises um ein ADAS und der Integration einer HMI in der Fahrer-Fahrzeug Interaktion in Anlehnung an [63, S. 33]

Jede Ebene kommuniziert ausschließlich mit der direkt darüber oder darunterliegenden. Der Fahrer kommuniziert über die HMI-Ebene mit dem ADAS. Die Funktions- und Datenebene sind dem Fahrer verborgen.

Während die Aufgabe der HMI im ursprünglichen Fahrer-Fahrzeug Regelkreis hauptsächlich darin besteht, Bedienelemente zur Fahrzeugführung (z.B. Gas, Bremse, etc.) zur Verfügung zu stellen und den Systemstatus anzuzeigen (z.B. Geschwindigkeit, Drehzahl, oder Richtungsanzeige) [51], übernimmt die HMI mit steigendem Automatisierungsgrad weitere Aufgaben [60] z.B. Routen- oder Manöverempfehlungen, Rückmeldungen automatisierter Fahrfunktionen (Längs- und/oder Querführung) oder Koordination notwendiger Intervention (z.B. Übernahmeaufforderung) durch den Fahrer.

2.1.4 Mentales Modell

Zur Interaktion mit ihrer Umwelt formen Menschen basierend auf ihren Fertigkeiten und Wissen interne Modelle von sich und dieser [64]. Diese mentale Modelle erlauben es den Menschen, durch Erklärung und Vorhersagekraft die Interaktion zu analysieren und zu verstehen [64].

Ein mentales Modell ist definiert als

„[...] a representation formed by user of a system and/ or task, based on previous experience as well as current observation, which provides most (if not all) of the subsequent system understanding and consequently dictates the level of task performance“ [65, S. 619].

Bezogen auf die Fahrer-Fahrzeug Interaktion kann das mentale Modell als das innere Bild des Fahrers von der Funktionsweise des ADAS verstanden werden [66, S. 49]. Die HMI soll daher so gestaltet sein, dass sie mit dem mentalen Modell des Fahrers übereinstimmt. Es wird in diesem Zusammenhang zwischen dem mentalen Modell des Entwicklers oder Designers und dem des Fahrers als Nutzer unterschieden ([66]; Abbildung 2.4).

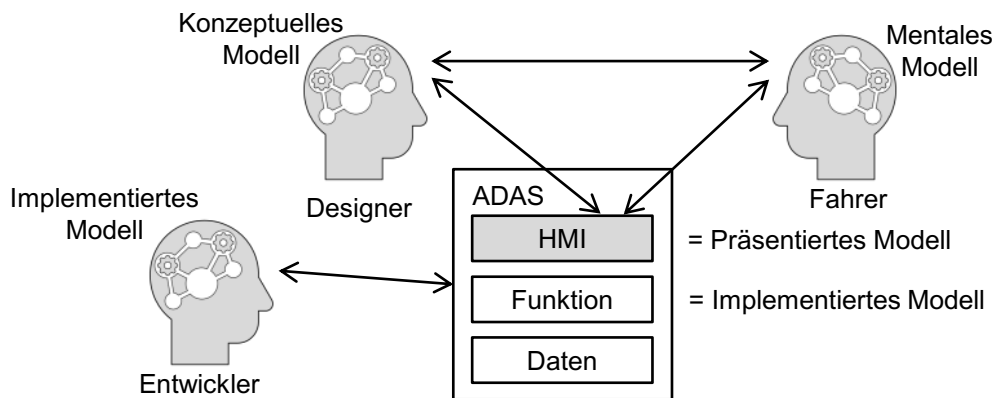


Abbildung 2.4: Mentales, präsentiertes und implementiertes Modell der Interaktionsgestaltung nach [66, S. 51]

Der Entwickler oder Designer hat eine genaue Vorstellung von dem zu entwickelnden System und dessen Bedienung. Er legt damit das implementierte oder konzeptuelle Modell fest [66, S. 50]). Das entwickelte ADAS und dessen HMI aus der Sicht des Nutzers wird als das präsentierte Modell definiert [66, S. 50]. Bei komplexen ADAS sollte das präsentierte Modell *„[...] das implementierte abstrahieren, um einen sicheren und einfachen Umgang mit dem System zu ermöglichen“* [63, S. 6].

Der Entwicklung des mentalen Modells liegt ein dynamischer Prozess zu Grunde. Es kann nicht allein durch die Gestaltung der HMI festgelegt werden, weil es sich während der Interaktion mit dem System immer wieder aktualisiert [64]. Ein inkorrektes oder unvollständiges mentales Modell korrigiert und komplettiert sich mit zunehmender Nutzung [67]. Das mentale Modell laut NORMAN wird folglich nie vollständig sein [64].

Das mentale Modell ist die Basis für das Situationsbewusstsein [68, 69]. Ein unzureichendes mentales Modell führt zu einem fehlerhaften Situationsbewusstsein [70] und damit möglicherweise zu einem falschen Systemverständnis [71].

2.1.5 Situationsbewusstsein

Unter Situationsbewusstsein versteht ENDSLEY einen dynamischen Prozess [70, S. 36], der sich hierarchisch auf drei wesentlichen Ebenen abspielt: der Wahrnehmung, dem Verständnis der Fahrsituation und der Vorhersage zukünftiger Fahrsituationen (Abbildung 2.5).

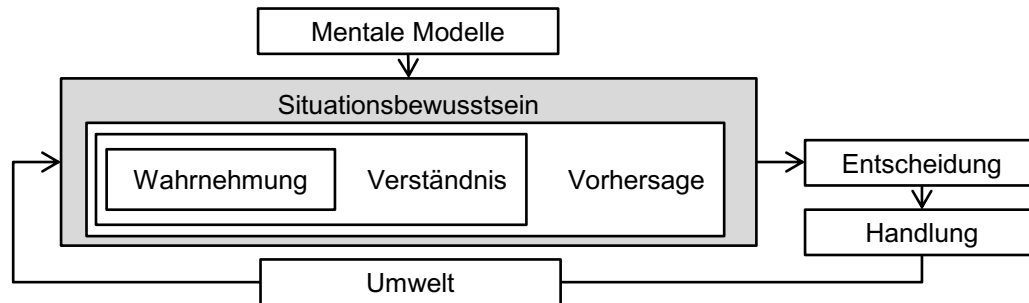


Abbildung 2.5: Modell des Situationsbewusstseins im Informationsverarbeitungsprozess nach [72, S. 532]

Basierend auf dem entwickelten Situationsbewusstsein trifft der Fahrer Entscheidungen und führt daraufhin die entsprechenden Handlungen aus. Das Feedback zu dieser Handlung wird vom Fahrer aufgenommen und der neue Umgebungszustand führt zu einem aktualisierten Situationsbewusstsein. Dieser Feedback-Loop wird sowohl von individuellen als auch von aufgaben- bzw. systembezogenen Faktoren beeinflusst. Fähigkeiten, Erfahrungen und Training des Fahrers beeinflussen seine individuelle Informationsverarbeitung, Gedächtnisleistung und Automatismen. Diese wiederum wirken auf seine Ziele, Vorurteile etc. ein, die abermals den Wirkungskreis aus Situationsbewusstsein, Entscheidung und Handlung beeinflussen. So führen z.B. falsche Erwartungen an die Funktionalität eines Systems zu einer Fehlinterpretation, die Entscheidungen im Umgang mit dem System negativ beeinflussen können.

Ein ADAS und dessen HMI unterstützen den Fahrer im gesamten Informationsverarbeitungsprozess [69] und nehmen damit Einfluss auf das Situationsbewusstsein, die Entscheidung und Handlung des Fahrers. Die Herausforderung bei der Entwicklung einer HMI für ein ADAS ist es demnach, die richtigen Informationen zum richtigen Zeitpunkt zu kommunizieren. Werden z.B. Informationen in unzureichendem Umfang oder zum falschen Zeitpunkt bereitgestellt, kann dies die mentale Beanspruchung des Fahrers erhöhen [73] und sich in Folge dessen negativ auf das Situationsbewusstsein auswirken [70, 74]. Ein angemessenes Feedback der HMI ist für eine erfolgreiche Fahrer-Fahrzeug Interaktion essentiell [75]. Mentale Modelle können als „[...] Heuristik bei der Suche nach den passenden Informationen helfen“ [69, S. 77, 76]. Sie bündeln die Erwartungen des Fahrers an das System und lenken so die Aufmerksamkeit des Fahrers [69].

2.2 Technologieakzeptanz

Die Akzeptanz, also der Nutzungswunsch des Fahrers gegenüber einem ADAS ist eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Nutzung des Systems. Nur wenn er das System akzeptiert, wird er es nutzen. Akzeptanz der angebotenen Assistenztechnologie zu schaffen, ist damit eine Grundanforderungen an die Gestaltung einer HMI.

Hohe Verbreitung hat hierbei das Technologieakzeptanzmodell (TAM) nach DAVIS (Abbildung 2.6; [77]). Es basiert auf der Theorie des überlegten Handelns nach FISHBEIN & AJZEN [78]

und stellt die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit und Nützlichkeit als wesentliche Einflussgrößen auf die Nutzung eines Systems dar [79]. Aufgrund seines simplen und verständlichen Aufbaus ist es eines der meist genutzten Modelle in der Informationstechnik [80].

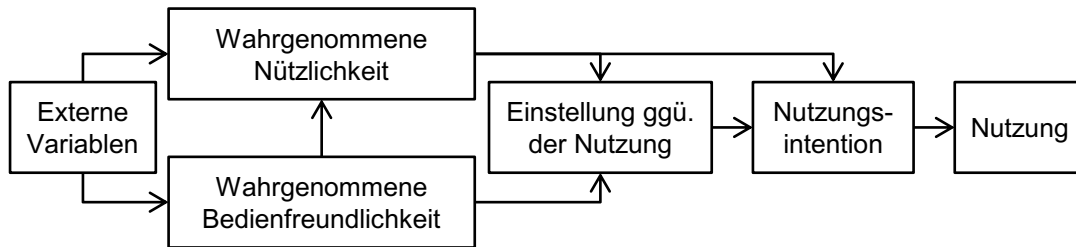


Abbildung 2.6: Technologieakzeptanzmodell nach Davis [77, S. 476]

Zum TAM nach DAVIS gibt es inzwischen zahlreiche Erweiterungen und Abwandlungen:

Das entwickelte Technologieakzeptanzmodell für zukünftige ubiquitäre Systeme (UbiTAM) nach ROTHENSEE [81] fügt zusätzlich rationale und emotionale Aspekte der Akzeptanz hinzu. Ubiquitäre Systeme unterstützen den Nutzer im Hintergrund, indem sie automatisiert Informationen durch Vernetzung bereitstellen, verarbeiten und ggf. Handlungen ausführen [82]. Daher ist das UbiTAM gerade für die Akzeptanzmessung in der Entwicklung von ADAS etabliert [81, 83].

Alternativ erweitert GHAZIZADEH ET AL. [84] im Automations-Akzeptanzmodell die Kernelemente des TAM um die Faktoren Vertrauen und Kompatibilität. Demnach beeinflussen diese die vom Fahrer subjektiv wahrgenommene Nutzerfreundlichkeit und Nützlichkeit eines ADAS.

VAN DER LAAN ET AL. [85] sehen neben der wahrgenommene Nützlichkeit auch die Zufriedenheit im Umgang mit einem ADAS als wesentliche Einflussgröße auf die Akzeptanz.

Aus den Schnittmengen der verschiedenen Technologieakzeptanz-Modellen ergeben sich im Kontext dieser Arbeit drei Aspekte von herausgehobener Relevanz für die Erfolgsmessung der entwickelten HMI: Vertrauen (Kapitel 2.2.1), Usability (Kapitel 2.2.2) und User Experience (Kapitel 2.2.3). Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen.

2.2.1 Vertrauen

Vertrauen wird nach LEE & SEE [86] definiert als

„die Überzeugung, dass ein System dem Individuum dabei hilft, bestimmte Ziele zu erreichen in einer Situation, die von Ungewissheit und Verletzlichkeit geprägt ist“ (deutsche Übersetzung nach PÖHLER ET AL. [87, S. 152])

Das Vertrauen des Fahrers in ein ADAS bestimmt, wie dieser mit dem System umgeht [86, 88, 89], was wiederum den Nutzen eines ADAS maßgeblich beeinflusst [84]. Der Fahrer sollte ein angemessenes Vertrauen in das ADAS entwickeln können [86, 90], indem die tatsächliche Funktionalität oder auch Leistungsfähigkeit des Systems klar erkennbar ist [69]. Dies führt zur angemessenen Nutzung des Systems. Ist die Funktionalität der Automation des Systems niedriger als das entgegengebrachte Vertrauen, wird von einem übersteigerten Vertrauen gesprochen [86]. Mit der Automation wechselt die Rolle des Fahrers vom Akteur zum Überwacher [87]. Fehlende Überwachung und/oder Kontrolle des ADAS [91] durch übersteigertes Vertrauen führt zu einem unzureichenden Situationsbewusstsein (Kapitel 2.1.5) und Systemverständnis. Ist die Funktionalität hingegen höher als das entgegengebrachte Vertrauen (Misstrauen) [86] kann der Nutzen des ADAS bzw. die Entlastung, die das ADAS dem Fahrer

geben soll, nicht voll ausgeschöpft werden [91]. Um dem Fahrer die bestmögliche Funktionalität des ADAS zur Verfügung zu stellen, muss das richtige Maß an Vertrauen erzeugt werden.

Vertrauen ist ein multidimensionales Konstrukt [90] und baut sich nach HOFF & BASHIR [92] aus dispositionalen (z.B. Alter, Persönlichkeit, Kultur etc.), situativen (z.B. Stimmung, Beanspruchung etc.) und initial erlerntem Vertrauen (z.B. Verständnis vom System) auf (Abbildung 2.7).

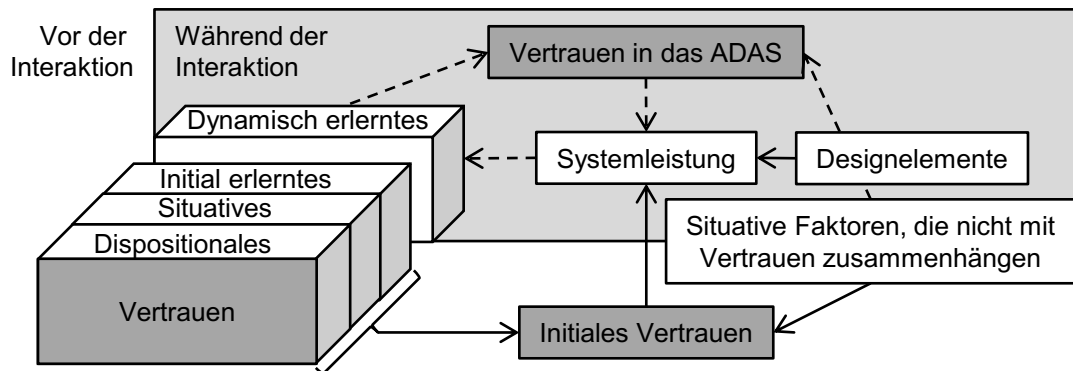


Abbildung 2.7: Vertrauensmodell nach Hoff & Bashir [92, S. 427] bezogen auf das ADAS

Neben diesen statischen Anteilen des Vertrauens ergibt sich in der Interaktion ein dynamischer Anteil [93]. Hier wird durch eine geeignete HMI Einfluss auf das Vertrauen des Fahrers genommen und damit eine erfolgreiche Kooperation zwischen Fahrer und automatisiertem Fahrzeug gestaltet [61]. Das Vertrauen des Fahrers in ein ADAS sinkt durch Fehlverhalten jenes [94, 95]. Durch geeignete Dialogstrategien der HMI wird das Vertrauen kalibriert [94, 96–98].

2.2.2 Usability

Die Qualität, mit der über eine HMI ein ADAS bedient wird, wird als Usability bezeichnet [99]. Sie hat direkte Auswirkungen auf die bereits beschriebenen Basisanforderungen einer Fahrer-Fahrzeug Interaktion: Situationsbewusstsein (Kapitel 2.1.5), Vertrauen (Kapitel 2.2.1) und Akzeptanz (Kapitel 2.2). Je ungehinderter die Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung des Nutzers erfolgen, desto höher die Qualität der HMI [100].

In der ISO 9241-110 wird die Usability (auch Gebrauchstauglichkeit genannt) bezeichnet als das „Ausmaß, in dem ein System [...] durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ [101, S. 9].

Aus dieser Definition lassen sich die objektive Effektivität und Effizienz sowie die subjektive Zufriedenstellung als messbare Attribute der Usability entnehmen. Effektivität ist das Maß für die vollständige und korrekte Erfüllung der Aufgabe, die mit dem System erreicht werden soll. Effizienz ist das Maß für die schnelle und aufwandsarme Umsetzung der Aufgabe. Die subjektive Zufriedenstellung ist

„das Ausmaß der Übereinstimmung der physischen, kognitiven und emotionalen Reaktionen des Benutzers, die aus der Benutzung eines Systems [...] resultieren, mit den [...] Benutzererwartungen“. [101, S. 13]

Um eine hohe Ausprägung der drei Attribute Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung bei der Bedienbarkeit der HMI zu erreichen, können die Empfehlungen aus den Normen ISO 9241-110

sowie ISO 9241-112 angewandt werden. Interaktionsprinzipien [101] (z.B. Aufgabenangemessenheit, Erwartungskonformität etc.) sowie die Grundsätze der Informationsdarstellung (z.B. Kompaktheit, Konsistenz etc.) lenken die Gestaltung der HMI für das ADAS.

2.2.3 User Experience

Die User Experience wird wie auch die Usability in der ISO 9241-110 definiert. Sie ist die „[...] Kombination von Wahrnehmung und Reaktion einer Person, die aus der tatsächlichen und/oder der erwarteten Benutzung eines Systems [...] resultieren“ [101, S. 10]

Die beschriebenen Wahrnehmungen und Reaktionen umfassen hierbei sämtliche Emotionen, die sich vor, während und nach der Nutzung des ADAS über die HMI ergeben [101, 102] und spielen für die Akzeptanz des ADAS eine entscheidende Rolle [103]. Der Betrachtungszeitraum zur Beurteilung des ADAS wird von der reinen Bedienzeit zum gesamten Erleben des Systems erweitert.

Der User Experience Lebenszyklus [104, S. 312] beschreibt die Phasen, in denen der Nutzer seine Erfahrungen mit einem System macht und zeigt wie diese seine Haltung gegenüber dem System beeinflussen (Abbildung 2.8).

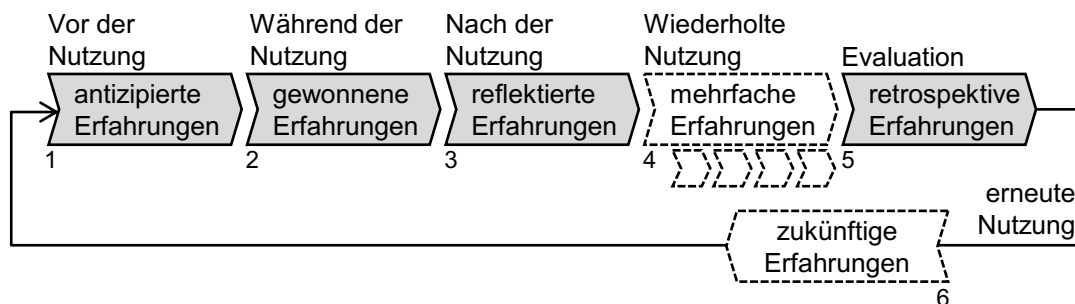


Abbildung 2.8: User Experience Lebenszyklus nach [104, S. 312]

Folgend werden die Phasen im Kontext der Nutzung eines ADAS über eine HMI beschrieben:

Vor der Bedienung (Phase 1) wird bereits darüber entschieden, ob der Fahrer das ADAS verwenden wird, weil beim Fahrer schon vor dem ersten Kontakt mit dem ADAS ein mentales Modell (Kapitel 2.1.5) dazu existiert. Überwiegen negative Erwartungen, wird der Fahrer die Assistenz nicht ausprobieren und verwenden wollen [104].

Während der eigentlichen Nutzung (Phase 2) werden die Interaktion und die Erfahrungen des Fahrers mit dem ADAS von vier Faktoren maßgeblich beeinflusst: vom Fahrer selbst (z.B. seine Fähigkeiten und Vorlieben), den Eigenschaften der HMI und dem ADAS (instrumentelle und nicht- instrumentelle Qualitäten), dem Kontext, in dem das ADAS genutzt wird (z.B. Umgebung, Zeitdruck) und den Emotionen, die beim Fahrer erzeugt werden [104].

Nach der Bedienung des ADAS (Phase 3) reflektiert der Fahrer seine Erfahrungen und das resultierende Ergebnis. Die Bewertung des ADAS durch den Fahrer hängt maßgeblich davon ab, ob er die HMI oder die Situation für den (Miss-) Erfolg der Interaktion verantwortlich macht [104].

Wird das ADAS mehrmals hintereinander genutzt (optionale Phase 4), wiederholen sich die ersten drei Phasen. Die dritte Phase nimmt damit die Rolle einer formativen Evaluation der Bedienung des ADAS ein, in der während der Reflexion sowohl kurz- als auch langfristige Effekte (z.B. Lerneffekte, Wartung etc.) berücksichtigt werden [104].

Abschließend bewertet der Fahrer das ADAS und dessen HMI im Ganzen (Phase 5) und entscheidet, ob er dieses ADAS nochmal (Phase 6) verwenden möchte [104]. Während allen Schritten wird das mentale Modell des Fahrers aktualisiert und bereitet die Grundlage für die weitere Nutzung.

Das User Experience Components Model (CUE-Modell) nach THÜRING UND MAHLKE ([102, 105]; Abbildung 2.9) beschreibt die Einzelkomponenten der User Experience eines Systems.

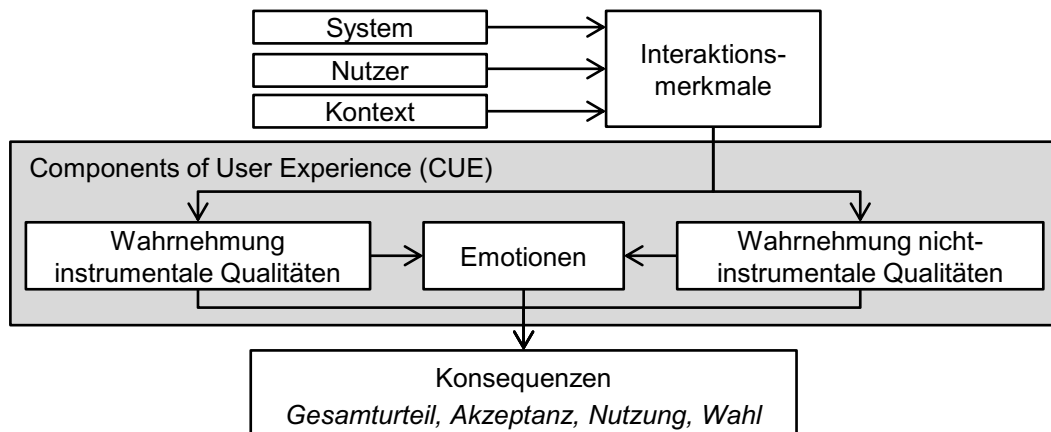


Abbildung 2.9: Das CUE-Modell (Components of User Experience) nach [105, S. 262]

Emotionen wie Freude und Spaß, die in Zusammenhang mit der Nutzung des ADAS mittels einer HMI gebracht werden, sind wichtige Einflussgrößen auf die Akzeptanz gegenüber dem ADAS und dessen Erfolg [103]. Emotionen sind und werden weiterhin der unique selling point eines Fahrzeugs sein [106, S. 79, 107]. Neben den Emotionen sind instrumentale und nicht instrumentale Qualitäten zur Bewertung des ADAS entscheidend [103, 105, 108]. Instrumentale Qualitäten (pragmatische Qualitäten) umfassen Eigenschaften, die sich auf die Nützlichkeit des ADAS beziehen (z.B. sicher, kontrollierbar, effektiv etc.). Als nicht-instrumentale Qualitäten (hedonische Qualitäten) werden die nicht zielorientierten Eigenschaften (z.B. innovativ, originell, schön etc.) zusammengefasst [109].

Diese Arbeit untersucht den Effekt einer vermenschlichten HMI auf die beschriebenen Basisanforderungen einer erfolgreichen Fahrer-Fahrzeug Interaktion und prüft, inwieweit eine vermenschlichte HMI den Lkw-Fahrer zu häufigeren Kooperationen überzeugen kann. Im nächsten Kapitel werden die Auswirkungen von Vermenschlichung und deren Hintergründe erläutert sowie der Stand der Wissenschaft zu vermenschlichten HMI-Konzepten im Fahrzeug dargelegt.

2.3 Vermenschlichung und Anthropomorphismus

Dieses Kapitel basiert auf der Veröffentlichung FANK ET AL. [110]

Mit der Einführung von Apples Siri im Jahre 2010 hat sich eine auf Sprache basierende Form der Assistenz entwickelt, die uns im Alltag zunehmend begleitet [111]. Persönliche Assistenten schreiben für uns Einkaufslisten, planen für uns den Tagesablauf oder erinnern uns an wichtige Aufgaben. Die Existenz einer Kommunikationsform mit einem alltäglichen Gegenstand, die solch ein persönlicher Assistent ermöglicht, fördert, dass der Mensch diesem Gegenstand menschliche Qualitäten und Charakteristiken zuspricht [112]. Dies wird auch Anthropomorphismus genannt [113]. Sobald der Mensch beginnt mit alltäglichen Gegenständen, wie z.B. seinem

Mobiltelefon zu sprechen, entwickelt er eine emotionale Beziehung zu ihm [112]. Umgekehrt beeinflussen die Emotionen die Art und Weise wie der Mensch mit Gegenständen interagiert und diese bewertet [114]. Anthropomorphismus nimmt Einfluss auf die Entscheidungsfindung des Menschen [115] und kann diese manipulieren [116].

In den folgenden Abschnitten werden die Begriffe Anthropomorphismus und Vermenschlichung erläutert, sowie deren erforschten Einflüsse auf den Menschen beschrieben. Im Konkreten wird durch Vermenschlichung erzeugter Anthropomorphismus als Überzeugungsstrategie vorgestellt und die Brücke zur vermenschlichten HMI als Strategie zur Kooperationssteigerung für Lkw-Fahrer geschlagen. Das Kapitel wird mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse einer Literaturrecherche [110] zum Stand der Wissenschaft zu vermenschlichten HMI-Konzepten im Fahrzeug abgeschlossen.

2.3.1 Definition, Entstehung und Auswirkungen auf den Menschen

Seit jeher neigt der Mensch dazu in Dingen sein eigenes Abbild zu erkennen. Das Auto *"heißt Herbie"*, der Aufzug hat heute *"beschlossen zu streiken"* und der Drucker *"hat mal wieder seine fünf Minuten"*. Das Phänomen, in nicht-menschlichen Dingen menschliche Züge zu sehen, wird als Anthropomorphismus bezeichnet - abgeleitet vom griechischem *anthrōps* (Mensch) und *morphō* (Form) [117]. Er wird über die Bandbreite wissenschaftlicher Disziplinen wie der Psychologie, Philosophie sowie Ingenieurwissenschaften unterschiedlich definiert [118]. So wird er als Prozess, Phänomen oder auch kognitive Verzerrung bezeichnet [110]. Die heutige Wörterbuchdefinition von Anthropomorphismus lautet: *"Übertragung menschlicher Eigenschaften auf Nichtmenschliches"* bzw. beschreibt der deutsche Duden *anthropomorph* als eine *"menschliche Eigenschaft an nicht menschlichen Wesen"* [113].

In dieser Arbeit wird Anthropomorphismus als kognitiver Prozess definiert, in dem der Mensch (un)bewusst einem nicht-menschlichen Gegenstand menschliche Charakteristiken zuschreibt [119].

Anthropomorphismus und Vermenschlichung sind nicht das gleiche [120, 121]. Vermenschlichung ist eine Methode, in der menschliche Eigenschaften (z.B. menschliches Aussehen oder die Verwendung der Sprache als Interaktionsmittel) als Designkomponente der Technologie hinzugefügt wird. Anthropomorphismus entsteht als kognitiver Prozess in der Interaktion des Nutzers mit der vermenschlichten Technologie [122]. Daher müssen die folgenden Aspekte berücksichtigt werden:

- Der Anthropomorphismus verhält sich nicht linear zur Vermenschlichung [123]. Er steigt nicht proportional mit der hinzugefügten Anzahl menschlicher Charakteristiken an.
- Ein hoher Anthropomorphismus führt nicht zu einer höheren Akzeptanz von vermenschlichter Technologie [121]. Siehe hierzu auch den Uncanny-Valley Effekt nach MORI [124].

Wird der kognitive Prozess in Gang gesetzt, kann Anthropomorphismus auf mehreren Ebenen mit unterschiedlicher Bedeutung entstehen [122]: auf einer simplen Kategorisierungsebene (lebendig versus nicht lebendig), einer komplexen Zuschreibung sozialer Rollen (z.B. der Hund ist der *„treue Begleiter“* des Menschen), emotionalem Empfinden (z.B. dem Auto *„gefällt es nicht“*, wenn es zu hochtourig gefahren wird) oder beabsichtigtem Verhalten (z.B. das Kopiergerät *„streikt absichtlich“*, um seinen Nutzer zu ärgern). Ob und wie intensiv dieser kognitive Prozess

abläuft, ist individuell vom Nutzer abhängig [119]. Die Tendenz eines Menschen zu anthropomorphisieren wird u.a. von seiner Kultur, Religion, Normen, Bildung und/oder Erfahrungen beeinflusst [117, 125].

Der situative Anthropomorphismus entsteht unmittelbar während der Interaktion mit der Technologie und ändert sich mit der Nutzungsdauer [126] über drei Phasen [120]: Initialisierungs-, Gewöhnungs- und Stabilisierungsphase (Abbildung 2.10).

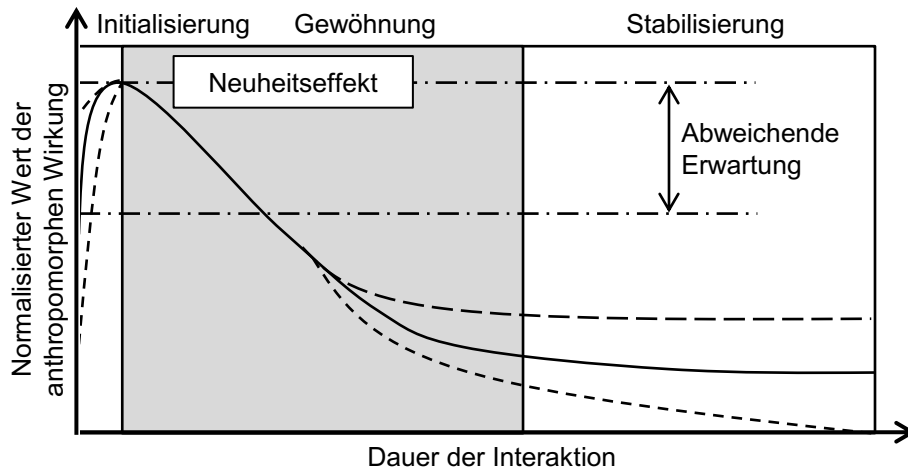


Abbildung 2.10: Dynamik des Anthropomorphismus nach [120, S. 226]

In der Initialisierungsphase wird ein starker Anstieg des Anthropomorphismus gemessen, der auf den Neuheitseffekt der Technologie beruht. Mit dem Absinken wird der Beginn der Gewöhnungsphase markiert. In ihr baut der Mensch das mentale Modell (Kapitel 2.1.4) des vermenschlichten Gegenstands weiter aus. Er versucht, ihn zu verstehen und sein Verhalten vorherzusagen. In dieser Phase wird eine Abnahme des anthropomorphen Effekts beobachtet. In der letzten Phase, der Stabilisierungsphase, festigt sich der anthropomorphe Effekt und gleicht sich einem individuellen Wert an.

Wenn der Mensch anthropomorphisiert, hat dies Auswirkungen auf sein Verhalten und seine Entscheidungen [123]. Wie eingangs erwähnt, wird die Beziehung zu einem Gegenstand, der den Anthropomorphismus auslöst emotionalisiert [112]. Emotionen beeinflussen die Interaktion mit diesem Gegenstand [114]. Unterschiedliche Disziplinen (z.B. Mensch-Computer Interaktion, Marketing, Kommunikationswissenschaften etc.) nutzen den Einfluss des Anthropomorphismus als Instrument, um Prozesse, Systeme und Kommunikation mit Menschen zu verbessern [127–129]. Das Paradigma Computer-are-Social-Actors (CASA) [130, S. 72] aus der Mensch-Computer Interaktion beschreibt, dass Menschen mit Technologien (z.B. Computern) auf eine soziale und natürliche Weise interagieren. REEVES UND NASS [131] zeigen, dass das soziale Verhalten, das Nutzer innerhalb einer Interaktion mit einer Maschine entwickeln, dem einer Mensch-Mensch Interaktion entspricht. Ausgehend von der verbalen und para-verbalen Kommunikation erkennen Nutzer ihre eigene Persönlichkeit in der Technologie wieder [132]. Sie fühlen sich stärker von der Technologie angezogen, wenn sie ihnen ähnelt [133, 134].

Die Forschung aus dem Gebiet des persuasiven Designs (siehe auch Persuasive Technology; [135]) nutzt diesen Effekt, indem sie die Wahrnehmung des Menschen gezielt durch vermenschlichte Technologie beeinflusst und das gewünschte Verhalten fördert [116].

FOGG ET AL. [135] unterscheiden zwischen fünf menschliche Charakteristiken, die im persuasiven Design Anwendung finden:

- physische Merkmale (z.B. Mimik, Gestik)
- psychologische Merkmale (z.B. Empathie, Persönlichkeit)
- Sprache (z.B. gesprochene Sprache, interaktive Sprache)
- soziale Dynamik (z.B. Kooperation, Lob)
- sozialen Rollen (z.B. Teamkollege, Gegner)

Es wird versucht, die passende menschliche Charakteristik zu finden, die den gewünschten Effekt erzielt. Forschungen aus der Mensch-Roboter Interaktion zeigen, dass Roboter, die zum Nutzer Blickkontakt halten, in ihren Erzählungen überzeugender wirken [38]. Ein soziales Feedback des Roboters via Sprache, Mimik, Gestik etc. kann das reaktive Verhalten der Nutzer verändern [35, 136]. Es motiviert sie z.B., Energie zu sparen [137, 138] oder Entspannungsübungen durchzuführen [139].

Neben der Überzeugungskraft kann Anthropomorphismus die Präferenz zu einem Produkt steigern [140–142]. Nutzer, die im Umgang mit dem Produkt anthropomorphisieren, sind im Vergleich zu Nutzern, die den kognitiven Prozess nicht durchlaufen, zufriedener mit dem Produkt [143]. Zudem schaffen vermenschlichte Produkte ein höheres Vertrauen [144–146].

Die Fahrer-Fahrzeug Interaktion könnte ebenfalls von den hier beschriebenen positiven Effekten profitieren. Eine Literaturrecherche [110] gibt Aufschluss über die vermenschlichte HMI-Konzepte, die bereits entwickelt sind und welche Effekte durch diese HMI-Konzepte gemessen werden. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Literaturrecherche zusammengefasst.

2.3.2 Bestehende vermenschlichte HMI-Konzepte im Fahrzeug

In der TV-Serie „Knight Rider“ wurde 1982 die erste fiktionale vermenschlichte HMI vorgestellt. Ein schwarzer Sportwagen mit dem Namen K.I.T.T. übernahm die Rolle des treuen Partners neben dem Protagonisten Michael Knight im Kampf gegen das Verbrechen. Fast 40 Jahre später präsentiert 2018 der chinesische E-Fahrzeug Hersteller NIO die erste vermenschlichte HMI in einem Serienfahrzeug. NOMI – ein kleiner Roboter auf dem Dashboard des Modells NIO ES8 „[...] transforms the car from a cold machine to a delightful companion“ [147]. Nomi spielt die Lieblingsplaylist, passt die Temperatur der Sitzheizung an oder macht ein Foto von Fahrer und Passagier. Vor NIO zeigten bereits Nissan und Toyota in ihren Konzeptfahrzeugen PIVO [148], IDS-Concept [149] und Concept-I [150] vermenschlichte HMI-Konzepte. Für den Lkw stellte IVECO 2021 den IVECO Driver Pal [151] vor, der Fahrer-Fahrzeug und Fahrer-Community Interaktion durch Sprachbefehle über Amazon Alexa ermöglicht. Neben Unterstützung der primären Fahraufgabe Navigation (Kapitel 2.1.1) zielt dieser Assistent vor allem auf die Unterstützung im Komfortgewinn und Unterhaltung im Lkw.

Die Forschung entwickelt seit 30 Jahren Konzepte und untersucht dessen Auswirkungen auf den Fahrer. Tabelle 2.1 fasst den Stand der Wissenschaft zu vermenschlichten HMI Konzepten zusammen. Die Morphologie entspricht den menschlichen Charakteristiken, die der HMI hinzugefügt werden. Zudem wird unterschieden, ob die Identität via Sprachassistenten (SA), virtuellen Assistenten (VA) oder Roboter Assistenten (RA) umgesetzt werden.

Tabelle 2.1: Stand der Wissenschaft zu vermenschlichter HMI im Fahrzeug (SA = Sprachassistent, VA = virtueller Assistent, RA = Roboter Assistent)

Psychische Merkmale			Physische Merkmale				Sprache		Quellen
Identität	Persönlichkeit	Empathie	Emotion	Gestalt	Mimik	Gestik	Verbal	Para-Verbal	
Fahrsicherheit erhöhen									
SA			X				X	X	[152]
SA							X	X	[153]
SA							X		[154]
RA	X	X	X	X	X	X	X		[155, 156]
Akzeptanz erhöhen									
SA	X						X		[157]
SA	X	X					X		[158]
VA	X	X	X	X	X	X	X		[159]
Vertrauen erhöhen									
SA							X		[160, 161]
VA	X	X		X	X	X	X		[162]
RA			X	X		X	X		[163]
Müdigkeit reduzieren									
SA	X	X					X		[164]

Der Stand der Wissenschaft zeigt, dass ausschließlich HMI-Konzepte für den Pkw-Bereich existieren. In den aufgeführten Studien werden die Fahrsicherheit, Akzeptanz, Vertrauen und Müdigkeit untersucht.

In dieser Arbeit wird untersucht, inwieweit Vermenschlichung das Fahrverhalten des Lkw-Fahrers beeinflussen und ihn überzeugen während Überholmanövern zu kooperieren. Im nächsten Kapitel wird das Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen und das Potential für Kooperation während diesem Fahrmanöver beschrieben.

2.4 Kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen

Im Folgenden werden Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen definiert und deren Ablauf beschrieben (Kapitel 2.4.1). Es folgt die Darstellung des Dilemmas, das sich Lkw-Fahrer während Überholmanövern ausgesetzt sehen (Kapitel 2.4.2) und wie eine mögliche Unterstützung durch

ein ADAS aussehen könnte. Hierzu werden die Faktoren der Kooperation im Straßenverkehr beschrieben (Kapitel 2.4.3), um anschließend die Funktion des verwendeten ADAS für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen vorzustellen (Kapitel 2.4.4).

2.4.1 Definition Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen

Ein Lkw-Überholmanöver auf der Autobahn kann in vier Phasen gegliedert werden ([165, 166]; Abbildung 2.11): Folgefahrt, Ausscheren, Vorbeifahrt und Einscheren.

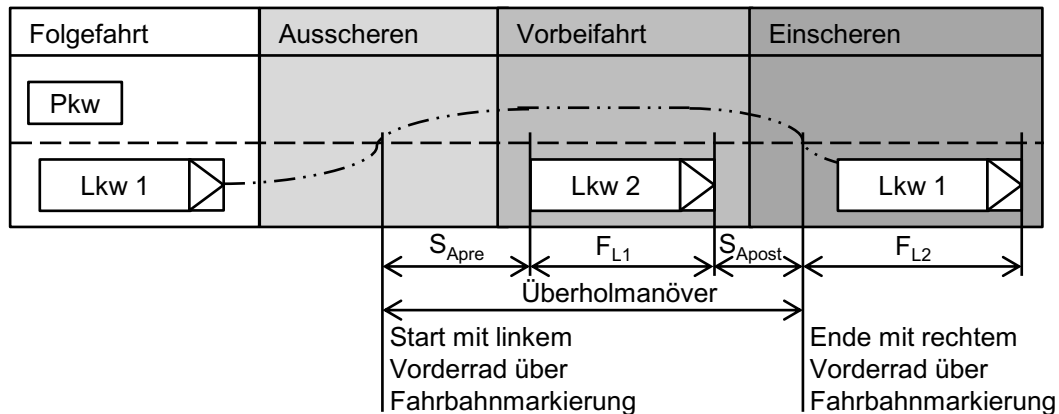


Abbildung 2.11: Fahrzeugbewegung und Fahraufgabe bei einem Lkw-Überholmanöver auf der Autobahn nach [165, S. 15, 166, S. 20, 167, S. 266]; S_A = Sicherheitsabstand, F_L = Fahrzeuglänge

Nach der Annäherung des Ego-Fahrzeugs an den vorausfahrenden Lkw befindet sich der Lkw-Fahrer in der Folgefahrt. In dieser Phase ist seine Fahraufgabe geprägt durch die Entscheidungsfindung [165] (strategische Ebene; Kapitel 2.1.1). Unter der Abwägung aller äußeren Umstände (z.B. Umgebungsverkehr, Straßentopologie, Zeitbudget, Emotionen) wird für oder gegen einen Spurwechsel entschieden. Fällt die Entscheidung für einen Spurwechsel, erfolgt die Durchführung des Ausschervorgangs (operative Ebene; Kapitel 2.1.1). Der Spurwechsel startet sobald das vordere linke Rad des Ego-Fahrzeugs die Leitlinie zur linken Seite berührt [165]. Auf der Überholspur befindet sich der Lkw-Fahrer des Ego-Fahrzeugs in der Vorbeifahrt und damit in der Entscheidungsfindung zum Spurwechsel zurück auf die rechte Spur. Das Ende des Spurwechsels ist definiert durch das vollständig Überqueren der Leitlinie des hinteren linken Rads nach rechts ([165]; Abbildung 2.11).

Lkw-Spurwechsel unterscheiden sich zu denen von Pkw. Untersuchungen zeigen, dass „[...] Lkw-Spurwechsel im Normalfall deutlich vorsichtiger und sanfter ausgeführt werden als Pkw-Spurwechsel“ [167, S. 266]. Sie werden in einem „sehr eingeschränkten Geschwindigkeitsfenster“ durchgeführt [167, S. 266]. Die Dauer und Strecke des Spurwechsels sind deutlich länger. Die vorausliegende Topografie sowie das Leistungsgewicht der beteiligten Lkw bestimmen den Verlauf des Überholmanövers.

Der in Deutschland festgesetzte gesetzliche Rahmen für ein Lkw-Überholmanöver sieht vor, dass beide Fahrzeuge eine Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h (§18 Straßenverkehrsordnung) und einen Sicherheitsabstand von $S_A = 50$ m einhalten (§4 StVO). Die maximale Dauer des Überholmanövers ist durch einen Gerichtsentscheid des Oberlandesgericht Hamm auf 45 s festgesetzt [168]. Laut MERTENS ET AL. [25] ergibt sich bei einer Fahrzeuglänge von je $F_L = 8,75$ m eine relative Überholdistanz von 137,5 m (siehe Abbildung 2.11). Dies bedeutet, dass ein

80 km/h schneller Lkw nur überholen darf, wenn der vorausfahrende Lkw nicht schneller als 69 km/h fährt, um die relative Überholdistanz innerhalb 45 s zu überwinden [25].

2.4.2 Dilemma des Lkw-Fahrers bei Überholmanövern

Verkehrsuntersuchungen auf deutschen Autobahnen zeigen, dass sich Lkw-Fahrer in den wenigsten Fällen an die gesetzlich vorgeschriebenen Parameter zu Dauer, Abstand und Geschwindigkeit halten [169]. Um die Dauer eines Überholmanövers zu reduzieren, fahren Lkw-Fahrer entweder schneller oder unterschreiten den vorgeschriebenen Sicherheitsabstand [25]. Zudem zeigen Untersuchungen, dass Lkw-Fahrer auch bei einer geringeren Differenzgeschwindigkeit überholen [23]. Als Grund hierfür gilt vorrangig der permanente Zeitdruck, der aus der gleichzeitigen Einhaltung von Lieferzeiten und Lenk- und Ruhezeiten entsteht [11, 13], sowie den potenziellen Sanktionen bei Missachtung in Form von Bußgeldern oder Entzug der Fahrerlizenz [23]. Daher kann ein geringfügig langsamer fahrender Lkw ein erhebliches Zeitproblem darstellen. Das lange Blockieren der Überholspur hat negative Auswirkungen auf die Verkehrseffizienz und steigert das Konfliktpotential zwischen Pkw- und Lkw-Fahrer [16]. Das abrupte Ausscheren der Lkw-Fahrer auf der Autobahn sowie die Reduzierung des Sicherheitsabstands stellen ein Sicherheitsrisiko dar [22, 25]. Die überhöhte Geschwindigkeit des überholenden Lkw während der Dauer des Überholmanövers trägt zu einer reduzierten Energieeffizienz bei, weil der optimale Betriebspunkt des Motors nicht eingehalten wird [21].

Lkw-Fahrer sind daher während Lkw-Überholmanöver auf der Autobahn einem Dilemma ausgesetzt, bestehend aus den vier Faktoren Sicherheit, Zeit, Effizienz und Konflikte mit anderen Verkehrsteilnehmern ([25]; Abbildung 2.12).

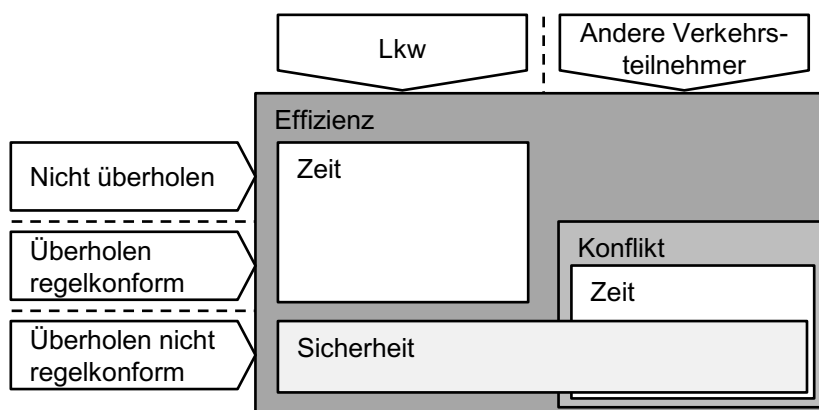


Abbildung 2.12: Dilemma des Lkw-Fahrers zwischen Sicherheit, Zeit, Effizienz und Konflikte mit anderen Verkehrsteilnehmern

Das Überholmanöver von Lkw ist kein isolierter Vorgang eines einzelnen Fahrzeugs. Die Optimierung des Vorgangs erfordert die Kooperation aller betroffenen Verkehrsteilnehmer. Daher werden im folgenden Kapitel zunächst die wesentlichen Aspekte von Kooperation im Straßenverkehr beleuchtet.

2.4.3 Kooperation im Straßenverkehr

Linguistisch betrachtet wird Kooperation als „Zusammenarbeit“, „Teamarbeit“ oder auch „Gemeinschaftsarbeit“ (laut DUDEN ONLINE [170]) verstanden. Definiert wird sie als das „kollektive

Handeln auf ein gemeinsames Ziel“ [171, S. 50], von dem alle Beteiligten profitieren. In dieser Arbeit ist die Kooperation im Kontext des Straßenverkehrs wie folgt definiert:

„Two agents are in a cooperative situation if they meet two minimal conditions. (1) Each one strives towards goals and can interfere with the other on goals, resources, procedures, etc; (2) each one tries to manage the interference to facilitate the individual activities and/or the common task when it exists.“ [172, S. 515].

Die Entscheidung zur Kooperation hängt von den Kosten des kooperativen Verhaltens für die Gruppe ab [173, 174]. Verkehrsteilnehmer interagieren kooperativ, wenn sie „[...]“ das gleiche Ziel verfolgen und sich gegenseitig in der Zielerreichung unterstützen“ [174, S. 10]. Das übergeordnete Ziel ist das gemeinsame Abschließen eines Fahrmanövers [175], das die Kosten (z.B. Sicherheit, Energie, Zeit, Komfort) für ein einzelnes Mitglied oder die beteiligte Gruppe minimiert [176]. Im Sinne des JCS ([46]; Kapitel 2.1.1) teilen Fahrer die begrenzte Ressource „Straße“ [177]. Während der Abwägung der Kosten können Zielkonflikte in einer Gruppe von Fahrern entstehen, z.B. der Zielkonflikt zwischen der Effizienz des Verkehrsfluss und dem Komfort beim Beachten des Reißverschlussverfahrens [178]. Die beschriebenen Kosten der Kooperation im Straßenverkehr lassen sich quantifizieren. KNIES ET AL. [179] stellen Kosten-therme für Sicherheit, Energie- und Zeiteffizienz bzw. Komfort auf.

Die Kostenbewertung der Kooperation wird beeinflusst durch z.B. individuelle [180] und/oder gruppensdynamische Faktoren [181, 182] sowie Motivationshintergründe. Individuelle Faktoren sind z.B. der Charakter des Verkehrsteilnehmers oder dessen persönliche Ziele [173, 174]. Gruppensdynamische Faktoren sind Einflussgrößen, die durch den Austausch der beteiligten Verkehrsteilnehmer entstehen [47]. Das sind z.B. das Verhalten der jeweils anderen Verkehrsteilnehmer, die wahrgenommene Macht über die Anderen oder die Möglichkeit zur Kommunikation vor und während der kooperativen Handlung [174, 183]. Weitere Einflussfaktoren sind die Fähigkeit zur Interpretation kooperativen Verhaltens [184], ein erhöhtes Maß an Interesse und Motivation [185, 186] und der erfahrene Umgang mit anderen Verkehrsteilnehmern [187, 188].

Abbildung 2.13 zeigt den Entscheidungsprozess kooperativer Handlungen im Straßenverkehr nach BENMIMOUN ET AL. [17]:

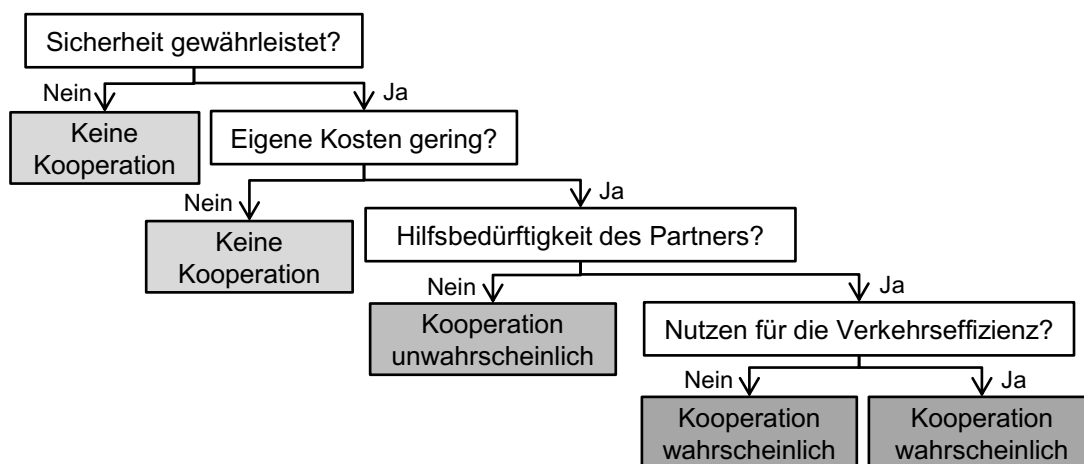


Abbildung 2.13: Entscheidungsprozess für kooperativen Verhalten im Straßenverkehr nach [17, S. 172]

Demnach ist die Sicherheit des Einzelnen die Voraussetzung jeglicher kooperativen Entscheidungen. Nur wenn gewährleistet ist, dass z.B. ein Spurwechsel nicht zu einem Unfall führt,

beginnt der Fahrer eine potenzielle Kooperation abzuwägen. Die Folgen einer Kooperation auf den Gesamtverkehr hingegen steht im Entscheidungsprozess an unterster Stelle.

Das kooperative Handeln im Straßenverkehr lässt sich beschreiben als „[...] ein selbstorganisiertes, chaotisches System [...], das zwar prinzipiell durch Regeln geordnet wird, bei dem aber viele Situationen nicht in einer eindeutigen Regel festgelegt werden können“ [189, S. 128]. So legt die StVO in §1 fest „[...] Wer am Verkehr teilnimmt, hat sich so zu verhalten, dass kein anderer geschädigt, gefährdet oder mehr, als nach den Umständen unvermeidbar, behindert oder belästigt wird“.

Kooperation wird größtenteils durch informelle Regeln gesteuert, die auf den Einschätzungen und Vorhersagen des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer beruht.

Die fünf Phasen der Kooperation im Straßenverkehr sind ([190]; Abbildung 2.14):

1. Wahrnehmen
2. Anbieten/ Anfragen
3. Erkennen
4. Ausführen
5. Abschließen

Angelehnt an das Informationsverarbeitungsmodell nach WICKENS [73] (siehe Kapitel 2.1.5) unterteilt sich der Kooperationsprozess in die Wahrnehmung (Phase 1 Wahrnehmen), Verarbeitung (Phase 2 & 3 Anbieten/ Anfragen bzw. Erkennen) und Reaktion (Phase 4 & 5 Ausführen bzw. Abschließen). Diese fünf Phasen der Kooperation werden von den Kooperationspartnern (Ego-Fahrzeug bzw. Kooperationspartner) durchlaufen. In der Phase der Wahrnehmung erkennt der Fahrer im Ego-Fahrzeug die Fahrsituation und die Möglichkeit einer Kooperation. Er bietet, bzw. fragt in der nächsten Phase eine kooperative Handlung an, die wiederum vom Kooperationspartner erkannt werden muss. Stimmen beide der Kooperation zu, muss auf beiden Seiten die Handlung ausgeführt und abgeschlossen werden.

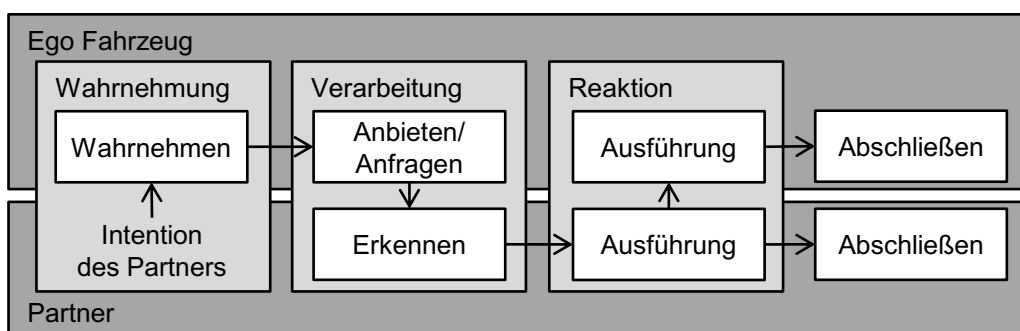


Abbildung 2.14: Phasen der Kooperation im Straßenverkehr nach [190, S. 9]

Zur Abstimmung kooperativer Manöver im Straßenverkehr nutzen die Verkehrsteilnehmer sowohl explizite (z.B. Richtungsanzeige, Lichthupe und/oder Handgesten), als auch implizite Kommunikation (z.B. Bremsen, Beschleunigen, als auch Halten der Geschwindigkeit) [183]. Welche Form der Kommunikation für kooperatives Verhalten gewählt wird, hängt von dem jeweiligen kooperativen Fahrmanöver ab (z.B. Überholen, Abbiegen oder Einfädeln lassen an Anschlussstellen) [191]. Wird die Nachricht auf dem ausgewählten Kommunikationskanal

fehlgeleitet oder missinterpretiert, kann es zu gefährlichen Verkehrssituationen kommen [192]. Die Kommunikation ist somit ein Erfolgsfaktor für kooperatives Verhalten im Straßenverkehr.

Kooperative ADAS (cooperative driving assistance system - CoDAS) unterstützen bzw. ermöglichen erst die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und erzeugen damit kooperatives Verhalten im Straßenverkehr. Im Folgenden wird die Technologie von CoDAS beschrieben und die Funktionsweise des für diese Arbeit relevanten kooperativen CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen vorgestellt.

2.4.4 CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen

Der kooperativen Manöverplanung des CoDAS liegt der digitale Informationsaustausch V2X zugrunde. Er wird als Sammelbegriff [21, S. 10] für den Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen untereinander (Vehicle-to-Vehicle: V2V) und zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur (Vehicle-to-Infrastructure: V2I) verwendet.

Das Ziel des CoDAS ist ein kooperatives Zusammenwirken aller beteiligten Verkehrsteilnehmer innerhalb des JCS (Kapitel 2.1.1) an [176, 193] und lässt sich in drei Kategorien klassifizieren ([194]; Tabelle 2.2):

Tabelle 2.2: Kooperationsgrad des CoDAS nach [194]

Kategorie	Beschreibung
Implizit (passiv)	Informationen von anderem Verkehrsteilnehmer werden genutzt, um die Wahrnehmungsreichweite und Genauigkeit zu erhöhen.
Explizit (passiv)	Informationen von anderen Verkehrsteilnehmern werden genutzt, um deren Absichten zu verstehen und darauf basierend das eigene Fahrverhalten zu beeinflussen.
Kollaborativ (aktiv)	Es wird aktiv in das Fahrverhalten von mehr als nur einem Fahrzeug eingegriffen. Gemeinsam werden kooperative Fahrmanöver ausgehandelt und durchgeführt.

Die Kommunikationstechnologie erfordert über alle Fahrzeughersteller gleich definierte Protokoll- und Nachrichtenstandards. Deren Entwicklung orientiert sich am Kooperationsgrad des CoDAS. Abbildung 2.15 zeigt die Roadmap für deren zeitlichen Entwicklung in Europa auf [21, S. 14, 195]:

Day 1-Nachrichten (Cooperative Awareness Message - CAM und Decentralized Environmental Notification Message - DENM) erweitern den Wahrnehmungsbereich eines Fahrzeugs über die eigene Sensorik hinaus ([196]; implizite Kooperation; Tabelle 2.2).

Day 2-Nachrichten (Collective Perception Message – CPM) versenden zwischen V2X-fähigen Fahrzeugen Sensor-Informationen und ermöglichen eine kollektive Wahrnehmung mit der ein gemeinsames Umfeldmodell geschaffen werden kann. So kann z.B. der Fahrzeugabstand bei einem Spurwechsel aus mehreren Perspektiven genauer bestimmt werden ([197]; explizite Kooperation; Tabelle 2.2).

Day 3+ Nachrichten (Maneuver Coordination Message - MCM) tauschen geplanter Trajektorien der beteiligten Verkehrsteilnehmer aus und ermöglichen Fahrmanöver gemeinsam abzustimmen ([198]; kollaborative Kooperation; Tabelle 2.2).

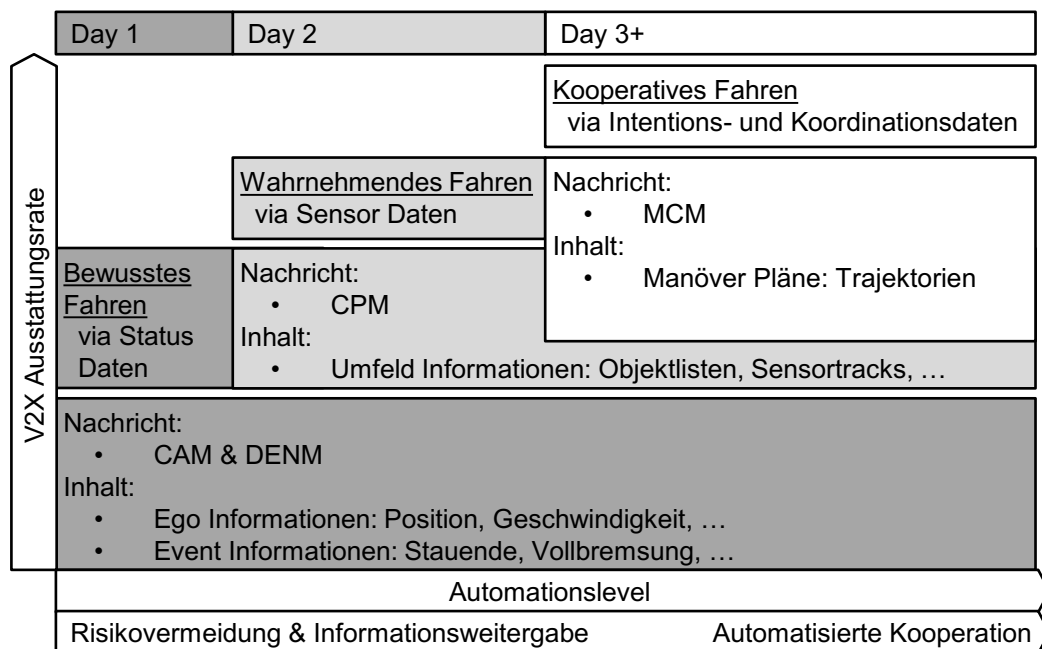


Abbildung 2.15: Roadmap für die Entwicklung der V2X-Kommunikationstechnologie nach [21, S. 14, 195]

Die Planungsdauer des CoDAS unterscheidet sich zwischen den Ebenen der Fahraufgabe ([41]; Kapitel 2.1.1): auf der operativen Ebene beträgt sie Millisekunden bis Sekunden, auf der taktischen Ebene Sekunden bis Minuten und auf der strategischen Ebene Minuten bis Stunden [199].

Aus dem Ablauf der Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen (Kapitel 2.4.1), dem Dilemma der Lkw-Fahrer (Kapitel 2.4.2), dem Potential der Kooperation im Straßenverkehr (Kapitel 2.4.3) und der Technologie des CoDAS ergibt sich die Möglichkeit der Unterstützung der Lkw-Fahrer in ihrer Fahraufgabe ([41]; Kapitel 2.1.1):

- **Auf strategischer Ebene – Auswahl einer geeigneten Überholstelle:** Das CoDAS wägt den Nutzen eines Überholmanövers ab, indem es den vorderen Lkw (Geschwindigkeitsprofil in Abhängigkeit der Zeit) unter Berücksichtigung des eigenen Zeitbudgets und Streckenverlauf beobachtet.

Es schätzt den Erfolg eines Überholmanöversversuchs ab, indem es die vorausliegende Straßentopologie (z.B. Senke, Gefälle) und Straßenabschnitt (z.B. Baustelle, Geschwindigkeitsbegrenzung, Überholverbote) kennt. Das CoDAS identifiziert die Überholstelle, die in Summe den geringsten negativen Effekt für den überholenden Lkw sowie den rückwärtigen Verkehr (siehe Kapitel 2.4.3) erzeugt [23].

- **Auf taktischer Ebene – Auswahl einer geeigneten Lücke zum Ausscheren:** Das CoDAS beobachtet den rückwärtigen Verkehr (Abstände und Geschwindigkeiten) und berechnet, wann ein für den Spurwechsel ausreichender Abstand zum rückwärtigen Verkehr vorhanden ist.

Der rückwärtige Verkehr kooperiert mit dem überholenden Lkw, indem dieser auf der Überholspur Abstand hält und somit eine Lücke zum Ausscheren von der rechten Spur bildet. Dies kann durch Beschleunigung, Ausrollen oder Spurwechsel des rückwärtigen Verkehrs erfolgen [200, 201]. Es werden die gemeinschaftlichen Kosten des kooperativen Manövers in der Entscheidungsgrundlage berücksichtigt [23].

- **Auf operativer Ebene – Übernahme der Längsführung:**
 - **Absichern eines verringerten Sicherheitsabstands:** Um die Dauer des Überholmanövers zu reduzieren, verringern die Lkw-Fahrer ihre Sicherheitsabstände (Kapitel 2.4.2). Durch V2X-Kommunikation wie sie bereits in der Forschung zum Platooning erfolgreich angewandt wird [33, 202], kann das resultierende Risiko abgesichert werden. Voraussetzung hierfür ist die Übertragung der Bremssignale des Vorderfahrzeugs [25, 33].
 - **Anpassung der Geschwindigkeiten:** Das CoDAS erhöht bzw. reduziert die Geschwindigkeit durch effizientes Ausrollen oder Nutzen des effizientesten Betriebspunkts des Motors [25]. Die Auswahl der Geschwindigkeiten orientiert sich wie das Finden des optimalen Überholzeitpunkts an den geringsten negativen Effekten für den überholenden Lkw, den rückwärtigen Verkehr und insbesondere für den überholten Lkw, weil dieser seine Geschwindigkeit als Kooperationsgewährer für den überholenden Lkw anpassen sollte [25].

MERTENS ET AL. [21, 23, 25, 32] stellen in ihren Untersuchungen ein CoDAS vor, dass diese Unterstützung leisten möchte. Unter Verwendung des Nachrichtenstandards CAM und DENM werden auf strategischer Ebene die geeignete Überholstelle identifiziert. Auf operativer Ebene erhält der Lkw-Fahrer von dem Level-1 Assistenzsystem Unterstützung in der Längsführung (Kapitel 2.1.3). Die kooperative Abstimmung basiert auf dem Konzept eines funktionspezifischen und rollenbasierten verteilten Zustandsautomaten [203]. Innerhalb von zehn aufeinander aufbauenden Zuständen wird ein kooperatives Lkw-Überholmanöver auf der Autobahn durchgeführt ([32]; Tabelle 7.1).

MERTENS ET AL. [21, 204] zeigen die technische Umsetzbarkeit solch eines CoDAS. Durch die kooperative Auswahl der geeigneten Überholstelle und der Anpassung der Geschwindigkeit beider Fahrzeuge lässt sich die Überholdauer reduzieren und damit die Gesamtkosten bezogen auf Verkehrs- sowie Energieeffizienz verringern [21, 23]. Durch die V2X-Technologie können die Abstände zwischen den Lkw abgesichert reduziert und damit abermals die Überholdauer gekürzt werden [21, 25]. Die Sicherheit von Lkw-Überholmanövern kann durch die V2X Absicherung erhöht und das Konfliktpotential zwischen den Verkehrsteilnehmer durch die rasche Abwicklung der Überholmanöver reduziert werden.

Damit kann das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen einen wesentlichen Beitrag zur Auflösung des Lkw-Fahrer Dilemmas (Kapitel 2.4.2) beitragen. Die Voraussetzung für den positiven Nutzen eines solchen ADAS ist die Nutzbarkeit durch den Lkw-Fahrer sowie die Akzeptanz gegenüber dem System.

Im nächsten Kapitel werden die Anforderungen bezüglich der Gestaltung einer HMI für das skizzierte CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen erörtert.

Tabelle 2.3: Zustände des CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen nach [32]

Nr	Zustand	Beschreibung
1	Solo	Keine Synchronisierung zwischen den Fahrzeugen
2	Initialisierung	Die Rollen des Überholenden und Überholten werden den zwei beteiligten Lkw zugeordnet.
3	Planung	Überholender und Überholter planen gemeinsam das Überholmanöver. Bei einer beidseitigen Zustimmung wird u.a. Überholdauer und Sicherheitsabstände beim Ein- und Ausscheren (pre und post) festgelegt.
4	Annäherung	Überholender nähert sich dem Überholten und passt kontinuierlich seine Geschwindigkeit an. Sobald Abstand von < 60 m erreicht ist, wird zu Zustand 5 gewechselt.
5	Abstand absichern (pre)	Überholender reduziert den Abstand und reagiert auf die Bremssignale vom Überholten. Der Überholvorgang wird mit dem rückwärtigen Verkehr auf der linken Spur ausgehandelt.
6	Spurwechsel nach links	Unter Berücksichtigung der vom Überholten gesendeten Bremssignale wechselt der Überholende auf die linke Spur, sobald der ausgehandelte reduzierte Sicherheitsabstand (pre) erreicht ist.
7	Vorbeifahren	Überholender fährt am Überholten vorbei. Beide passen ihre Geschwindigkeiten im Rahmen der voreingestellten Hysterese an.
8	Spurwechsel nach rechts	Sobald der zuvor ausgehandelte reduzierte Sicherheitsabstand (post) erreicht ist wechselt Überholender auf die rechte Spur. Überholter reagiert auf die Bremssignale des Überholenden.
9	Abstand absichern (post)	Überholter reagiert auf die Bremssignale, bis ein Abstand von > 50 m erreicht ist.
10	Ende	Die Synchronisierung wird aufgehoben. Das kooperative Manöver beendet.

2.5 Herausforderungen und Empfehlungen für die HMI-Gestaltung des CoDAS

Die grundlegenden Voraussetzungen einer erfolgreichen Fahrer-Fahrzeug Interaktion unter Berücksichtigung der Besonderheiten von Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen und der Möglichkeiten zur Unterstützung durch ein CoDAS ergeben drei wesentliche Herausforderungen für die Gestaltung einer HMI für jenes: Eine gemeinsame Wissensbasis der Kooperationspartner (Kapitel 2.5.1), geeigneter Abstimmungsprozess zwischen den Kooperationspartnern (Kapitel 2.5.2) und die Zustimmung zur Kooperation (Kapitel 2.5.3). Im Folgenden werden die Herausforderungen beschrieben und Empfehlungen zur Gestaltung aus der Literatur abgeleitet.

2.5.1 Gemeinsame Wissensbasis der Kooperationspartner

Kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen erfordern eine gemeinsame Wissensbasis zwischen den Kooperationspartnern. Kooperation, als spezielle Form der Interaktion zwischen zwei Fahrzeugen [47, 205] erfolgt innerhalb der Subsysteme Fahrzeug, Straße und

Verkehr ([206]; JCS; Kapitel 2.1.1). Alle drei Subsysteme liefern Informationen, die im Verlauf der Kooperation berücksichtigt werden und für die Entscheidung und erfolgreicher Durchführung eines Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen notwendig sind. Im Subsystem Fahrzeug sind dies z.B. Informationen über Verkehrsregeln, im Subsystem Straße z.B. Informationen zur Topologie oder Infrastruktur und im Subsystem Verkehr z.B. Informationen über Verkehrsfluss und -dichte. Der Fahrer kann jedoch durch zu viele oder falsch platzierte Informationen überfordert [175] oder gestört [207] werden (Kapitel 2.1.5). Eine angemessene Beanspruchung bzgl. der Informationsverarbeitung [56] während der Nutzung des CoDAS muss gefunden werden.

In der Gestaltung der HMI des CoDAS ist es somit notwendig, für jeden Kooperationspartner den passenden Informationsinhalt, Darstellungsform, -ort und -zeitpunkt unter Berücksichtigung des menschlichen Informationsverarbeitungsprozess nach WICKENS [208] zu finden [209]. Parallel zur sensorbasierten gemeinsamen Wahrnehmung der Fahrzeuge entsteht dadurch eine gemeinsame Wissensbasis (Common Frame of Reference (COFOR); [172]) aller beteiligten Fahrer. Diese schafft einen Rahmen, in dem die Kooperation ausgehandelt und durchgeführt werden kann [61, 209].

Gestaltungsempfehlungen bezüglich einer gemeinsamen Wissensbasis für CoDAS aus dem Pkw-Bereich sind z.B. die Anzeige von Information zum Fortschritt der Kooperation [210, S. 46] oder die Visualisierung des kooperativen Fahrmanövers sowie der Kooperationspartner [209, S. 177]. Das Verhalten des CoDAS wird hierdurch für die Fahrer transparent (Kapitel 2.1.5). [211, 212] liefern weitere Empfehlungen zur Gestaltung des passenden Informationsinhalts (z.B. Warnmeldungen [211] und Zeitpunkt [212]) bei kooperativen Fahrmanövern.

2.5.2 Abstimmungsprozess zwischen den Kooperationspartnern

Kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen erfordern einen geeigneten Abstimmungsprozess zwischen den Kooperationspartnern. Die zu gestaltende HMI koordiniert die Kooperation zwischen mindestens vier Partnern: mindestens zwei beteiligte Fahrer und deren Fahrzeuge (Kapitel 2.1.3). Die Entwicklung der HMI kann nicht den Fahrer isoliert als alleinigen Nutzer sehen [47]. Es benötigt eine Interaktion, die die Bedürfnisse aller Kooperationsparteien berücksichtigt, auch wenn diese unterschiedliche Absichten und Anforderungen während des gemeinsamen Manövers haben [213]. Um dieses komplexen Fahrmanöver aus unterschiedlichen Perspektiven für einen Abstimmungsprozess detailliert untersuchen zu können, empfiehlt es sich das Kooperationszenario in Phasen zu unterteilen (siehe z.B. kooperativer Spurwechsel nach ZIMMERMANN [213, S. 1288]: Request Preparation, Prepare, Suggest Action, Action). In jeder Phase wird der Fahrer gezielt unterstützt und durch passende Dialoggestaltung während der Kooperation geführt [214].

Die Kommunikation ist dabei der wichtigste Baustein [17, 172, 190]. Gerade durch die eingeschränkten Möglichkeiten durch räumliche Distanz zwischen den Fahrzeugen und Fahrern zu kommunizieren, macht die Unterstützung mittels CoDAS notwendig [176]. Um diese Kommunikation möglichst eindeutig und fehlerfrei zu gestalten, sollte ein gemeinsamer Kommunikationsstil (Common communication code; [172, S. 527]), z.B. Lichthupe beim Wiedereinscheren nach einem Lkw-Überholmanöver, etabliert werden. Missverständnisse oder Gefahrensituationen können dadurch vermieden werden [192]. Darüber hinaus muss jeder Kooperationspartner klar adressiert [175, 215] werden, sodass er sich seiner aktuellen Rolle und dem von ihm erwarteten Verhalten während des gemeinsamen Manövers bewusst ist (Model of oneself and of the partner; [172, S. 528, 210]).

2.5.3 Zustimmung der Partner zur Kooperation

Kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen erfordern die Zustimmung der Verkehrsteilnehmer zur Kooperation. Die Kooperation steigert in einer übergeordneten Betrachtung die allgemeine Verkehrssicherheit und -effizienz [216] und fördert ein positives emotionales Klima im Straßenverkehr [217]. In der individuellen Betrachtung und der persönlichen Abwägung für oder gegen eine Kooperation stehen jedoch die zum Teil unbekanntenen Folgen für den Gesamtverkehr im Hintergrund (Kapitel 2.4.3). Daher hat die zu gestaltende HMI für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen die Aufgabe, den Lkw-Fahrer in einer entsprechenden Fahrsituation zur Kooperation zu motivieren.

Kooperation setzt grundsätzlich voraus, dass die Beteiligten ein gemeinsames Ziel verfolgen (z.B. effizienter Verkehrsfluss), was im Straßenverkehr nicht zwingend gegeben ist, weil individuelle Ziele höher priorisiert werden ([174]; Kapitel 2.4.3). In Folge kann die Interaktion zweier Fahrzeuge eher einen kompetitiven Charakter entsprechen [206]: Nur einer der Beteiligten erzielt im Fahrmanöver einen individuellen Vorteil und nimmt billigend den Nachteil des anderen in Kauf.

Der Lkw-Fahrer nimmt in der Perspektive des Überholenden als auch in der Perspektive des Überholten eine kooperationsgewährende Rolle ein. Auch wenn Lkw-Fahrer untereinander die Rolle als Überholenden und Überholten tauschen, sind sie gegenüber einem Pkw-Fahrer stets in der gewährenden Rolle. Sie überholen erst, wenn die Verkehrslage es zulässt und rollen aus, damit der rückwärtige Verkehr nicht länger als notwendig behindert wird. Es sei auf den Konflikt zwischen Lkw- und Pkw-Fahrern [18] verwiesen (siehe Kapitel 2.2.2). Umfragen zeigen, dass sich Lkw-Fahrer durch Pkw-Fahrer benachteiligt oder ungerecht behandelt fühlen [15, 17]. Es entstehen gruppendynamische Effekte unter den Lkw-Fahrern [18], die einer Zustimmung zur Kooperation während Lkw-Überholmanövern hinderlich sein könnte.

Weitere individuelle Gründe, weshalb der Lkw-Fahrer einer Kooperation zustimmen könnte sind z.B. die Persönlichkeit [11] und die Emotion des Fahrers [218, 219].

Die Herausforderung für die Gestaltung der HMI für das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen ist es, den Lkw-Fahrer in seiner individuellen Situation anzusprechen und zu motivieren, das gemeinsame Ziel (z.B. Verkehrs- und Energieeffizienz) zu erkennen und durch Kooperation zu erreichen.

ZIMMERMANN ET AL. [186] nutzen in ihrer Untersuchung Gamification-Ansätze, um Kooperation zwischen Pkw-Fahrern bei Spurwechsel zu fördern. Spielelemente wie Bestrafung und Belohnung in Form von Zeit- bzw. Punktekosten werden ebenso untersucht, wie Nutzerkonten mit Informationen über vergangenes Kooperationsverhalten, die vor einer möglichen Kooperation von anderen Verkehrsteilnehmern einsehbar sind. Hat z.B. ein Fahrer in der Vergangenheit wenig kooperiert, wird dies im Head-Up Display anderer Fahrzeuge angezeigt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Kooperation im Straßenverkehr durch solche extrinsische Motivation und soziale Effekte unter Pkw-Fahrern gesteigert werden kann [186].

Nachdem in diesem Kapitel Herausforderungen und Empfehlungen für die HMI-Gestaltung von CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen zusammengefasst wurden, soll im Folgenden der Stand der Forschung zu konkreten HMI-Konzepten für das CoDAS erörtert werden.

2.6 Bestehende HMI-Konzepte für das CoDAS

HMI-Konzepte für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen sind in der Literatur bis dato nicht zu finden. Daher nähert sich die Arbeit im Folgenden über die isolierte Betrachtung der Unterstützungsmöglichkeiten des CoDAS auf strategischer, taktischer und operativer Ebene der Fahraufgabe an:

- Auswahl einer geeigneten Überholstelle (strategisch)
- Ausführen eines kooperativen Spurwechsels (taktisch)
- Absichern einer geeigneten Überholstelle (operativ)
- Anpassung der Geschwindigkeit (operativ)

Tabelle 2.4 stellt die in der Literatur zu findenden vergleichbaren ADAS/CoDAS den vier Unterstützungsmöglichkeiten gegenüber und fasst die dazu gefundenen HMI-Konzepte zusammen:

Tabelle 2.4: Für die Unterstützungsmöglichkeiten des CoDAS vergleichbare ADAS/CoDAS und deren HMI-Konzepte

Unterstützung des CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen	Vergleichbare ADAS/CoDAS	Fahrzeug	HMI-Konzepte
Auswahl einer geeigneten Überholstelle	Lane Change Decision Aid Systems	Pkw/Lkw	z.B. [220, 221]
Ausführen eines kooperativen Spurwechsels	Manöverbasierter Fahrstreifenwechselassistent	Pkw	[166]
	Kooperative Fahrstreifenwechsel im Urbanen Mischverkehr	Pkw	[222, 223]
Absichern eines verringerten Sicherheitsabstands	Platooning	Lkw	[224–229]
Anpassung der Geschwindigkeit	GPS gestützter Eco-Tempomat	Lkw	z.B. [230, 231]
	Kooperatives Einfädeln auf Autobahnen	Pkw	[209, 232–234]

Auswahl einer geeigneten Überholstelle: Das CoDAS verwendet V2X-Daten (z.B. Topologie, Lkw-Daten etc.), um eine geeignete Überholstelle zu finden. Die Aufgabe der HMI ist es, dem Fahrer vorausschauend die Rückmeldung zu geben, wann ein Überholvorgang zu hohen oder geringen Kosten möglich ist.

Vergleichbare Systeme und HMI-Konzepte auf taktischer Ebene, also unmittelbar vor einem Spurwechsel (Lane Change Decision Aid Systems – LCDAS; [235]), warnen den Fahrer, sobald sich mögliche Objekte auf der linken oder rechten Spur befinden und eine Kollision verursachen könnten. Solche Systeme sind bereits in Pkw (z.B. BMW [220]), wie auch Lkw (z.B. Volvo Trucks [221]) verbaut. Durch z.B. farbliche Markierungen der Fahrbahnänder in der Ego-Darstellung im Kombi-Display wird dem Fahrer die Möglichkeit eines Spurwechsels angezeigt (Abbildung A.1; Anhang A). HMI-Konzepte für Systeme, die auf strategischer Ebene handeln - wie es für das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen notwendig wäre -, lassen sich in der Literatur nicht finden.

Ausführen eines kooperativen Spurwechsels: Die HMI für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen bereitet den Lkw-Fahrer auf den kooperativen Spurwechsel vor und liefert ihm den Startzeitpunkt, zu dem das Manöver auszuführen ist.

HABENICHT [166] stellt in seiner Arbeit einen manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistent und dessen HMI-Konzept für Pkw vor. SPRINGER ET AL. [222, 223] stellen in ihren Arbeiten zwei weitere HMI-Konzepte für kooperative Pkw-Fahrstreifenwechsel im urbanen Mischverkehr vor. Der zeitliche Horizont, ab wann ein Spurwechsel für den Fahrer möglich ist, wird bei HABENICHT z.B. durch einen sich füllenden Richtungspfeil angezeigt (Abbildung A.2; Anhang A)

Absichern eines verringerten Sicherheitsabstands: Das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen versucht, durch einen reduzierten Sicherheitsabstand das Überholmanöver zu optimieren [25]. Die beiden Lkw werden miteinander gekoppelt. Der Überholende reduziert seine Geschwindigkeit und reagiert auf die Bremsignale vom Überholten in einem Abstand unter 50 m.

Ein vergleichbares CoDAS ist das Lkw-Platooning. Das CoDAS nutzt ebenfalls den durch V2X ermöglichten reduzierten Sicherheitsabstand [236] und damit günstige Strömungseffekte im Windschatten des vorausfahrenden Fahrzeugs zur Energieeffizienz [236, 237]. Das EU-Projekt COMPANION (Cooperative dynamic formation of Platoons for safe and energy-optimized goods transportation) [238] stellt hierzu ein HMI-Konzept vor [226]. Weitere HMI-Konzepte für das Platooning sind z.B. in [224–229] zu finden. Die Darstellung des Kopplungsvorgangs sowie die Rückmeldung der HMI an den Fahrer, dass beide Fahrzeuge mit-einander Informationen austauschen, wird z.B. durch eine grüne Hinterlegung des angezeigten Vorderfahrzeugs im Kombidisplay angezeigt ([226]; Abbildung A.3; Anhang A).

Anpassung der Geschwindigkeit: Während dem Überholmanöver wird die Geschwindigkeit des Überholten reduziert. Gleichzeitig erhöht der überholende Lkw seine Geschwindigkeit, um das Manöver möglichst rasch abzuschließen. Eine HMI hat die Aufgabe, den Fahrer über die Geschwindigkeitsanpassung zu informieren bzw. zur Anpassung zu motivieren.

Der bereits im Serien-Lkw verbaute Eco-Tempomat (z.B. Mercedes [231]) erfasst GPS-gestützt den vorausliegenden Streckenverlauf, um die Fahrstufe und Geschwindigkeit des Lkw anzupassen. Ziel dahinter ist nicht die Kooperation, sondern die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs. Eine vom Fahrer eingestellte Hysterese (z.B. MAN Eco-Level I bis III [230]) definiert den Bereich, in dem die Geschwindigkeitsanpassung vom System vorgenommen werden darf. Diese Hysterese wird z.B. bei Mercedes durch eine farbliche Hinterlegung des Geschwindigkeitsbereichs in der Tachoanzeige dargestellt (Abbildung A.4; Anhang A).

Das CoDAS für das Einfädeln an Anschlussstellen auf Autobahnen [197] passt wie das CoDAS für Lkw-Überholmanöver mit Hilfe von V2X-Technologie, die Geschwindigkeit des Kooperationsgewährenden an. Ziel ist hier, dem Kooperationsbedürftigen beim Auffahren auf die Autobahn eine passende Lücke zum Einscheren zu gewähren. KRAFT ET AL. [209, 232–234] stellen in ihren Untersuchungen ein HMI-Konzept für Pkw vor, in der diese Lücke durch eine farbliche Markierung in der Darstellung des Umgebungsverkehrs im Kombidisplay angezeigt wird (Abbildung A.5; Anhang A).

3 Forschungsfragen und Vorgehen

Im Folgenden wird der Stand der Wissenschaft kritisch betrachtet (Kapitel 3.1). Es wird der Forschungsbedarf erörtert (Kapitel 3.1.1) und die Aufgabenstellung dieser Arbeit (Kapitel 3.1.2) formuliert. Anschließend werden die Forschungsfragen (Kapitel 3.2) aufgestellt und das Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen (Kapitel 3.3) beschrieben.

3.1 Fazit zum Stand der Wissenschaft

Niedrige Sicherheitsabstände beim Ein- und Ausscheren, starkes Abbremsen des rückwärtigen Verkehrs sowie langes Blockieren der Überholspur sind häufig auftretende negative Aspekte für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen (Kapitel 2.4.1).

Hintergrund ist ein Dilemma (Kapitel 2.4.2), dem der Lkw-Fahrer ausgesetzt ist. Dieser sieht sich mit der Entscheidung konfrontiert, individuellen Zeitdruck, allgemeine Sicherheit, Verkehrseffizienz und Konfliktpotential gegeneinander abzuwägen.

Kooperation (Kapitel 2.4.3) kann dieses Dilemma auflösen: Lkw-Fahrer können mithilfe des CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen (Kapitel 2.4.4) miteinander den geeigneten Überholort und -Zeitpunkt bestimmen. Durch den Austausch relevanter Fahr- und Fahrzeugdaten werden Abstände und Geschwindigkeiten während des Manövers angepasst. Unter Einbeziehung des rückwärtigen Verkehrs wird der Lkw-Fahrer aus dem beschriebenen Dilemma befreit. Die Verkehrs- und Energieeffizienz wird optimiert, die Fahrsicherheit erhöht und Konfliktsituationen mit anderen Verkehrsteilnehmern reduziert.

Die für das CoDAS notwendige Technologie ist bereits heute schon im Pkw verbaut [34]. In einer prototypischen Umsetzung des CoDAS bestätigen MERTENS ET AL. [21, 23, 25, 32] die technische Machbarkeit im Lkw und den Nutzen des Systems aus technologischer Sicht. Jetzt entscheidet der Lkw-Fahrer selbst über den Erfolg des CoDAS. Dieser muss sowohl in der Lage sein das CoDAS zu nutzen und es auch nutzen wollen, also dem kooperativen Manöver zuzustimmen (vgl. Technologieakzeptanzmodell; Kapitel 2.2). Voraussetzung ist die Fahrer-Fahrzeug Interaktion unter der Nutzung einer HMI für das CoDAS:

Die HMI sollte so gestaltet sein, dass sich der Lkw-Fahrer der Situation in der er sich befindet, bewusst ist (Kapitel 2.1.4) sowie ein korrektes Verständnis der Funktion hat (Kapitel 2.1.5).

Neben der Usability (Kapitel 2.2.2) sollte die HMI so gestaltet sein, dass der Lkw-Fahrer der stellvertretenden Kommunikation zwischen dem CoDAS und den beteiligten Fahrzeugen vertraut (Kapitel 2.2.1). Die User Experience der HMI sollte so sein, dass der Fahrer das CoDAS gerne und wiederholend nutzen möchte (Kapitel 2.2.3).

Der Stand der Wissenschaft beschreibt die hohe Komplexität kooperativer Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen (Kapitel 2.4.1). Die hohe Anzahl an Informationen der beteiligten Subsysteme

(Fahrzeuge, Straße und Verkehr; Kapitel 2.5.1), die für eine Entscheidung und erfolgreiche Durchführung eines kooperativen Lkw-Überholmanöver erforderlich sind, müssen durch eine HMI aufbereitet werden. Daraus ergeben sich weitere Herausforderungen für die Gestaltung:

Die Bereitstellung aller notwendigen Informationen erfordert eine gemeinsame Wissensbasis der Kooperationspartner (Kapitel 2.5.1), die durch die HMI geschaffen werden sollte. Ein Abstimmungsprozess zwischen den Kooperationspartnern (Kapitel 2.5.2) über die HMI sollte erfolgreich kooperative Überholmanöver ermöglichen.

Neben der hohen Komplexität kooperativer Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen, wird die Zustimmung aller Kooperationspartner als Herausforderung für die Gestaltung der HMI identifiziert (Kapitel 2.5.3). Es bedarf der Motivation des überholenden Lkw-Fahrers seinen Überholwunsch so lange zurück zu halten, bis der ideale Ort und Zeitpunkt erreicht ist. In gleichem Maße bedarf es der Motivation des überholten Lkw-Fahrers, seine Geschwindigkeit zu reduzieren, sodass das Manöver schnell und zügig, mit möglichst geringer Verzögerung für den rückwärtigen Verkehr abgeschlossen werden kann.

In diesem Sinne liefern die Vermenschlichung und der Anthropomorphismus einen Ansatz (Kapitel 2.3.1), der in verschiedenen Anwendungsbereichen eine positive Wirkung zeigt. So lässt sich die Überzeugungskraft von Robotern durch eine vermenschlichte Mensch-Roboter Interaktion in Form von Mimik und/oder Gestik erhöhen (Kapitel 2.3.1).

Im Folgenden wird diskutiert, inwieweit bestehende HMI-Konzepte Lösungen für die beschriebenen Herausforderungen der HMI-Gestaltung liefern.

3.1.1 Anwendbarkeit bestehender HMI-Konzepte

Empfehlungen zur Gestaltung einer Wissensbasis und eines Abstimmungsprozess für eine HMI eines CoDAS liefern Arbeiten aus dem Pkw-Bereich (z.B. [209, 210]; Kapitel 2.5.1). Die Charakteristika der beiden Nutzergruppen Pkw- und Lkw-Fahrer unterscheiden sich jedoch [110]: Der Altersdurchschnitt der Lkw-Fahrer ist höher und der Frauenanteil liegt mit 2 % deutlich unter dem der Pkw-Fahrer [239]. Weitere Unterschiede sind die Einflüsse auf die Fahraufgabe [240]: Zeitdruck, lange Fahrzeiten und Monotonie sind, anders als bei Pkw-Fahrer, permanente Einflussgrößen auf das Fahren des Lkw-Fahrers. Gestaltungsempfehlungen aus dem Pkw-Bereich können somit nicht pauschal übernommen werden, sondern benötigen einer Überprüfung durch die Lkw-Fahrer.

Der Stand der Wissenschaft liefert kein HMI-Konzept für ein CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen. Über die isolierte Betrachtung der Unterstützungsmöglichkeiten des CoDAS auf strategischer, taktischer und operativer Ebene der Fahraufgabe ergeben sich für den jeweiligen Nutzungskontext vergleichbare HMI-Lösungen (Tabelle 2.4; Kapitel 2.6). Teilumsetzungen dieser Lösungen können für die Gestaltung der HMI für das CoDAS für kooperative Lkw-Überholmanöver übernommen werden. Jedoch bedarf es einer Untersuchung, ob eine Aneinanderreihung dieser etablierten Lösungen für die einzelnen Bestandteile des Manövers eine Optimierung des Gesamtvorgangs und damit des Gesamtnutzens für alle Manöver-Beteiligten leistet.

In der Literatur wird Gamification als erfolgreiche Motivationsstrategie für kooperative Pkw-Spurwechsel vorgestellt ([186]; Kapitel 2.5.3). Der Gamification-Ansatz setzt auf extrinsische Motivation durch kurzfristige Belohnungsanreize. Die in Kapitel 2.3.1 als Alternative vorgestellte Überzeugungsstrategie durch Vermenschlichung und erzeugten Anthropomorphismus setzt

dagegen auf eine intrinsische und damit nachhaltigere Motivation. Ziel ist eine über einen langen Zeitraum anhaltende und häufige Kooperationsbereitschaft, die eine hohe Resistenz gegen weitere auf den Menschen einwirkende individuellen Faktoren wie Stress und Zeitdruck aufweist.

Untersuchungen zu möglichen Effekten vermenschlichter HMI im Pkw belegen, dass Pkw-Fahrer dem Fahrzeug in Folge mehr vertrauen und sicherer fahren (Tabelle 2.1; Kapitel 2.3.2). Mögliche Auswirkungen einer vermenschlichten HMI auf die Kooperationsbereitschaft von Lkw-Fahrern sind bisher nicht untersucht. Welche Formen der Vermenschlichung für den hier beschriebenen Nutzungszweck effektiv sind, lässt sich aus der Literatur nicht ableiten. Vermenschlichte HMI-Konzepte im Lkw, die über einen Sprachassistenten hinaus gehen, existieren nicht.

3.1.2 Aufgabenstellung

Ein CoDAS kann aus technologischer Sicht Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen für den überholenden Lkw sowie für die restlichen Verkehrsteilnehmer effizienter, sicherer und konfliktärmer machen. Voraussetzung ist, dass die Lkw-Fahrer, dieses CoDAS nutzen können und wollen. Verantwortlich hierfür ist die Fahrer-Fahrzeug Interaktion durch die Bedienung einer HMI.

In dieser Arbeit wird ein HMI-Konzept für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen entwickelt, das für alle Manöver-Beteiligten durch die Bereitstellung der relevanten Informationen zum richtigen Zeitpunkt eine gemeinsame Wissensbasis (Kapitel 2.5.1) schafft sowie einen Abstimmungsprozess aller Beteiligten (Kapitel 2.5.2) koordiniert.

Das Ziel ist das erfolgreich durchgeführte kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen aus der Perspektive des überholenden und überholten Lkw:

- Der überholende Lkw stellt seinen Überholwunsch so lange zurück, bis der vom CoDAS ausgerechnete ideale Streckenabschnitt zum Überholen erreicht ist. Er führt den Überholvorgang gemäß den Anweisungen der HMI aus und passt seine Geschwindigkeit an. Er schert erst wieder ein, wenn der vom CoDAS bestimmte Sicherheitsabstand erreicht ist.
- Der überholte Lkw reagiert auf die Kooperationsanfrage des überholenden Lkw und reduziert seine Geschwindigkeit gemäß den Anweisungen der HMI.

Zusätzlich wird ein möglicher gesteigerter Nutzen durch Anthropomorphismus infolge der Interaktion mit einer vermenschlichten HMI erhoben (Kapitel 2.3.1). Hierfür wird gesondert zum ersten ein zweites HMI-Konzept entwickelt. Innerhalb des Entwicklungsprozesses wird diesem Konzept verschiedene menschliche Charakteristiken hinzugefügt und deren Effekt auf den Lkw-Fahrer erhoben.

Damit beide HMI-Konzepte möglichst mit dem mentalen Modell (Kapitel 2.1.4) des Lkw-Fahrers übereinstimmen, wird der Fahrer bereits früh in den Entwicklungsprozess miteinbezogen.

Für die Evaluation des HMI-Konzepts ist eine prototypische Umsetzung des CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen im Fahrsimulator notwendig. Diese orientiert sich an der Definition des CoDAS nach MERTENS [21]. Die Implementierung der Funktions- und Datenebene des CoDAS (Kapitel 2.1.3) oder Machbarkeitsstudien sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Des Weiteren wird die künstliche Intelligenz hinter der vermenschlichten HMI simuliert. Die Entwicklung dieser ist ebenfalls nicht Teil dieser Arbeit.

3.2 Forschungsfragen

Anhand des Fazits zum Stand der Wissenschaft, der formulierten Aufgabenstellung ergeben sich folgende Fragestellungen (F1-F4) dieser Forschungsarbeit:

- **F1: Gestaltung und Evaluation einer HMI für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen**

Wie kann eine geeignete HMI für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen gestaltet sein?

- **F2: Gestaltung und Evaluation einer vermenschlichten HMI im Lkw**

Wie kann eine geeignete vermenschlichte HMI für die Nutzergruppe Lkw-Fahrer gestaltet sein?

Nachdem zwei HMI-Konzepte entwickelt werden, wird im zweiten Schritt die möglichen Veränderungen der Kooperationsbereitschaft sowie der Fahrer-Fahrzeug Interaktion durch Vermenschlichung ermittelt. Dies erfordert die Bearbeitung folgender zwei Forschungsfragen:

- **F3: Veränderung der Kooperationsbereitschaft bei Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen durch eine vermenschlichte HMI**

Wie wirkt sich die Vermenschlichung einer HMI auf die Kooperationsbereitschaft bei Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen aus?

- **F4: Veränderung der Fahrer-Fahrzeug Interaktion durch Vermenschlichung**

Wie wirkt sich die Vermenschlichung auf die Fahrer-Fahrzeug Interaktion bezüglich der wahrgenommenen Usability, Vertrauen, Akzeptanz und User Experience aus?

3.3 Vorgehen und Methodik

Das folgende Kapitel beschreibt das Vorgehen und angewandte Methodik zur Beantwortung der aufgestellten Forschungsfragen.

3.3.1 Nutzerzentrierter Entwicklungsprozess

Um den Lkw-Fahrer möglichst frühzeitig in die Entwicklung der HMI für das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen miteinzubeziehen und dessen Wissen und Bedürfnisse in die Entwicklung zu berücksichtigen [66], wird der nutzerzentrierte Entwicklungsprozess nach DIN EN ISO 9241-210 ([241]; Abbildung 3.1) angewandt. Dieser hat sich bereits für die Entwicklung von HMI für neuartige ADAS im Lkw-Bereich in anderen Arbeiten [63, 226, 242] bewährt.

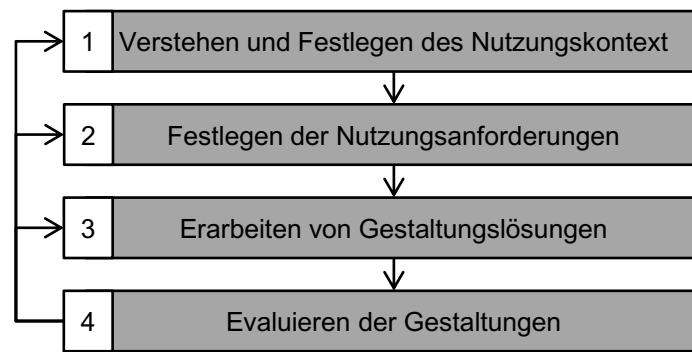


Abbildung 3.1: Nutzerzentrierter Entwicklungsprozess nach DIN EN ISO 9241-210 [241]

Der nutzerzentrierte Entwicklungsprozess besteht aus vier Entwicklungsschritten [241]. Im Folgenden werden die vier Schritte und deren Umsetzung in dieser Arbeit beschrieben:

- Im ersten Schritt wird durch die Auswahl geeigneter Methoden der Nutzungskontext verstanden und festgelegt.

„Der Nutzungskontext ist eine wesentliche Informationsquelle für die Festlegung der Anforderungen eines Systems“ [243, S. 341]

Das Ziel des Nutzungskontext ist das Verständnis für den Nutzer, seiner Aufgaben und der Umgebung in der das System zum Einsatz kommt zu entwickeln. Auch bei gleicher Aufgabe und Umgebung können unterschiedliche Nutzer unterschiedliche Gestaltungslösungen benötigen, um eine positive Erfahrung mit dem System zu erleben [243].

In dieser Arbeit soll eine Fahrsimulatorstudie (Kapitel 4.1) die bereits im Stand der Wissenschaft gewonnenen Informationen zum Nutzungskontext kooperativer Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen durch praxisnahe Beobachtungen des Fahrverhaltens ergänzen [66]. Es sollen Einflussgrößen auf das Überholverhalten sowie die Eigenschaften von kooperativen Fahrverhalten von Lkw-Fahrern während Überholmanöver ermittelt werden.

- Im zweiten Schritt erfolgt die Definition der Nutzungsanforderungen. Hierfür werden die gewonnenen Daten aus dem Nutzungskontext analysiert und gegebenenfalls durch weitere Untersuchungen ergänzt.

In dieser Arbeit soll eine Nutzerbefragung I (Kapitel 4.2.1) Anforderungen an eine HMI für ein CoDAS und eine Nutzerbefragungen II (Kapitel 4.2.2) die Anforderungen an eine vermenschlichte HMI im Lkw ermitteln.

- Im dritten Schritt des nutzerzentrierten Entwicklungsprozesses werden Gestaltungslösungen zur Erfüllung der Nutzungsanforderung erarbeitet.

Für die Konzeptentwicklung der HMI für das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen wird eine Aufgabenanalyse mit Lkw-Fahrern (Kapitel 5.1.1) durchgeführt. Durch die Analyse sollen die für sie relevanten Informationsinhalte im Verlauf des kooperativen Lkw-Überholmanöver erörtern werden. Anschließend sollen HMI-Experten mittels heuristischer Evaluation die Ergebnisse bewerten.

Für die Konzeptentwicklung der vermenschlichten HMI wird ein interdisziplinärer Workshop (Kapitel 5.2.1) durchgeführt. Entwickler aus der Mensch-Roboter Interaktion treffen auf HMI-

Entwickler aus dem Lkw-Bereich. Gemeinsam sollen sie innovative Gestaltungslösungen für eine vermenschlichte HMI im Lkw ermitteln.

- Im vierten Schritt werden die Gestaltungslösungen anhand der in Schritt zwei definierten Nutzungsanforderungen evaluiert.

In dieser Arbeit soll die Evaluation zwei Iterationen durchlaufen. Die Lkw-Fahrer sollen in Fahr-simulatorstudien I-IV die zwei HMI-Konzepte erleben und bewerten. Eine summative Evaluation (Kapitel 6) am Ende des Entwicklungsprozesses soll einen möglichen zusätzlichen Nutzen des vermenschlichten HMI-Konzepts auf die Kooperationsbereitschaft der Lkw-Fahrer während Überholmanövern und der Fahrer-Fahrzeug Interaktion ermitteln.

Abbildung 3.2 stellt die Studien im nutzerzentrierten Entwicklungsprozess dar:

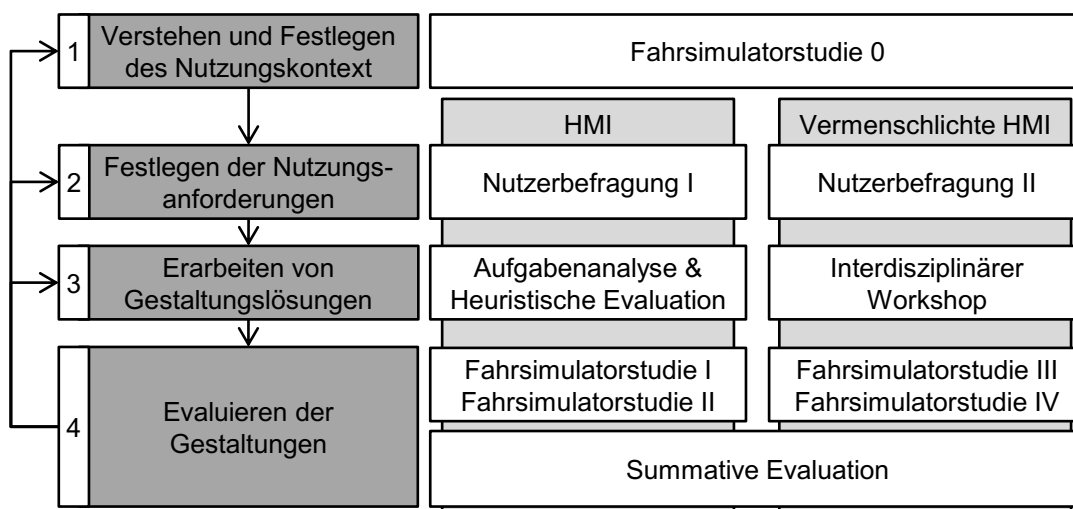


Abbildung 3.2: Studien in den jeweiligen Phasen des Nutzerzentrierten Entwicklungsprozess für das nicht vermenschlichte und vermenschlichte HMI-Konzept

Die Evaluation der zwei HMI-Konzepte erfolgt mittels Fahr-simulatorstudien. Im Folgenden werden die Vorteile dieser erörtert und die verwendeten Fahr-simulatoren beschrieben.

3.3.2 Evaluationsmethode Fahr-simulatorstudien

Für die Durchführung der Fahr-simulatorstudien stehen zwei Fahr-simulatoren des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München zur Verfügung.

Fahr-simulatoren sind ein geeignetes Messinstrument, um für jeden Versuchsteilnehmer die gleichen Versuchsbedingungen zu schaffen und sie dabei keiner realen Gefahr auszusetzen (z.B. durch ein riskantes Überholmanöver) [244]. Studien zeigen, dass sich die Fahr-simulation eignet, den Fahrer jeweils in die Rolle des Überholenden und Überholten zu versetzen [245] sowie die soziale Interaktion während kooperativer Fahr-situationen zu messen [246, 247].

Der dynamische Lkw-Fahr-simulator wird für die Fahr-simulatorstudien 0, I, II und III und der summativen Evaluation verwendet (Abbildung 3.3). Der Simulator ist in eine Fahrer-kabine des Modells TGS vom Herstellers MAN integriert und lagert auf einem Hexapod, womit die Versuchsteilnehmer eine haptische Rückmeldung zur Längs- und Querschleunigung des Systems erfahren. Eine Rücklichtprojektion zeigt ein 210° Sichtfeld. Zusammen mit zwei TFT-Seiten-spiegel-Displays ermöglicht sie die Rundumsicht der Versuchsteilnehmer.



Abbildung 3.3: Dynamischer Lkw-Fahrsimulator des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München

Die Programmierung der Versuchsstrecke erfolgt mittels der Simulationssoftware SILAB© 4, bzw.5 des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften.

Die dynamische Sitzkiste wird für die Studie IV verwendet (Abbildung 3.4). Diese besteht aus einem Mockup, das die Fahrerkabine eines Lkw nachbildet. Das Mockup wird von einer Plattform getragen, die durch D-Box© Aktoren in drei Richtungen (Rollen, Nicken, Gieren) bewegt werden kann. Lenkrad und Fahrersitz sind MAN Serien-Teile. Die visuelle Simulation wird auf drei 55-Zoll Bildschirmen übertragen. Es wird die Simulationssoftware SILAB© 6 des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften GmbH verwendet.



Abbildung 3.4: Dynamische Sitzkiste des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München

4 Explorative Anforderungsanalyse

Die explorative Anforderungsanalyse setzt sich aus den ersten zwei Phasen des nutzerzentrierten Entwicklungsprozess nach DIN EN ISO 9241-210 [241] zusammen: die Ermittlung des Nutzungskontext und der Nutzungsanforderungen (Abbildung 4.1).

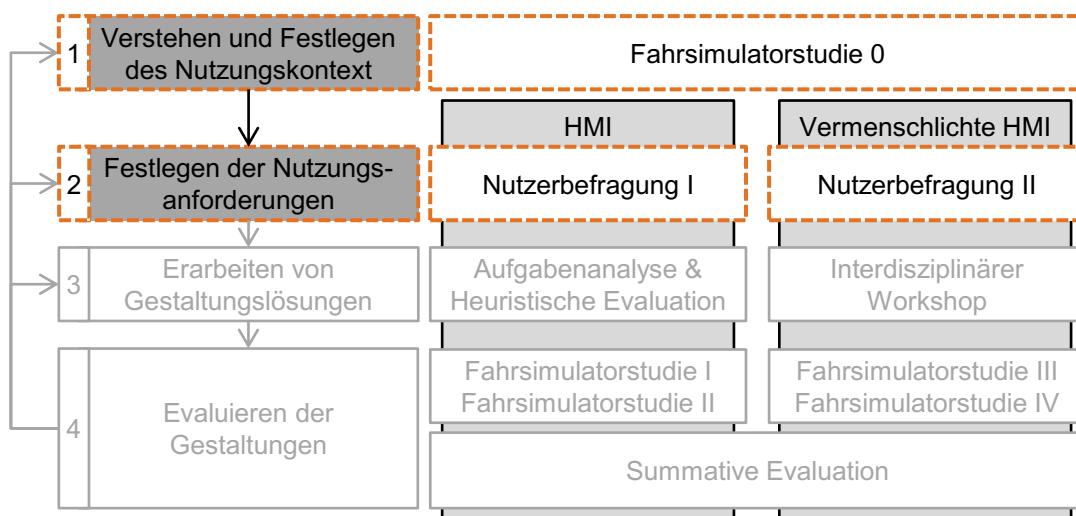


Abbildung 4.1: Zusammensetzung der explorativen Anforderungsanalyse

Eine Fahrsimulatorstudie (Kapitel 4.1) ergänzt die bereits im Stand der Wissenschaft gewonnenen Informationen zum Nutzungskontext kooperativer Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen. Anschließend sollen zwei separate voneinander unabhängige Nutzerbefragungen die Nutzeranforderungen an eine HMI für das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen (Kapitel 4.2.1) bzw. an eine vermenschlichte HMI im Lkw (Kapitel 4.2.2) ermitteln.

4.1 Fahrsimulatorstudie zur Ermittlung des Nutzungskontext

Folgendes Kapitel fasst die Fahrsimulatorstudie zur Ermittlung des Nutzungskontext kooperativer Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen zusammen. Für eine ausführliche Beschreibung der Erhebung, Auswertung und Diskussion sei auf FANK ET AL. [22] verwiesen.

Ziel: Das Ziel dieser Fahrsimulatorstudie ist die praxisnahe Analyse von Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen, um den Status quo des Nutzungskontext zu ermitteln. Es sollen Einflussgrößen auf das Überholverhalten sowie die Eigenschaften von kooperativem Fahrverhalten von Lkw-Fahrern während Überholmanöver in den Perspektiven des überholenden und des überholten Lkw ermittelt werden (Tabelle 7.1):

Tabelle 4.1: Charakteristik der Fahrsimulatorstudie 0

Studie	Ziel(e)	Teilnehmer / Überhol szenarien	Perspektiven / HMI-Varianten	Untersuchungs- variablen
Fahrsimulator- studie 0 [22]	<ul style="list-style-type: none"> • Einflussgrößen auf das Überholverhalten • Eigenschaften von kooperativen Fahrverhalten 	33 / 18	2 / 4	Erfolgsquote, Akzeptanz

Methodik: Es wird eine Studie mit Berufskraftfahrern am dynamische Lkw-Fahrsimulator des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der technischen Universität München durchgeführt. Die Versuchsteilnehmer werden in der Fahrsimulation mit 18 Überhol szenarien konfrontiert (11 in Perspektive des Überholenden; 7 in Perspektive des Überholten), die sich anhand definierter Parameter (z.B. Fahrstreifenanzahl, Steigung, Einscherabstand) unterscheiden. Mittels der Parameter sollen mögliche Einflussfaktoren auf die Entscheidung zur Durchführung eines Überholmanövers ermittelt werden. In der Perspektive des Überholten soll untersucht werden, wann Lkw-Fahrer kooperieren und ihre Geschwindigkeit für den anderen Lkw reduzieren. Hierfür wird unter anderem das Kooperationsverhalten der Teilnehmer erhoben, nachdem ein akustischer Hinweis („*Kommender Überholvorgang!*“) ihnen Rückmeldung gibt, dass ein Lkw von hinten überholen möchte. Je nach Ausprägung besteht die Rückmeldung aus einem Hinweis oder einem Hinweis ergänzt durch eine Handlungsanweisung (z.B. „*Bitte Bremsen!*“).

Als objektive Messgröße werden Fahrdaten (Geschwindigkeit, Beschleunigung etc.) erhoben. Als subjektives Maß wird die wahrgenommene Akzeptanz gegenüber dem akustischen Hinweis nach dem VAN DER LAAN Fragebogen ([85]; Kapitel 2.2) ermittelt.

Die Stichprobe setzt sich aus 32 männlichen und einer weiblichen Lkw-Fahrer/in zusammen.

Ergebnisse: In der Auswertung der Überhol szenarien in der Perspektive des überholenden Lkw können keine Einflussgröße identifiziert werden, die die Versuchsteilnehmer dazu bringen, ihren Überholwunsch zurückzustellen: Die Versuchsteilnehmer überholen ungeachtet der eingesetzten Hinweise. Dies hat zur Folge, dass im Schnitt die Dauer der Überholmanöver länger als 45 Sekunden ist und die Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h überschritten wird.

Die Auswertung der Überhol szenarien in der Perspektive des überholten Lkw ergibt, dass acht von 30 Versuchsteilnehmern ihre Geschwindigkeit für einen Lkw, der maximal 2 km/h schneller fährt als sie selbst, reduzieren (Abbildung 4.2).

Fährt der überholende Lkw langsamer (Differenzgeschwindigkeit größer als 2 km/h) reduziert keiner der Teilnehmer seine Geschwindigkeit um zu kooperieren. Eine Kooperation äußert sich am häufigsten durch Ausrollen bzw. die geänderte Einstellung des Tempomaten (in 6 von 8 Fällen). Das aktive Bremsen durch Bremspedal oder Betätigung des Retarders kommt seltener (in 2 von 8 Fällen) vor.

Erhalten die Versuchsteilnehmer einen Hinweis, zeigt die Auswertung (Abbildung 4.3), dass dieser plus eine Handlungsanweisung (z.B. „*Kommender Überholvorgang, bitte Bremsen!*“) zwar zu mehr Kooperation, jedoch zu weniger Akzeptanz führt.

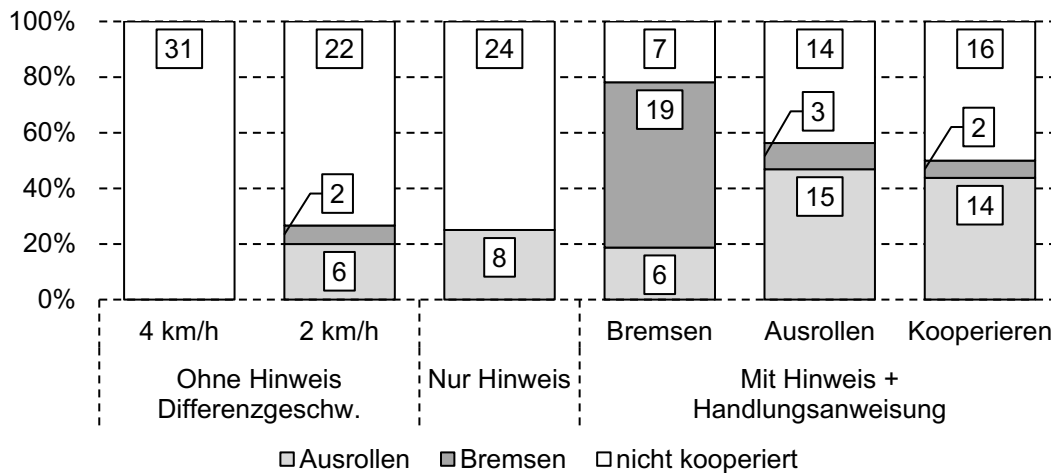


Abbildung 4.2: Anzahl der Kooperationen aufgeteilt nach Art der Kooperation in der Perspektive des Überholten

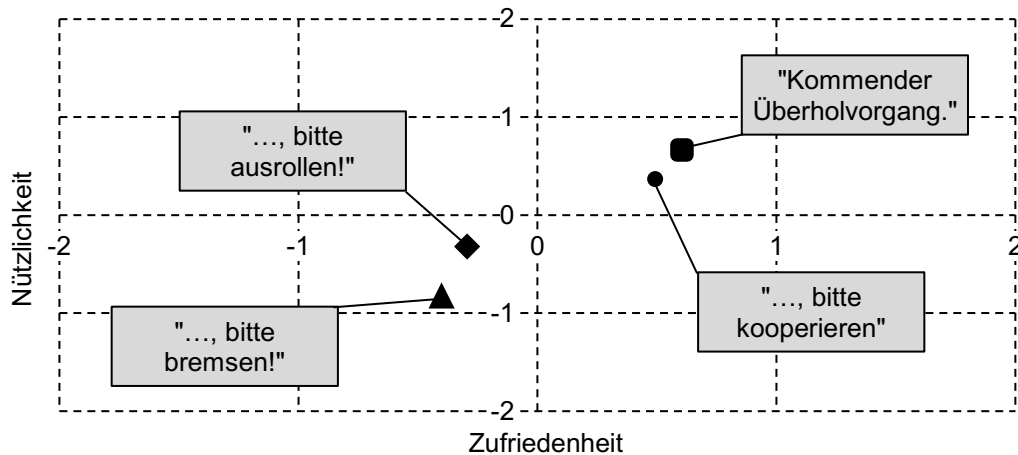


Abbildung 4.3: Nützlichkeit und Zufriedenheit-Score nach [85] für die vier Ausprägung der akustischen Hinweise

Fazit: Für Lkw-Fahrer bedeutet Kooperation bei Lkw-Überholmanövern, dass sie als Fahrer des überholten Lkw ausrollen lassen, um den überholenden Lkw zügiger vorbeizulassen. In der Perspektive des Überholenden ist ihnen die Kooperationssituation mit dem rückwärtigen Verkehr nicht bewusst: Die Daten aus der Studie zeigen, dass Lkw-Fahrer auch dann überholen, wenn der rückwärtige Verkehr stark abbremst oder behindert wird.

Aus der Perspektive des Überholten kooperiert ein kleiner Teil der Lkw-Fahrer bereits. Dies bezieht sich jedoch nur auf Überholmanövern mit einer Differenzgeschwindigkeit von höchstens 2 km/h. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass das CoDAS wegen Effizienzgründen, die Geschwindigkeit bei höheren oder niedrigeren Differenzgeschwindigkeiten für den Fahrer anpassen möchte, um eine Kooperation einzugehen. Daher ist zu untersuchen, inwieweit die HMI gestaltet werden kann, um auch bei anderen Differenzgeschwindigkeiten die beobachtete Kooperationsbereitschaft zu erzielen und die Fahrer das CoDAS nicht übersteuern. Eine Erkenntnis hierzu kann bereits diese Studie liefern: Lkw-Fahrer kooperieren eher, wenn sie eine konkrete Handlungsanweisung erhalten. Die Herausforderung in der HMI-Gestaltung wird sein, die Anweisung so zu formulieren, dass die Lkw-Fahrer diese auch akzeptieren wollen.

4.2 Befragungen zur Ermittlung der Nutzeranforderungen

Zur Ermittlung der Nutzeranforderungen werden zwei Befragungen durchgeführt. Die erste Befragung befasst sich mit den Erwartungen des Nutzers an eine HMI für ein CoDAS (Kapitel 4.2.1). Die zweite Befragung befasst sich mit den Erwartungen des Nutzers an eine vermenschlichte HMI im Lkw (Kapitel 4.2.2).

4.2.1 Befragung I: Nutzeranforderungen an eine HMI für ein CoDAS

Folgendes Kapitel fasst die Ergebnisse der Befragung zur Ermittlung der Nutzeranforderungen für eine HMI für ein CoDAS zusammen. Für eine ausführliche Beschreibung der Erhebung, Auswertung und Diskussion sei auf FANK ET AL. [191] verwiesen.

Ziel: Das Ziel der qualitativen Befragung ist es, die Akzeptanzkriterien von Lkw-Fahrern zu ermitteln und daraus Anforderungen an eine HMI für das CoDAS abzuleiten. Hierfür wird ein zweistufiges Versuchsdesign entwickelt, das sowohl Pkw- als auch Lkw-Fahrer befragt, um etwaige Unterschiede zwischen den beiden Nutzergruppen zu ermitteln.

Tabelle 4.2 zeigt die Charakteristik der beiden durchgeführten Befragungen.

Tabelle 4.2: Charakteristik der Befragung I

Stufe	Art der Befragung	Ziel(e)	Teilnehmer	Pkw / Lkw
1	Leitfadeninterview [191]	Identifizierung von Akzeptanzfaktoren	7	3 / 4
2	Online-Umfrage [191]	Qualifizierung von Akzeptanzfaktoren	76	50 / 26

Die Interviewfragen zielen auf die Identifizierung (Stufe 1 – strukturiertes Leitfadeninterview [66]) und anschließenden Qualifizierung (Stufe 2 – Online Umfrage [66]) von Akzeptanzfaktoren kooperativer Fahrerassistenzsysteme.

Methodik: Der Aufbau der Studien und die Formulierung der Interviewfragen basieren auf dem UbiTAM ([81]; Kapitel 2.2). Im strukturierten Leitfadeninterview (Stufe 1) werden Fahrer zu ihrem derzeitigen kooperativen Verhalten im Straßenverkehr sowie zur ihrer Einstellung gegenüber zukünftiger kooperativer Fahrerassistenzsysteme befragt. Die qualitative Inhaltsanalyse [248] der Antworten der befragten Fahrern resultiert in Kategorien zur Einschätzung des Ist-Zustand kooperativer Fahrmanöver und Kategorien zur Beschreibung des gewünschten Funktionsumfangs zukünftiger kooperativer Fahrerassistenz. In einer anschließenden Online-Umfrage (Stufe 2) werden Fahrer hinsichtlich der Relevanz der Ausprägungen dieser Kategorien befragt.

Ergebnisse: Der am häufigsten genannten Grund, um eine Kooperation nicht einzugehen, ist mit 71 % das schlichte Erkennen einer Kooperationsmöglichkeit, gefolgt von Sichtbedingungen mit 61 % und die Kooperation anderer mit 50 %. Die am häufigsten genannte Information, die eine HMI für ein CoDAS anzeigen sollte, ist mit 74 % der Überblick über die Verkehrssituation sowie der Abstand zum Kooperationspartner mit 74 %, gefolgt von der Handlungsabsicht des Assistenzsystems mit 63 %. Nur 8 % der Fahrer wünschen sich keine Information.

Die Auswertung der Antworten zwischen Pkw- und Lkw-Fahrer ergibt, dass sich das kooperative Fahrverhalten von Pkw- und Lkw-Fahrer unterscheidet.

Fazit: Die größte Hürde zum Eingehen einer Kooperation ist das Erkennen einer möglichen Kooperationssituation. Eine HMI sollte daher diese Information liefern und den Lkw-Fahrer dafür sensibilisieren, eine Kooperation einzugehen. Die Versuchsteilnehmer geben an, dass ihnen bei Kooperationsmanövern der Überblick über die Verkehrssituation fehlt. Gleichzeitig wünschen sie sich von einer HMI diesen Überblick. Daher sollte eine HMI für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen diesen Wunsch aufnehmen und die Kooperationspartner visualisieren.

Neben der Darstellung des Umgebungsverkehrs wünschen sich die Versuchsteilnehmer eine Vielzahl weiterer Informationen. Um jedoch den Lkw-Fahrer nicht mit dieser Vielzahl an Informationen zu überfordern ([223]; Kapitel 2.1.5), sollte die getroffene Auswahl der unbedingt erforderlichen Informationen gering gehalten werden und ist dahingehend zu prüfen, ob fehlende Informationen die Akzeptanz des Systems reduzieren.

Die Unterschiede im Kooperationsverhalten zwischen Pkw- und Lkw-Fahrer festigen die Annahme, dass die beiden Nutzergruppen in der Entwicklung einer HMI für ein CoDAS separat betrachtet werden sollten (Kapitel 3.1.1). Gestaltungslösungen aus dem Pkw-Kontext können nicht pauschal auf den Lkw-Kontext übertragen werden.

Tabelle 4.3 fasst die in dieser Studie gewonnenen Nutzungsanforderungen an die HMI für das CoDAS Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen zusammen und ergänzt diese mit den Erkenntnissen aus der Fahrsimulatorstudie (Kapitel 4.1) zur Ermittlung des Nutzungskontext.

Tabelle 4.3: Nutzungsanforderungen an die HMI für das CoDAS Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen

Anforderung	Beschreibung	Abgeleitet aus
A1	Die HMI muss den Lkw-Fahrer motivieren, nicht bzw. erst dann zu überholen, wenn das CoDAS den geeigneten Überholzeitpunkt gefunden hat	Fahrsimulatorstudie
A2	Die HMI muss den Lkw-Fahrer motivieren, auch bei höheren Differenzgeschwindigkeiten zu kooperieren	Fahrsimulatorstudie
A3	Die HMI sollte konkrete Handlungsanweisungen formulieren, die die Lkw-Fahrer auch akzeptieren	Fahrsimulatorstudie
A4	Die HMI sollte den Kooperationspartner visualisieren	Befragung I
A5	Die HMI sollte so viel Informationen wie nötig und so wenig Informationen wie möglich geben	Befragung I

4.2.2 Befragung II: Nutzeranforderungen an eine vermenschlichte HMI im Lkw

Folgendes Kapitel fasst die Ergebnisse der Befragung zu Nutzeranforderungen an eine vermenschlichte HMI in einem Lkw zusammen. Für eine ausführliche Beschreibung der Erhebung, Auswertung und Diskussion sei auf FANK ET AL. [249] verwiesen.

Ziel: Das Ziel dieser Studie ist es (Tabelle 7.1), das Potential vermenschlichter HMI im Lkw abzuschätzen. Es wird untersucht, wie die Faktoren der User Experience (Kapitel 2.2.3) Einfluss auf die Akzeptanz (Kapitel 2.2) gegenüber vermenschlichter HMI haben. Ferner Funktionalitäten, die sich Lkw-Fahrer von einer vermenschlichten HMI wünschen.

Tabelle 4.4: Charakteristik der Befragung II

Art der Befragung	Ziel(e)	Teilnehmer
Online-Umfrage [249]	<ul style="list-style-type: none"> • Qualifizierung von Akzeptanzfaktoren • Identifizierung des Funktionsumfangs 	54

Methode: Die Akzeptanz wird von dem TAM ([77]; Kapitel 2.2) abgeleitet. In diesem wird die Akzeptanz anhand des Nutzungswunsch gemessen. Die User Experience wird durch pragmatische und hedonische Attribute definiert (Kapitel 2.2.3). Der Online-Fragebogen unterteilt sich in zwei Abschnitte. Der erste Abschnitt erhebt Funktionalitäten, die sich Lkw-Fahrer von einer vermenschlichten HMI wünschen. Der zweite Abschnitt erfasst die User Experience einer vermenschlichten HMI. Als Vorlage für die verwendeten Konstrukte zur Abfrage von hedonischen und pragmatischen Attributen wird der Fragebogen nach [250] verwendet und auf den Nutzungskontext im Lkw angepasst.

Die Stichprobe setzt sich aus 54 männlichen und vier weibliche Lkw-Fahrer/innen zusammen.

Ergebnisse: Die für die Versuchsteilnehmer relevanteste Funktionalität einer vermenschlichten HMI ist es, Auskünfte zu geben (z.B. Beantwortung von Fragen, Informationen über die Verkehrssituation oder der Umgebung). Des Weiteren soll eine vermenschlichte HMI die Teilnehmer animieren (z.B. Sprache lernen, Sportübungen anleiten etc.). Weitere Funktionalitätswünsche sind die Planung von Lenk- und Ruhezeiten sowie Müdigkeitserkennung. Die Untersuchung möglicher Akzeptanzfaktoren zeigt, dass sich die Versuchsteilnehmer eine adaptierbare vermenschlichte HMI (z.B. Geschlecht, Name oder Form) wünschen. Zudem sollte ihnen die HMI Freude bereiten und ein Gemeinschaftsgefühl mit dem System vermitteln.

Fazit: Die Befragung zeigt, dass sich die Versuchsteilnehmer eine vermenschlichte HMI im Lkw grundsätzlich vorstellen können. Sie nennen eine Vielzahl an Funktionen, die die HMI leisten sollte. Ihnen ist es wichtig, dass die Interaktion sowohl auf ihre Fragen reagiert, jedoch auch selbst Fragen stellt und in einer animierenden Weise selbständig aktiv ist. Daher sollte eine vermenschlichte HMI sowohl reagieren als auch initiieren.

Die Auswertung der Befragung zeigt, dass sowohl pragmatische als auch hedonische Qualitäten mit dem Nutzungswunsch korrelieren. Im Konkreten betrifft dies die Adaptierbarkeit (pragmatisch) sowie die Freude (hedonisch) bei der Nutzung der vermenschlichten HMI. Zudem würde sich ein Gemeinschaftsgefühl (hedonisch) mit der vermenschlichten HMI positiv auf den Nutzungswunsch auswirken. In der Evaluation der vermenschlichten HMI sollten daher die drei Qualitäten Adaptierbarkeit, Freude und Gemeinschaftsgefühl berücksichtigt werden.

Tabelle 4.5 fasst die in dieser Studie gewonnenen Nutzungsanforderungen an eine vermenschlichte HMI als Fortführung von Tabelle 4.3 zusammen:

Tabelle 4.5: Nutzungsanforderungen an eine vermenschlichte HMI für den Lkw

Anforderung	Beschreibung	Abgeleitet aus
A6	Die vermenschlichte HMI sollte reagieren, als auch initiieren	Befragung II
A7	Die vermenschlichte HMI sollte adaptierbar sein	Befragung II
A8	Die vermenschlichte HMI sollte Freude bringen	Befragung II
A9	Die vermenschlichte HMI sollte ein Gemeinschaftsgefühl vermitteln	Befragung II

5 Konzeptentwicklung und Evaluation

Die Konzeptentwicklung im nutzerzentrierten Entwicklungsprozess erfolgt „[...] unter Berücksichtigung der Beschreibung des Nutzungskontexts [...], des etablierten Stands der Technik in der Anwendungsdomäne, der Richtlinien und Normen zur Gestaltung und Gebrauchstauglichkeit [...]“ [241, S. 24]. Im Folgenden wird dieses Vorgehen zur Konzeptentwicklung und Evaluation der HMI für das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen (Kapitel 5.1) und der vermenschlichte HMI im Lkw (Kapitel 5.2) vorgestellt.

5.1 HMI-Konzept für das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen

Für die Entwicklung der HMI wird basierend auf den Ergebnisse der Anforderungsanalyse (Tabelle 4.3; Kapitel 4.2.1) ein Konzept entworfen (Kapitel 5.1.1) und innerhalb zweier Fahrstudien evaluiert (Studie I – Kapitel 5.1.2 und Studie II Kapitel 5.1.3) (Abbildung 5.1). Kapitel 5.1.4 zeigt das resultierende Konzept der HMI.

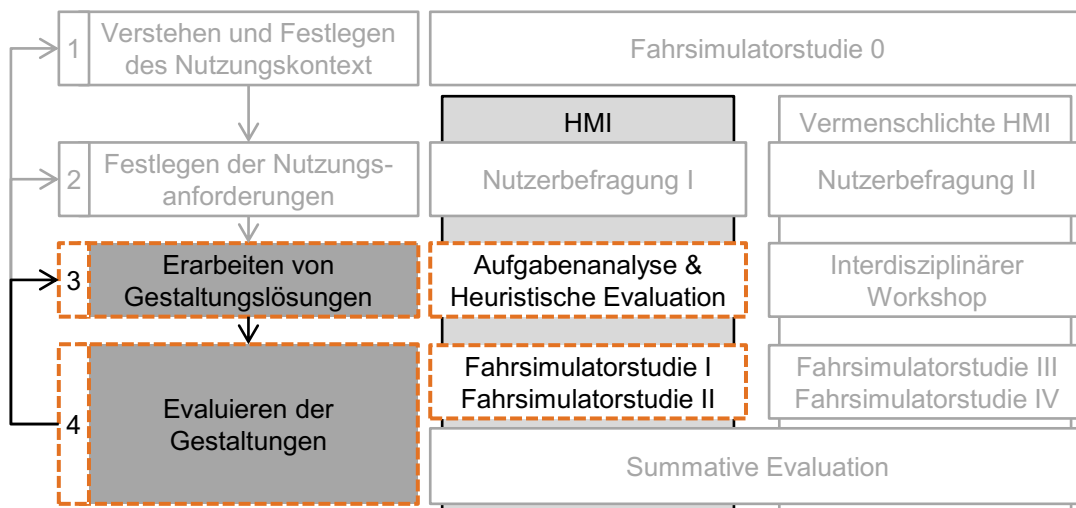


Abbildung 5.1: Durchgeführte Studien im nutzerzentrierten Entwicklungsprozess zur Entwicklung des HMI-Konzepts für das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen

5.1.1 Konzeptentwurf

Folgendes Kapitel fasst den Konzeptentwurf der HMI für das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen zusammen. Für eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise und dem Ergebnis sei auf FANK ET AL. [251] verwiesen.

Ziel: Das Ziel dieses Konzeptentwurfs ist die Entwicklung des Prototyp 1.0. Der Entwurf gliedert sich in zwei Stufen (Tabelle 7.1):

Tabelle 5.1: Charakteristik des Konzeptentwurfs für die HMI des CoDAS

Stufe	Art der Studie	Ziel(e)	Teilnehmer (Expertise)
1	Aufgabenanalyse [251]	<ul style="list-style-type: none"> • Kategorisierung des Informationsinhalts • Identifizierung des Zeitpunkts der Informationsdarstellung 	3 (Lkw-Fahrer)
2	Heuristische Evaluation [251]	Überprüfung auf mögliche Verletzungen gängiger Interaktionsprinzipien	5 (HMI-Entwickler)

In Stufe 1 wird eine Aufgabenanalyse [252] des Lkw-Überholmanöver unter Nutzung des CoDAS durchgeführt. Ziel ist die Gestaltung der gemeinsamen Wissensbasis der Kooperationspartner (Kapitel 2.5.1). Es werden die in der Anforderungsanalyse gewonnenen Informationsinhalte (Kapitel 4.2.1) kategorisiert und der Zeitpunkt derer Darstellung im HMI identifiziert.

In Stufe 2 werden die Ergebnisse aus Stufe 1 in einen ersten Papierentwurf überführt und mittels heuristischer Evaluation [253] auf mögliche Verletzungen gängiger Interaktionsprinzipien (Kapitel 2.2.2) untersucht.

Methode: Die HMI hat zur Aufgabe, den Fahrer durch die zehn Phasen eines kooperativen Lkw-Überholmanövers auf Autobahnen [32] zu begleiten. Basierend auf den Gestaltungsempfehlungen früherer Arbeiten ([175, 210]; Kapitel 2.5.1) soll eine Aufgabenanalyse die relevanten Informationen in jeder Phase ermitteln. Als Methode wird das Card-Sorting Verfahren [254] gewählt. Lkw-Fahrer sollen die aus der Anforderungsanalyse (Kapitel 4.2.1) ermittelten gewünschten Informationsinhalte (Karten) den jeweiligen Phasen eines kooperativen Lkw-Überholmanövers zuordnen und kategorisieren. Die Ergebnisse aus der Aufgabenanalyse werden unter Berücksichtigung der Interaktionsprinzipien nach DIN EN ISO 9241-110 ([101]; (Kapitel 2.2.2)) in Storyboards und Skizzen [255] überführt. Diese werden im zweiten Schritt von HMI-Experten aus der Forschung und Industrie evaluiert. Hierzu wird ihnen die Funktionalität des CoDAS erläutert und die verschiedenen Zustände der HMI gezeigt. Innerhalb einer heuristischen Evaluation mittels Thinking-Aloud Methode [256] wird der Entwurf von den Experten hinsichtlich der Interaktionsprinzipien nach [101] analysiert.

Ergebnisse: Die Aufgabenanalyse mittels Card-Sorting Methode resultiert in fünf Informationskategorien:

- Aktivierung (System an/ aus)
- Status (z.B. Kooperation bestätigt)
- Anweisung (z.B. Spurwechsel!)
- Anfrage (z.B. Kooperationsanfrage senden)
- Kooperationspartner (Abstand, Geschwindigkeit, Leistungsgewicht)

Tabelle 5.2 zeigt die Kategorien (Status, Anweisung und Anfrage) und die von den Lkw-Fahrern eingeordneten Informationen in den jeweiligen Zuständen (Nr. 1 – 10) des Überholmanövers. Informationen der Kategorie Kooperationspartner und Aktivierung sind zu jedem Zustand sichtbar und aufgrund der Übersicht nicht dargestellt.

Tabelle 5.2: Zehn Zustände von kooperativen Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen, mit den entsprechenden Informationen in jedem Zustand (A = Überholender; B = Überholter)

Nr.	Zustand	Status	Anweisung	Anfrage
1	Solo			
2	Initialisierung	(A) Suchen		
3	Planung	(A) Initialisiert (A) & (B) Anfrage		(A) Anfrage senden? (B) Kooperieren?
4	Annäherung	(A) & (B) Bestätigt		
5	Abstand sichern (pre)	(A) In xy m Spurwechsel (A) & (B) v anpassen		
6	Spurwechsel (zu 2)		(A) Spurwechsel!	
7	Vorbeifahren	(A) In xy m Spurwechsel (A) & (B) v anpassen		
8	Spurwechsel (zu 1)		(B) Spurwechsel!	
9	Abstand sichern (post)	(B) Beschleunigen		
10	Ende	(A) & (B) Beendet		

Für jeden Zustand des Lkw-Überholmanövers wird ein Zustand der HMI-Anzeige im Instrumentencluster skizziert (Anhang B). Die Darstellungsform der Informationsinhalte orientiert sich an den HMI-Konzepten aus dem Stand der Wissenschaft (Kapitel 2.6). Die heuristische Evaluation des Entwurfs durch die Experten deckt drei Verletzungen der Interaktionsprinzipien auf: Aufgabenangemessenheit, Erwartungskonformität und Selbstbeschreibungsfähigkeit.

Fazit: Die Ergebnisse ermöglichen den Entwurf des Prototyp 1.0. Eine graphische Nutzer Oberfläche (GUI), die das Instrumentencluster hinter dem Lenkrad abbildet. Abbildung 5.2 zeigt die fertige GUI, die durch eine Ok-Taste auf dem Multifunktionslenkrad bedient werden kann.

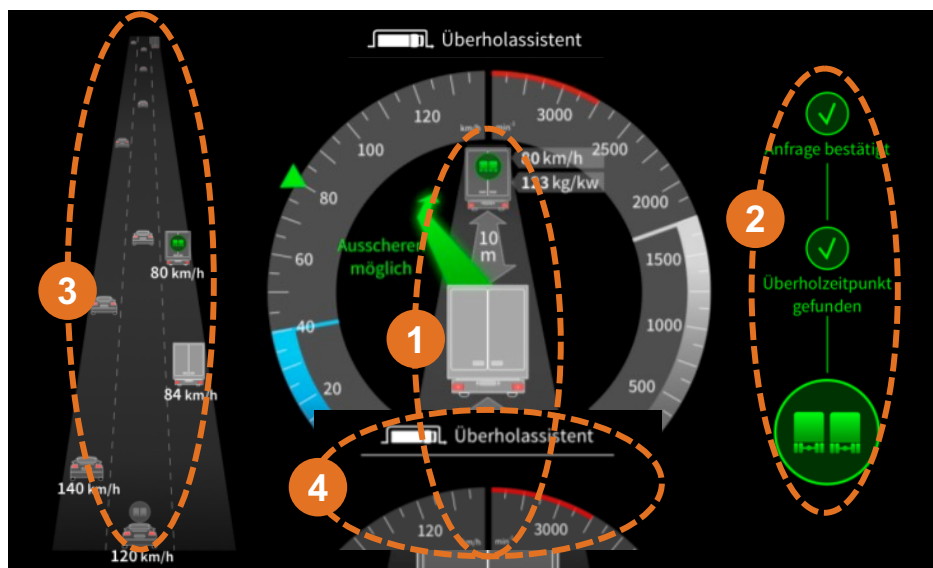


Abbildung 5.2: GUI des HMI-Konzepts Prototyp 1.0 mit den vier Informationsbereiche (Ausschnitt zeigt alle Informationen simultan)

5.1.2 Studie I: Evaluation Prototyp 1.0

Folgendes Kapitel fasst die Fahrsimulatorstudie zur Evaluierung des HMI-Prototypen 1.0 für das CoDAS zusammen. Für eine ausführliche Beschreibung der Erhebung, Auswertung und Diskussion sei auf FANK ET AL. [251] verwiesen.

Ziel: Das Ziel dieser Fahrsimulatorstudie ist es, erstmals dem Lkw-Fahrer die entwickelte HMI (Prototyp 1.0) vorzustellen und zu evaluieren (Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Charakteristik der Fahrsimulatorstudie I

Studie	Ziel(e)	Teilnehmer / Überhol szenarien	Perspektiven / HMI-Varianten	Untersuchungs- variablen
Fahrsimulator- studie I [251]	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation des Prototyp 1.0 • Visualisierung der Kooperationspartner • Automation der Zustimmung zur Kooperation 	31 / 5	2 / 4	Erfolgsquote, Akzeptanz, Usability, Vertrauen, Blickdaten

Für die Etablierung einer gemeinsame Wissensbasis der Kooperationspartner (Kapitel 2.5.1.) wird eine geeignete Visualisierung gesucht. Dieses Ziel adressiert Anforderung A4 und A5 aus der Anforderungsanalyse (Tabelle 4.3; Kapitel 4.2.1).

Für den Abstimmungsprozess zwischen den Kooperationspartners (Kapitel 2.5.2) wird die Automation der Zustimmung zur Kooperation untersucht. Dieses Ziel adressiert Anforderung A3 und A5 aus der Anforderungsanalyse (Tabelle 4.3; Kapitel 4.2.1).

Methodik: Es wird eine Studie mit Berufskraftfahrern am dynamische Lkw-Fahrsimulator des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der technischen Universität München durchgeführt (Kapitel 3.3.2; Abbildung 3.3). Die Versuchsteilnehmer werden in der Fahrsimulation mit 5 Überhol szenarien konfrontiert (2 in der Perspektive des Überholenden; 3 in der Perspektive des Überholten).

In der Perspektive Überholenden werden zwei HMI-Varianten getestet, die sich anhand der Visualisierung des Kooperationspartners unterscheiden. Der Kooperationspartner wird in Variante 1 dynamisch angezeigt (Informationsbereich 3 in Abbildung 5.2). In Variante 2 wird der Kooperationspartner ausschließlich statisch angezeigt (Informationsbereich 1 in Abbildung 5.2). Zusätzlich wird eine Fahrt absolviert, in der keine HMI angezeigt wird.

In der Perspektive des Überholten werden ebenso zwei HMI-Varianten getestet, die sich anhand der Automation der Zustimmung zur Kooperation unterscheiden. In der Variante 1 wird an den Überholten eine Überholanfrage gesendet (Informationsbereich 4 in Abbildung 5.2), die der Fahrer manuell zustimmen muss. In der Variante 2 kooperiert das CoDAS automatisch und der Fahrer wird über diese Kooperation von der HMI lediglich informiert. Zusätzlich wird eine Fahrt absolviert, in der das CoDAS automatisch kooperiert ohne eine Anzeige an Informationen.

Als objektive Messgröße werden Fahrdaten (Geschwindigkeit, Beschleunigung etc.) und das Blickverhalten (u.a. Mittelwert der Blickabwendungszeiten von der Windschutzscheibe) erhoben. Als subjektive Maße werden die wahrgenommene Akzeptanz durch den VAN DER LAAN Fragebogen ([85]; Kapitel 2.2), die Usability durch die System Usability Scale (SUS; [257]) und das Vertrauen durch den Trust-Scale Fragebogen von JIAN ET AL. [258] erhoben.

Die Stichprobe setzt sich aus 29 männlichen und zwei weiblichen Lkw-Fahrer/innen zusammen.

Ergebnisse: Die Evaluation des Prototyp 1.0 zeigt in der Perspektive des Überholenden, dass 37 % bzw. 38 % aller Überholmanöver von den Versuchsteilnehmern kooperativ durchgeführt werden (Abbildung 5.3).

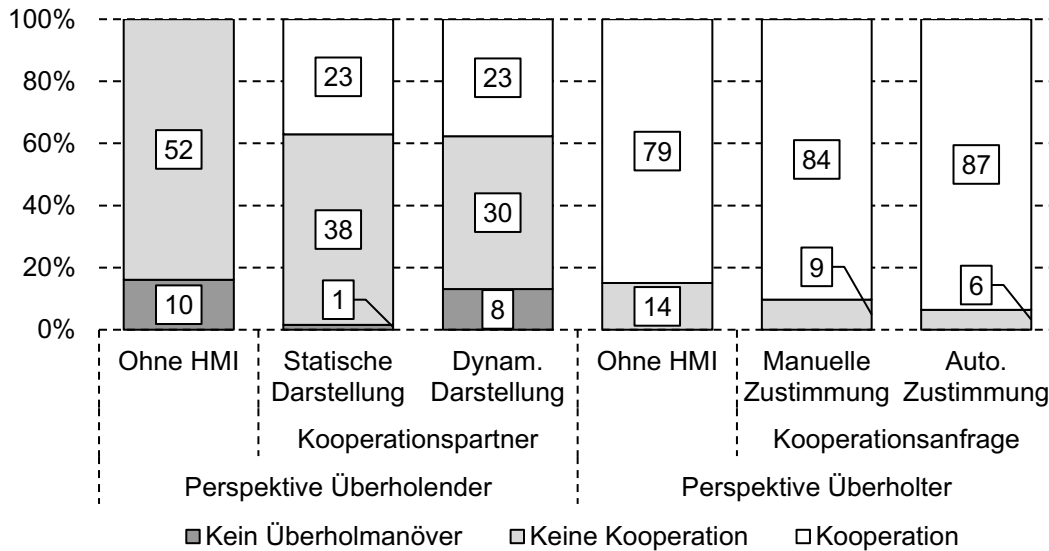


Abbildung 5.3: Anzahl an kooperativer Lkw-Überholmanöver in den Perspektiven Überholenden und Überholter

In den anderen Fällen werden die Kooperation oder das Überholmanöver ganz abgebrochen. Der Abbruch kommt entweder in Zustand 3 Planung (70 %) oder 4 Annäherung (30 %) (Tabelle 5.2; Spalte 1) vor.

Die subjektive Bewertung der Usability spiegelt die hohe Anzahl an Abbrüchen wider. Der SUS-Score liegt mit 66 bzw. 70 von 100 möglichen Punkten im grenzwertigen Bereich (nach [259]; Abbildung 5.4).

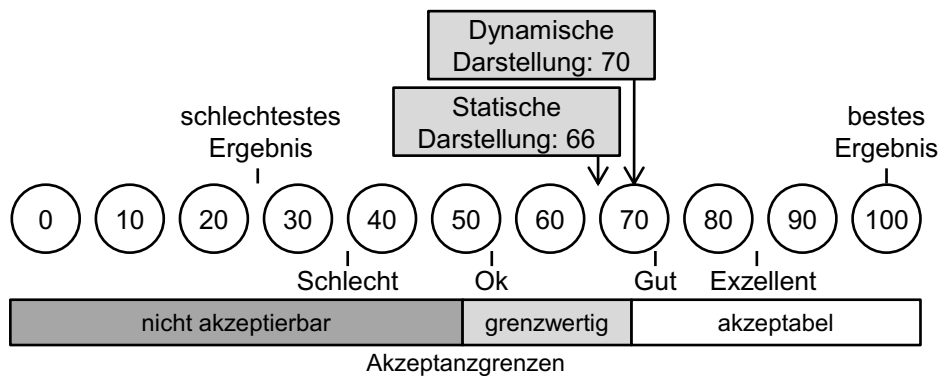


Abbildung 5.4: Wahrgenommene Usability der zwei HMI-Varianten in der Perspektive des Überholenden nach der Unterteilung von [259]

Die Evaluation der Visualisierung des Kooperationspartners ergibt, dass die dynamische Darstellung des Kooperationspartners keinen Einfluss auf die Erfolgsquote kooperativer Lkw-Überholmanöver, die Usability, das Vertrauen und die Akzeptanz hat. Die Auswertung der Blickdaten (nach [260–262]) zeigt jedoch eine höhere Ablenkung der Versuchsteilnehmer durch die dynamische Anzeige.

Die Evaluation der Automation der Zustimmung zur Kooperation in der Perspektive des Überholten zeigt (Abbildung 5.5), dass die Versuchsteilnehmer selbst der Kooperation zustimmen wollen. Die Erfolgsquote kooperativer Lkw-Überholmanöver zeigt (Abbildung 5.3), dass das System auch dann nicht übersteuert wird, wenn die Versuchsteilnehmer keine Informationen oder Rückmeldungen über die HMI erhalten.

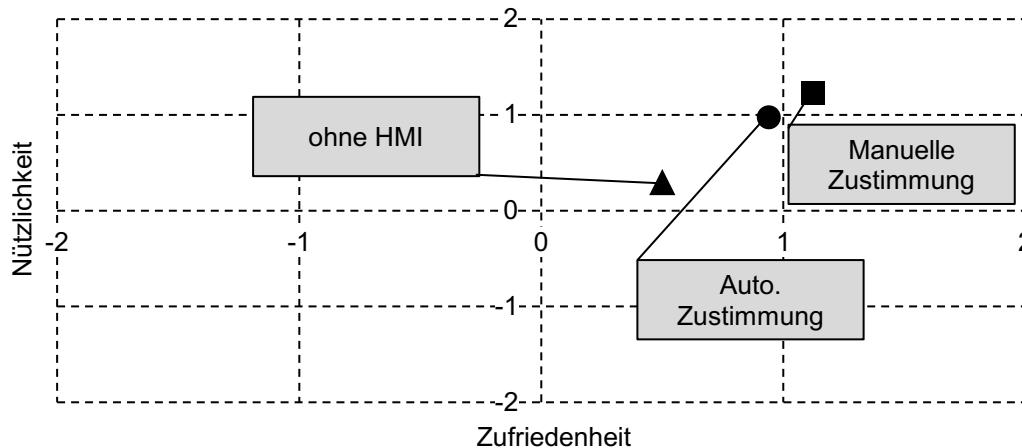


Abbildung 5.5: Nützlichkeits- und Zufriedenheits-Score nach [85] für die zwei Varianten der HMI in der Perspektive des Überholten im Vergleich zu keiner Information über eine HMI

Fazit: In der Perspektive des Überholenden führt die Dialoggestaltung der HMI vermehrt zum Abbruch. Die Versuchsteilnehmer scheren frühzeitig aus, also überholen, auch wenn die HMI ihnen vorgibt noch zu warten. Die Anforderung A1 (Tabelle 4.3; Kapitel 4.2.1) wird mit Prototyp 1.0 somit nicht erfüllt. Es bedarf einer Überarbeitung der Dialoggestaltung in den Zuständen 3 Planung und 4 Annäherung (Anforderung A4; Tabelle 4.3; Kapitel 4.2.1), um Bedienfehler als Grund für das frühzeitige Ausscheren auszuschließen.

Die dynamische Anzeige der Kooperationspartner hat keinen Einfluss auf das Vertrauen oder die Usability. Die Auswertung der Blickdaten zeigt, dass die dynamische Anzeige die Versuchsteilnehmer vom Verkehrsgeschehen ablenken. Daher soll im Prototyp 2.0 die statische Darstellung des Kooperationspartners verwendet werden.

Die Auswertung der Akzeptanzwerte der HMI-Varianten in der Perspektive des Überholten zeigen, dass die Versuchsteilnehmer es bevorzugen, in die Systemscheidung miteingebunden zu werden. Eine automatische Zustimmung oder gar keine Informationen über die Kooperation haben jedoch keine Auswirkungen auf die Erfolgsquote zur Kooperation. Im weiteren Verlauf der Entwicklung sollte untersucht werden, inwieweit die HMI-Varianten bei höhere Differenzgeschwindigkeiten zwischen den Lkw ähnliche Ergebnisse liefern (vgl. Anforderung A2; Tabelle 4.3; Kapitel 4.2.1)

Nach der Interpretation der Ergebnisse aus Studie I, wird der Prototyp 1.0 überarbeitet und in einen Prototypen 2.0 überführt (Abbildung 5.6). Studie I evaluiert die HMI unter Idealbedingungen ohne mögliche Abbruchsszenarien. In Studie II soll der Prototyp 2.0 nun unter Abbruchsszenarien getestet werden. Daher werden zusätzlich drei weitere Zustände der HMI hinzugefügt. Diese visualisieren bei Kooperationsabbrüchen die Gründe für einen Abbruch:

- Kooperationspartner, z.B. Kooperationspartner übersteuert
- Systemausfall, z.B. durch Verbindungs- oder Sensorausfall
- Umgebungsverkehr, z.B. Fahrzeug ohne CoDAS involviert

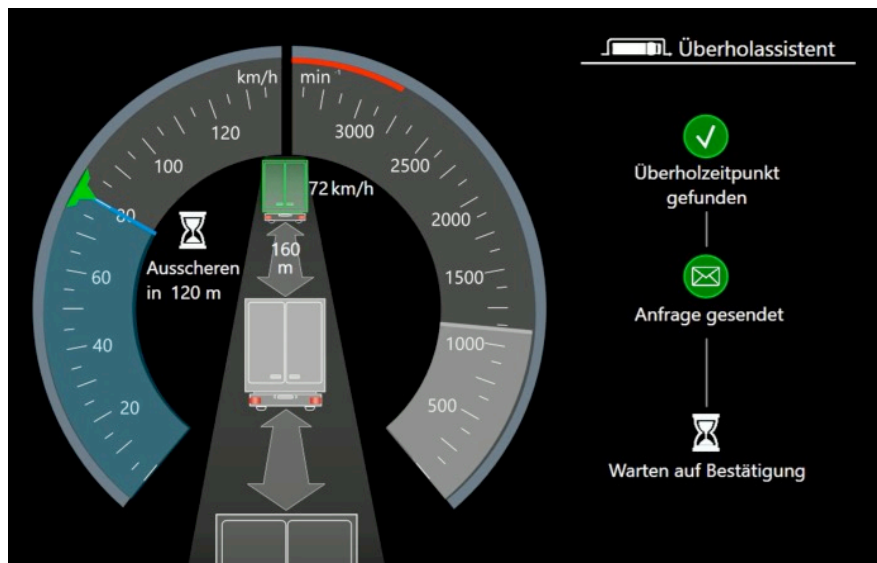


Abbildung 5.6: GUI des HMI-Konzepts Prototyp 2.0 (Ausschnitt zeigt alle Informationen simultan)

5.1.3 Studie II: Evaluation Prototyp 2.0

Folgendes Kapitel fasst die Fahrsimulatorstudie zur Evaluierung des HMI-Prototyp 2.0 zusammen. Für eine ausführliche Beschreibung der Erhebung, Auswertung und Diskussion sei auf FANK ET AL. [263] verwiesen.

Ziel: Ziel dieser Fahrsimulatorstudie ist, den Prototyp 2.0 von Lkw-Fahrern evaluieren zu lassen (Tabelle 5.4).

Tabelle 5.4: Charakteristik der Fahrsimulatorstudie II

Studie	Ziel(e)	Teilnehmer / Überhol szenarien	Perspektiven / HMI-Varianten	Untersuchungsvariablen
Fahrsimulatorstudie II [263]	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation des Prototyp 2.0 • Automation des Kooperationsstarts • Visualisierung des Kooperationsabbruch • Bestimmung der Kritikalität von Kooperationsabbrüchen 	30 / 6	1 / 4	Erfolgsquote, Akzeptanz, Usability, Vertrauen, Kritikalität, Situationsbewusstsein

Für den Abstimmungsprozess zwischen den Kooperationspartnern (Kapitel 2.5.2) wird die Automation des Kooperationsstarts untersucht. Dieses Ziel adressiert Anforderung A5 aus der Anforderungsanalyse (Tabelle 4.3; Kapitel 4.2.1). Für die gemeinsame Wissensbasis der Kooperationspartner (Kapitel 2.5.1.) wird eine geeignete Visualisierung im Fall eines Kooperationsabbruchs gesucht. Dieses Ziel adressiert ebenfalls Anforderung A5 aus der Anforderungsanalyse (Tabelle 4.3; Kapitel 4.2.1). Ferner wird untersucht, welche Auswirkungen ein Kooperationsabbruch auf die Fahrsituation hat und wie kritisch dieser von Lkw-Fahrern wahrgenommen wird.

Methodik: Es wird eine Studie mit Berufskraftfahrern am dynamische Lkw-Fahrsimulator des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der technischen Universität München durchgeführt (Kapitel 3.3.2; Abbildung 3.3). Die Versuchsteilnehmer werden in der Fahrsimulation mit 6 Überholzenarien in der Perspektive des Überholenden konfrontiert (2 ohne Kooperationsabbrüchen; 4 mit Kooperationsabbrüchen).

In den Fahrten ohne Kooperationsabbrüchen werden zwei HMI-Varianten getestet, die sich anhand der Automation des Kooperationsstarts unterscheiden. Nachdem das CoDAS eine geeignete Überholstelle gefunden hat, gibt die HMI dem Versuchsteilnehmer eine Rückmeldung. Der Versuchsteilnehmer hat in der Variante 1 die Möglichkeit durch das Multifunktionslenkrad die Kooperation manuell zu starten. Die HMI gibt dem Fahrer anschließend Informationen über den Fortschritt der Kooperation. In der Variante 2 startet das CoDAS nachdem es eine geeignete Überholstelle gefunden hat, die Kooperation automatisch. Die HMI gibt dem Fahrer auch hier Informationen über den Fortschritt der Kooperation.

In den Fahrten mit Kooperationsabbrüchen werden ebenfalls zwei HMI-Varianten getestet. In Variante 1 zeigt die HMI bei Abbruchsituationen den Grund des Kooperationsabbruchs durch ein Symbol an. In Variante 2 zeigt die HMI den Grund des Abbruchs durch ein Symbol und Erklärungstext an.

Als objektive Messgröße werden Fahrdaten (Geschwindigkeit, Beschleunigung etc.) und das Fahrverhalten während Kooperationsabbrüchen erhoben. Als subjektive Maße werden die wahrgenommene Akzeptanz durch den VAN DER LAAN Fragebogen ([85]; Kapitel 2.2), die Usability durch den SUS-Fragebogen [257] und das Vertrauen durch den Trust-Scale Fragebogen [258] erhoben. Außerdem werden die Versuchsteilnehmer dazu befragt, wie kritisch sie die jeweilige Abbruchsituation empfinden. Hierfür wird die Kritikalitätskala nach NEUKUM ET AL. [264] erhoben.

Ergebnisse: Die Anzahl an kooperativer Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen ist im Vergleich zu Studie I (Kapitel 5.1.2) gestiegen (Abbildung 5.7).

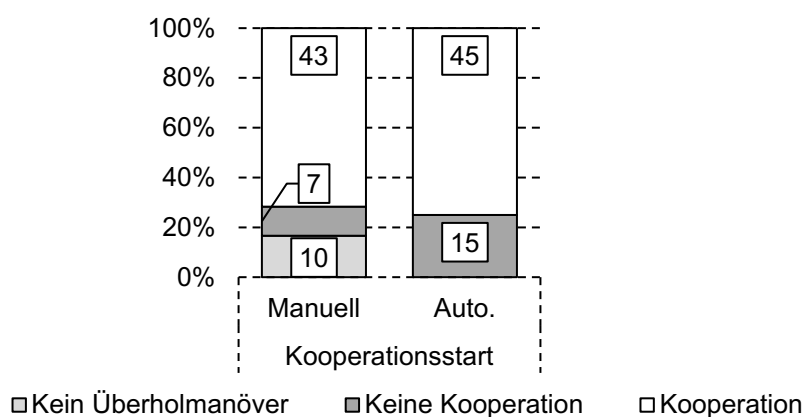


Abbildung 5.7: Anzahl an kooperativer Lkw-Überholmanöver der HMI-Varianten zur Untersuchung des Kooperationsstarts

In einem Viertel der Fälle brechen die Versuchsteilnehmer durch ein zu frühes Ausscheren im Zustand 4 Annähern die Kooperation ab. In Zustand 3 Planung kommt es zu keinem Abbruch.

Der SUS-Wert des Prototyp 2.0 erreicht mit über 85 Punkten einen exzellenten Wert (nach [259]; Abbildung 5.8). Die Usability des automatischen Kooperationsstarts wird mit 89 Punkten besser im Vergleich zum manuellen Kooperationsstarts bewertet.

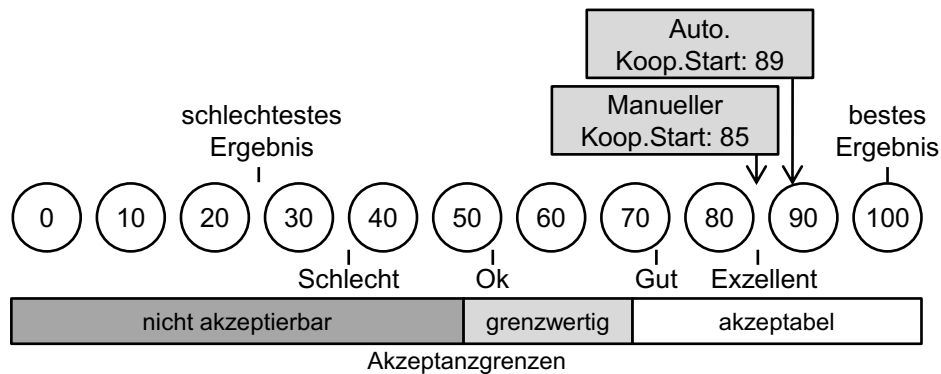


Abbildung 5.8: Wahrgenommene Usability der HMI-Varianten zur Untersuchung des Kooperationsstarts nach der Unterteilung von [259]

Die Kritikalität von Kooperationsabbrüchen wird von den Versuchsteilnehmern niedrig bis mittel eingestuft (nach [264]). Es werden keine Unterschiede in der Bewertung der Kritikalität zwischen den zwei HMI-Varianten ermittelt. Vertrauen, Akzeptanz, sowie Situationsbewusstsein unterscheiden sich ebenfalls nicht zwischen den Varianten.

Während Abbruchsituationen kommt es zu keinen Unfällen oder kritischen Fahrmanövern. Entweder der Versuchsteilnehmer bricht das Überholmanöver ab oder die Überholmanöver dauern länger als 45 s Sekunden.

Fazit: Die Dialoggestaltung der HMI in Zustand 4 Annähern führt weiterhin zu Kooperationsabbrüchen. Hier bedarf es für den finalen Prototypen (Prototyp 3.0) weitere Verbesserungen der Dialoggestaltung und Handlungsanweisung.

Ein Erklärungstext für Gründe von Kooperationsabbrüchen ergibt in dieser Studie keinen Mehrwert. Daher wird für den Prototyp 3.0 auf den Erklärungstext verzichtet, um die Beanspruchung gering zu halten (Kapitel 2.1.5). Dies entspricht der Anforderung A5 aus der Anforderungsanalyse (Tabelle 4.3; Kapitel 4.2.1).

5.1.4 Resultierendes HMI-Konzept

Für den Prototyp 3.0 werden die Ergebnisse der Studie I und II konsolidiert. Unter Berücksichtigung der Gestaltungsprinzipien DIN EN ISO 9241-110 [101] und den anfangs formulierten Nutzeranforderungen A1-A5 (Tabelle 4.3; Kapitel 4.2.1) werden u.a. folgende Verbesserungen umgesetzt:

- **Selbstbeschreibungsfähigkeit:** Da es in beiden Studien in Zustand 4 Annähern zu Kooperationsabbrüchen kommt (Anforderung A1), wird die Gestaltung des Informationsinhalts (Anforderung A5) in diesem Zustand überarbeitet (Abbildung 5.9) und die Dialoggestaltung denen von HMI-Konzepten aus dem Stand der Wissenschaft angepasst (z.B. Spurhalteassistent; Kapitel 2.6). Um eine Transparenz bzgl. der eigenen Kosten der Kooperation zu schaffen, wird die Hysterese (Kapitel 2.4.4) innerhalb derer die Geschwindigkeit angepasst wird, visualisiert.
- **Erwartungskonformität:** Neben der Überarbeitung des Informationsinhalts in Zustand 4 wird, die Position des Status und der Handlungsanweisungen angepasst. Die verteilte Darstellung in den Bereichen 1 und 2 (Abbildung 5.2) wird ausschließlich in den Bereich 2 verschoben.

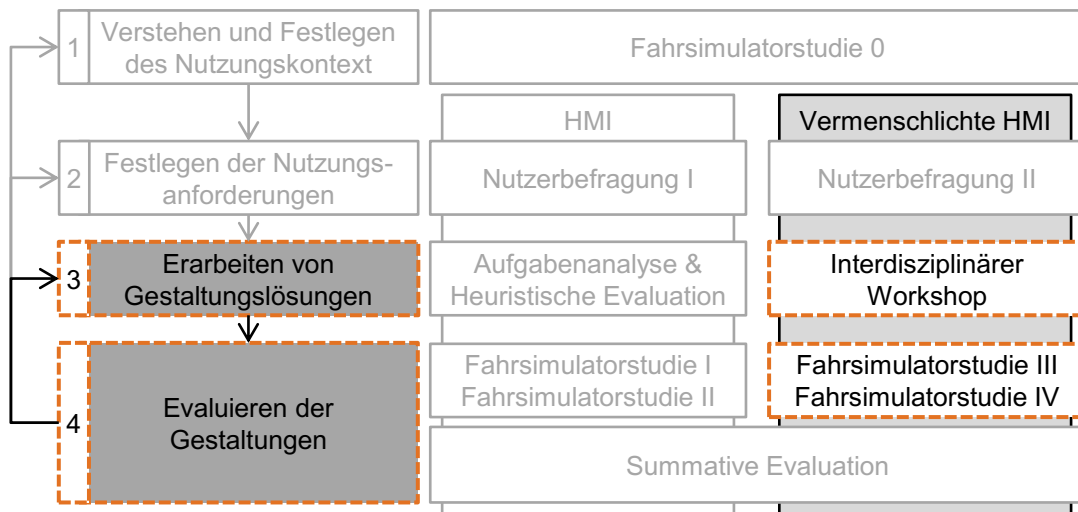


Abbildung 5.10: Durchgeführte Studien im nutzerzentrierten Entwicklungsprozess zur Entwicklung des vermenschlichten HMI-Konzepts im Lkw

5.2.1 Konzeptentwurf

Folgendes Kapitel fasst den Konzeptentwurf einer vermenschlichte HMI für Lkw zusammen. Für eine ausführliche Begründung der Vorgehensweise sei auf FANK ET AL. [110] verwiesen. Für die detaillierte Beschreibung der Funktion und Entwicklung des Konzepts sei auf FANK ET AL. [265] verwiesen.

Ziel: Das Ziel dieses Konzeptentwurfs ist die Entwicklung des Prototyp 1.0 einer vermenschlichten HMI im Lkw (Tabelle 7.1). Es sollen mögliche Formen einer vermenschlichten HMI gesammelt und in ein Konzept überführt werden.

Tabelle 5.5: Charakteristik des Konzeptentwurfs für die vermenschlichte HMI im Lkw

Art der Studie	Ziel(e)	Teilnehmer (Expertise)
Interdisziplinärer Workshop [110]	<ul style="list-style-type: none"> Identifizierung möglicher Formen einer vermenschlichten HMI im Lkw Konzeptentwicklung für eine vermenschlichte HMI im Lkw 	4 (Entwickler aus den Bereichen: soziale Robotik, HMI im Lkw, Design Thinking)

Methode: Für den Konzeptentwurf einer vermenschlichten HMI im Lkw wird ein interdisziplinärer Workshop [266] durchgeführt. Die Vermenschlichung im Lkw ist eine neue Form der HMI-Gestaltung. Daher sollen in diesem Workshop Entwickler, die bereits in der Mensch-Roboter Interaktion Erfahrungen mit Vermenschlichung sammeln konnten, auf HMI-Entwickler aus dem Lkw-Bereich treffen. So können sie gegenseitig von ihrem Wissen profitieren und innovative Gestaltungslösungen für eine vermenschlichte HMI im Lkw finden. Die Grundidee stammt aus dem Design-Thinking Ansatz [267]. Basierend auf einer aus dem Nutzungskontext abgeleiteten Problemstellung werden so viele Lösungsideen wie möglich generiert [268], sortiert und gruppiert, um anschließend einen ersten Prototyp zu konzipieren [266].

An dem Workshop nehmen vier Experten teil: Zwei Teilnehmer sind Experten aus dem Bereich soziale Robotik. Ein Teilnehmer ist Experte im Bereich Fahrer-Fahrzeug Interaktion im Lkw und ein Teilnehmer ist Experte in der Design-Thinking Entwicklung.

Die Teilnehmer versetzen sich mittels Personas unterschiedlicher Lkw-Typen [11, 66], Fotos und zukunftsgerichteten Aussagen und Zitate von Lkw-Fahrern in die Rolle des Lkw-Fahrers. Von diesem Standpunkt aus werden mittels Brainstorming [268] so viele Ideen wie möglich für eine vermenschlichte HMI gesammelt und auf eine Ideen-Pool Wand gepinnt ([269]; Abbildung 5.11).



Abbildung 5.11: Bilder vom interdisziplinären Workshop: links pinnen Teilnehmer ihre Ideen an die Ideen-Pool Wand, rechts eine Skizze und ein ausgefüllter Ideensteckbrief

In der letzten Phase des Workshops folgt die Konzeptentwicklung, die auf Ideensteckbriefen ([268]; Abbildung 5.11) festgehalten werden.

Ergebnisse: Der Workshop resultiert in zwei Konzepten: (1) einem vermenschlichten Lkw und (2) einem menschenähnlichen Assistenten, der den Lkw-Fahrer zum und im Lkw begleitet. Alle drei Parteien: vermenschlichter Lkw, menschenähnlicher Assistent und Fahrer können miteinander kommunizieren. Der vermenschlichte Lkw wird als Sprachassistent realisiert. Der menschenähnliche Assistent kann Sprach-, virtueller oder Roboter Assistent sein.

Fazit: Für den Konzeptentwurf einer vermenschlichten HMI im Lkw wird das Konzept des menschenähnlichen Assistenten gewählt: ICo – the Intelligent Co-Driver for Truck Drivers. Dieses Konzept gibt Raum für die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher menschlichen Charakteristiken auf das Fahrverhalten und die Fahrer-Fahrzeug Interaktion.

ICo ist ein persönlicher Assistent, der den Lkw-Fahrer begleitet. Wie von den Lkw-Fahrern gewünscht (Anforderung A 6; Kapitel 4.2.2; Tabelle 4.5) reagiert er auf Fragen des Fahrers. Er initiiert von sich aus Unterhaltungen, indem er den Fahrer auf die aktuelle Verkehrssituation, Verkehrsregeln oder mögliche Fahrmanöver hinweist, die Ruhe- und Lenkzeiten plant oder anderweitig sozial interagiert (z.B. Small Talk). Er spricht mit dem Fahrer in Ich bzw. Wir-Form und erzeugt damit ein Gemeinschaftsgefühl (Anforderung A 9, Kapitel 4.2.2; Tabelle 4.5).

Die Software von ICo ist modular aufgebaut, sodass in der Evaluation schnell und einfach die Form der Vermenschlichung verändert werden kann. Hierfür wird ICo innerhalb eines Robot Operating System (ROS) Framework [270] aufgebaut und programmiert. ICo wird aus drei wesentlichen Komponenten zusammengesetzt (Tabelle 5.6; Abbildung 5.12).

Je nachdem welche Form ICo annehmen soll (Sprachassistent, virtueller Assistent oder Roboter), werden die entsprechenden Komponenten verwendet. Die visuelle Darstellung des Gesichts ist bewusst auf die Augen reduziert. Indem auf weitere vermenschlichende Merkmale verzichtet wird, kann die Wirkung der Augen auf den Nutzer besser ermittelt werden [273, 274]. Zudem sollen etwaige Unstimmigkeiten innerhalb der Synchronisation des Mundes und der Sprache vermieden werden, damit die Akzeptanz von ICo nicht durch den Uncanny Valley Effekt [124] reduziert wird.

Tabelle 5.6: Technische Komponente des vermenschlichten HMI-Konzepts

Nr	Komponente	Beschreibung
1	Sprachsynthese	Eine emotionale Sprachsynthese von CereProc [271] gibt ICo seine Stimme.
2	HTML-Webseite	Eine selbst-programmierte HTML Webseite, angezeigt auf einem Tablet, animiert das Gesicht von ICo.
3	Pan-/Tilt Plattform	Eine, von einem Mikrokontroller (ArbotiX [272]) angesteuerte Pan-/ Tilt Plattform, bewegt den Kopf (Tablet Halterung) von ICo in zwei Freiheitsgrade.

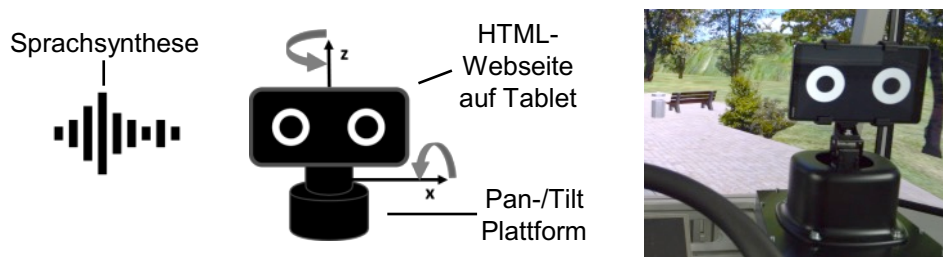


Abbildung 5.12: Komponenten der vermenschlichten HMI; links die Skizze und rechts die Umsetzung von ICo

Die Gestaltung der Animationen (Augen- und Kopfbewegung) ist angelehnt an bereits untersuchten Konzepten aus dem Stand der Wissenschaft [156, 275, 276].

Die Entwicklung der künstlichen Intelligenz hinter ICo ist nicht Teil dieser Arbeit (Kapitel 3.1.2). Um jedoch die Auswirkungen der künstlichen Intelligenz messen zu können, wird die Wizard-of-Oz [277] Methode verwendet. In dieser Methode wird die Intelligenz hinter der Technologie von einem Menschen vorgetäuscht [278]. Die Versuchsteilnehmer sind der Annahme, sie kommunizieren mit der Technologie, tatsächlich interagieren sie jedoch mit einem Menschen (Wizard). Hierfür wird ein Versuchsaufbau entwickelt, der es dem Versuchsleiter ermöglicht, ICo nicht sichtbar für den Versuchsteilnehmer zu bedienen. Der Versuchsleiter folgt einem Skript aus vordefinierten Aussagen. Zusätzlich steht ihm eine Eingabemaske zur Verfügung, mit der er ICo sprechen lassen und bewegen kann (Schematischer Aufbau des Wizard of Oz Framework in ROS; Anhang D; Abbildung D.1).

5.2.2 Studie III: Evaluation der menschlichen Charakteristiken Identität & Emotion

Folgendes Kapitel fasst die Fahrsimulatorstudie zur Evaluierung der menschlichen Charakteristiken Identität und Emotion als Form der Vermenschlichung einer HMI zusammen. Für eine ausführliche Beschreibung der Erhebung, Auswertung und Diskussion sei auf FANK ET AL. [279] verwiesen.

Ziel: Das Ziel dieser Studie ist es, erstmals dem Lkw-Fahrer eine vermenschlichte HMI vorzustellen und dessen Akzeptanz gegenüber einer solchen Schnittstelle zu messen (Tabelle 5.7). Zudem wird getestet, inwieweit die Kooperationsbereitschaft durch Vermenschlichung erhöht werden kann.

Tabelle 5.7: Charakteristik der Fahrsimulatorstudie III

Studie	Ziel(e)	Teilnehmer / Überhol szenarien	Perspektiven / HMI-Varianten	Untersuchungs- variablen
Fahrsimulator- studie III [279]	Evaluation der mensch- lichen Charakteristiken Identität und Emotion	30 / 3	1 / 2	Erfolgsquote, Akzeptanz, Vertrauen

Methode: Es wird eine Studie mit Berufskraftfahrern am dynamische Lkw-Fahrsimulator des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der technischen Universität München durchgeführt (Kapitel 3.3.2; Abbildung 3.3). Die Versuchsteilnehmer werden in der Fahrsimulation mit 3 Überhol szenarien in der Perspektive des Überholten konfrontiert. Durch die Überhol szenarien werden sie von dem Prototyp 1.0 (Kapitel 5.1.1) geführt.

Es werden zwei vermenschlichte HMI-Varianten getestet. Die Variante 1 ist ein gewöhnlicher Sprachassistent. Die Variante 2 ist ICo als Sprachassistent. Beide Assistenten stellen den Versuchsteilnehmer die Kooperationsanfrage, kommentierten den Überholprozess und erinnern den Fahrer, eine Kooperationsentscheidung zu treffen. Der Unterschied der beiden Sprachassistenten ist die menschliche Charakteristik von ICo. ICo hat eine Identität (spricht in Ich-Form) und die Sprachsynthese ist emotionalisiert: durch Sprachgesten und Tonfall wird Freude oder Ärger des Assistenten vermittelt. Tabelle 5.8 zeigt Beispiele für Sprachprompts der zwei Sprachassistenten.

Tabelle 5.8: Beispiele für Sprachprompts des Sprachassistenten und ICo im Vergleich

Sprachprompts	Sprachassistent	ICo
Aktivierung	„Sprachassistent aktiviert.“	„Hallo, mein Name ist ICo. Ich werde dich heute begleiten.“
Bestätigung der Überholanfrage	„Überholanfrage akzeptiert Geschwindigkeit wird reduziert.“	„Woohoo! Ok – ich reduziere die Geschwindigkeit!“
Ende der Kooperation	„Die Kooperation ist erfolgreich beendet.“	„Super! Die Kooperation war erfolgreich.“

Als objektive Messgröße werden Fahrdaten (Geschwindigkeit, Beschleunigung etc.) und als subjektive Maße die wahrgenommene Akzeptanz durch den VAN DER LAAN Fragebogen ([85]; Kapitel 2.2) und das Vertrauen durch den Trust-Scale Fragebogen [258] erhoben. Zusätzlich werden die Versuchsteilnehmer gebeten die Menschenähnlichkeit der beiden Sprachassistenten mittels einer 7-Punkt Likert-Skala [280] zu bewerten sowie den für sie präferierten Sprachassistenten zu nennen.

Ergebnisse: Das Kooperationsverhalten der Versuchsteilnehmer unterscheidet sich zwischen den zwei Sprachassistenten nicht. Die Akzeptanz und das Vertrauen werden für beide Sprachassistenten gleich bewertet. 64 % der Versuchsteilnehmer präferieren ICo als Sprachassistenten. ICo wird von den Versuchsteilnehmer menschlicher als der reine Sprachassistent wahrgenommen.

Fazit: In dieser Studie hat die Vermenschlichung durch Identität und Emotionen nicht zu einer höheren, aber auch nicht zu einer niedrigeren Kooperationsbereitschaft geführt. Die Versuchsteilnehmer geben an, neugierig gewesen zu sein, was ICo macht, wenn sie nicht seiner Aufforderung entgegenkamen. Die Vermutung liegt nahe, dass durch eine Kennenlernphase

bzw. einer längeren Testfahrt das Kooperationsverhalten sich verändert. Daher werden in der nächsten Studie längere Fahrten mit ICo absolviert.

Die Akzeptanz und das Vertrauen werden durch die Vermenschlichung nicht verändert. Diese zwei Qualitäten erklären somit nicht den höheren Nutzungswunsch. In der nächsten Studie soll die User Experience mit erhoben werden (Anforderung A 8; Kapitel 4.2.2; Tabelle 4.5), um ein mögliches Unterscheidungsmerkmal zwischen den Varianten zu erheben und damit den höheren Nutzungswunsch zu erklären.

5.2.3 Studie IV: Evaluation der menschlichen Charakteristiken Mimik & Gestik

Folgendes Kapitel fasst die Fahrsimulatorstudie zur Evaluierung der menschlichen Charakteristiken Mimik und Gestik zusammen. Für eine ausführliche Beschreibung der Erhebung, Auswertung und Diskussion sei auf FANK ET AL. [265] verwiesen.

Ziel: Das Ziel dieser Studie ist es, Mimik und Gestik als weitere Form der Vermenschlichung im Lkw zu evaluieren (Tabelle 5.9).

Tabelle 5.9: Charakteristik der Fahrsimulatorstudie IV

Studie	Ziel(e)	Teilnehmer / Überhol szenarien	Perspektiven / HMI-Varianten	Untersuchungs- variablen
Fahrsimulator- studie IV [265]	Evaluation der menschlichen Charakteristiken Mimik und Gestik	40 / 5	2 / 3	Erfolgsquote, Akzeptanz, User Experience, Spurhalte güte

Methode: Es wird eine Studie mit Berufskraftfahrern an der dynamischen Sitzkiste des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der technischen Universität München durchgeführt (Kapitel 3.3.2; Abbildung 3.4). Die Versuchsteilnehmer werden in der Fahrsimulation mit 5 Überhol szenarien konfrontiert (2 Perspektive Überholenden; 3 Perspektive Überholten). Die Überhol szenarien in der Perspektive des Überholten unterscheidet sich anhand der Differenzgeschwindigkeit zwischen den Lkw (2 km/h vs. 4 km/h)

Es werden drei vermenschlichte HMI-Konzepte getestet, die sich anhand der hinzugefügten menschlichen Charakteristiken Mimik und Gestik unterscheiden:

- ICo als Sprachassistent (Komponente 1; Tabelle 7.1; Kapitel 5.2.1)
- ICo als virtueller Assistent – mit Mimik (Komp. 1 und 2; Tabelle 7.1; Kapitel 5.2.1)
- ICo als Roboter Assistent – mit Mimik und Gestik (Komp. 1, 2 und 3; Tabelle 7.1; Kapitel 5.2.1)

Basierend auf den Ergebnissen der Studie III sollen in dieser Fahrsimulatorstudie die Lkw-Fahrer länger mit dem Assistenten interagieren können. Daher werden mehr Interaktionsmöglichkeiten mit ICo vorgesehen (Kapitel 5.2.1).

Als objektive Messgröße werden Fahrdaten (Geschwindigkeit, Beschleunigung etc.) und die Interaktion der Versuchsteilnehmer mit ICo mittels Videokamera aufgenommen. Die auf Video aufgenommenen Interaktionen werden transkribiert und die Anzahl an Interaktionen, die zwischen ICo und den Versuchsteilnehmern stattfinden, gezählt. Unterschieden wird zwischen

aktiver und passiver Interaktion. Aktive Interaktion bedeutet, dass ICo die Interaktion startet und passiv, dass der Versuchsteilnehmer die Interaktion startet. Die wahrgenommene Akzeptanz wird mit den Qualitäten Adaptierbarkeit, Gemeinschaftsgefühl und Freude aus der Befragung II ([250]; Kapitel 4.2.2) gemessen, um etwaige Unterschiede in diesen Kategorien zwischen den Formen von ICo zu erheben. Die User Experience wird mit dem Fragebogen AttrakDiff mini [281] und mit dem Self-Assessment Manikin (SAM; [282]) Fragebogen erhoben. SAM misst die Emotionen vor und nach einer Interaktion, um Rückschlüsse über Veränderungen in der User Experience wahrzunehmen. Zusätzlich werden als Kontrollvariablen der situative Anthropomorphismus (Kapitel 2.3.1) mit der Anthropomorphismus Skala der Godspeed Questionnaire Series (GQS) [283] und die wahrgenommene Verkörperung des Assistenten mit dem EmCorbScale [284] erhoben.

Ergebnisse: In den Überholmanövern mit 2 km/h Differenzgeschwindigkeit kann die vermenschlichte HMI die Kooperationsbereitschaft erhöhen (Abbildung 5.13). Es wird kein Unterschied zwischen ICo als Sprach- oder ICo als virtueller bzw. Roboter-Assistent gemessen. Bei Überholmanövern mit 4 km/h Differenzgeschwindigkeit wird kein Effekt gemessen.

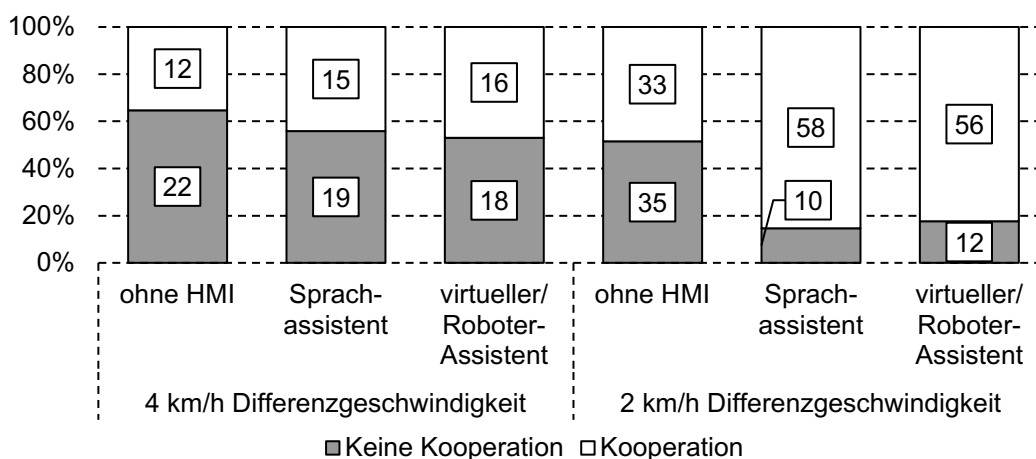


Abbildung 5.13: Durchschnittliche Anzahl an Kooperationen

Die Spurhaltegröße wird durch die Anwesenheit von ICo besser. Es wird ebenfalls kein Unterschied zwischen ICo als Sprach- oder ICo als virtueller bzw. Roboter-Assistent gemessen.

Die Akzeptanz zwischen den hinzugefügten menschlichen Charakteristiken unterscheidet sich nicht: Alle drei Qualitäten: Adaptierbarkeit, Freude und Gemeinschaftsgefühl werden zwischen ICo als Sprachassistent, virtueller und Roboter Assistent gleich hoch bewertet.

Die wahrgenommene User Experience der Versuchsteilnehmer unterscheidet sich nicht zwischen den drei Formen von ICo.

Die Anzahl an Interaktionen (Abbildung 5.14) mit ICo als virtueller bzw. Roboter Assistent ist signifikant höher als mit dem Sprachassistent.

Es zeigt sich zudem ein Unterschied zwischen dem virtuellen- und Roboter Assistent. Die Versuchsteilnehmer beginnen eher eine Unterhaltung, wenn ICo keine Gestik zeigt.

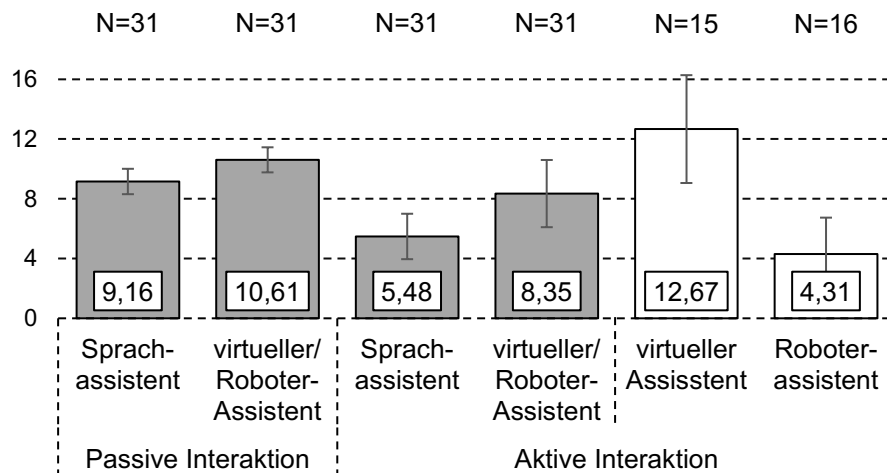


Abbildung 5.14: Durchschnittliche Anzahl an Interaktionen mit ICo (N = Anzahl an Versuchsteilnehmer)

Fazit: Die Ergebnisse zeigen, dass eine vermenschlichte HMI die Kooperationsbereitschaft bei Überholmanövern auf Autobahnen in der Perspektive des Überholten steigern kann. Dies trifft jedoch nur für Lkw-Überholmanöver mit einer Differenzgeschwindigkeit von 2 km/h zu, nicht bei einer Differenzgeschwindigkeit von 4 km/h. Wie bereits in früheren Studien (Kapitel 4.1) beobachtet, sehen Lkw-Fahrer womöglich keine Notwendigkeit bei höheren Differenzgeschwindigkeiten zu kooperieren, weil das Überholmanöver aus ihrer Sicht ausreichend schnell durchgeführt wird.

Die vermenschlichte HMI hat einen positiven Einfluss auf die Fahrperformanz der Versuchsteilnehmer. Die gemessene Spurhaltegröße der Versuchsteilnehmer ist höher, wenn ICo mit ihnen kommuniziert. Es ist zu vermuten, dass die Versuchsteilnehmer durch die Interaktion weniger in die Monotonie der Fahraufgabe verfallen [164].

Die Auswertung der geführten Interaktionen zeigt, dass die Versuchsteilnehmer eher mit dem virtuellen Assistenten kommunizieren, weshalb in dem finalen vermenschlichten HMI-Konzept die Komponenten 1 und 2 (Tabelle 7.1; Kapitel 5.2.1) verwendet werden und auf die Gestik in Form von Bewegungen der Plan-Tilt Plattform (Komponente 3; Tabelle 7.1; Kapitel 5.2.1) verzichtet wird.

5.2.4 Resultierendes vermenschlichtes HMI-Konzept

Für die finale Form der Vermenschlichung, die in der summativen Evaluation (Kapitel 6) verwendet wird, werden die Ergebnisse der Studie III und IV nochmals konsolidiert. Unter Berücksichtigung der anfangs formulierten Nutzeranforderungen A6-A9 (Kapitel 4.2.2; Tabelle 4.5) werden folgende Verbesserungen bzw. Gestaltlösungen umgesetzt:

- **Auswahl der verwendeten menschlichen Charakteristiken:** Studie III zeigt, dass die Identität und Emotionen als Transmitter für Menschlichkeit von den Lkw-Fahrern wahrgenommen werden – damit werden Ergebnisse aus anderen Disziplinen (u.a. [123, 152]) bestätigt. Zudem zeigt Studie III, dass Lkw-Fahrer eine HMI, die diese Eigenschaften besitzt, eher nutzen wollen. Daher wird für das finale Konzept der vermenschlichten HMI im Lkw, die menschlichen Charakteristiken Identität und Emotion gewählt.

Studie IV sollte untersuchen, ob sich diese Effekte durch Gestik und Mimik verstärken lassen. Dies ist nicht der Fall, jedoch sind die Lkw-Fahrer durch Mimik animierter mit der HMI zu interagieren. Daher wird die Mimik als weitere menschliche Charakteristik dem finalen HMI-Konzept hinzugefügt.

- **Überarbeitung der Animationen:** Die visuelle Darstellung der Emotionen wird überarbeitet, sodass diese eindeutiger interpretierbar sind. Dies wird u.a. durch die Darstellung der Augenbrauen erreicht [285, 286].

ICo wird ein weiterer Zustand hinzugefügt. Der Zustand „schlafend“ soll dem Lkw-Fahrer Rückmeldung geben, dass ICo ansprechbar ist. Gleichzeitig soll ihm nicht das Gefühl gegeben werden, dass dieser ihn während der Fahrt beobachtet. Die Animation des Zustands orientiert sich an den Arbeiten von COHN ET AL. [287–289].

Die finalen Zustände von ICo sind im Anhang E zu finden. Abbildung 5.15 zeigt exemplarisch den Zustand zwinkernd bei einer erfolgreich durchgeführten Kooperation.



Abbildung 5.15: Resultierende Version des vermenschlichten HMI-Konzepts

6 Summative Evaluation

Auszüge der summativen Evaluation wurden bereits in der Abschlusspräsentation [290] und im Abschlussbericht [291] des Forschungsprojekts IMAGinE veröffentlicht.

Die summative Evaluation soll einen möglichen zusätzlichen Nutzen der vermenschlichten HMI auf die Kooperationsbereitschaft der Lkw-Fahrer während Überholmanöver und der Fahrer-Fahrzeug Interaktion ermitteln. Die Studie überprüft die finale Erfüllung der Nutzeranforderungen (Kapitel 4.2) gemäß dem nutzerzentrierten Entwicklungsprozess [241] (Abbildung 6.1).

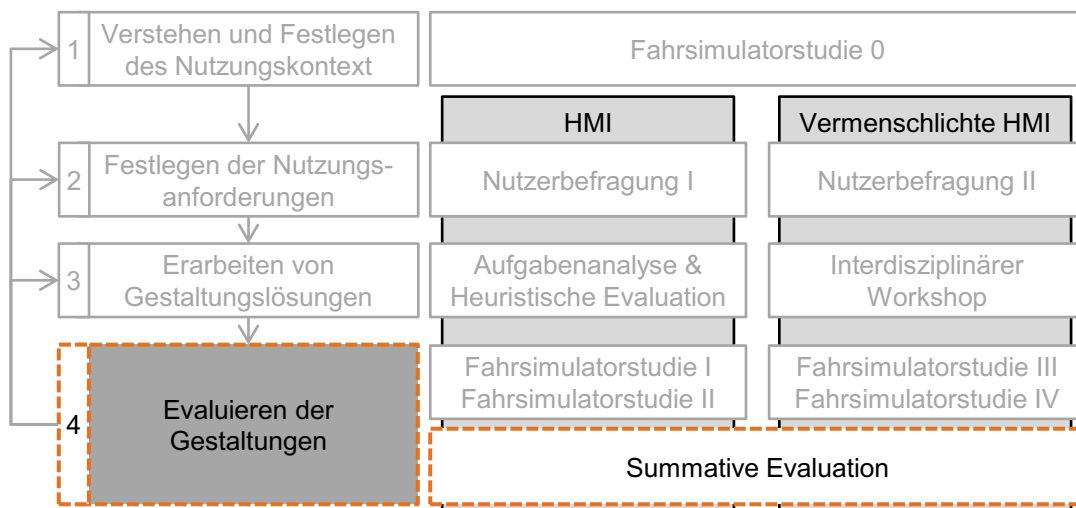


Abbildung 6.1: Einordnung der Summativen Evaluation im nutzerzentrierten Entwicklungsprozess

Hierzu wird eine Fahrsimulatorstudie am dynamischen Lkw-Fahrsimulator durchgeführt (Kapitel 3.3.2). Die Versuchsteilnehmer erleben in der Fahrsimulation die Perspektive des Überholenden und Überholten und erhalten hierbei die Unterstützung der in Kapitel 5 entwickelten HMI.

Im Folgenden wird auf die genaue Zielsetzung, Fragestellung und Methodik eingegangen, um anschließend die Ergebnisse darzustellen und zu diskutieren.

6.1 Zielsetzung und Fragestellung

Die Zielsetzung und Fragestellung der summativen Evaluation unterteilt sich in die zwei Untersuchungsbereiche: Kooperatives Fahrverhalten (Kapitel 6.1.1) und Qualitäten der HMI (Kapitel 6.1.2). Es wird untersucht, inwieweit die entwickelten HMI-Konzepte den Lkw-Fahrer motivieren, kooperatives Fahrverhalten mit Hilfe eines CoDAS zuzustimmen und diese

umzusetzen. Um einen zusätzlichen Nutzen durch die Vermenschlichung der HMI zu identifizieren, werden die Qualitäten der zwei HMI-Konzepten erhoben und miteinander verglichen.

6.1.1 Kooperatives Fahrverhalten

Die bisherigen Untersuchungen (Kapitel 4.1, Kapitel 5.1.2 und Kapitel 5.1.3) zeigen in der Perspektive des Überholten eine Steigerung der Kooperationsrate durch Optimierungen des HMI-Konzepts (Prototyp 1.0 und Prototyp 2.0) von 27 % auf 94 % (Abbildung 6.2). In der Perspektive des Überholenden wird in der Studie II eine Kooperationsrate von 75 % erreicht.

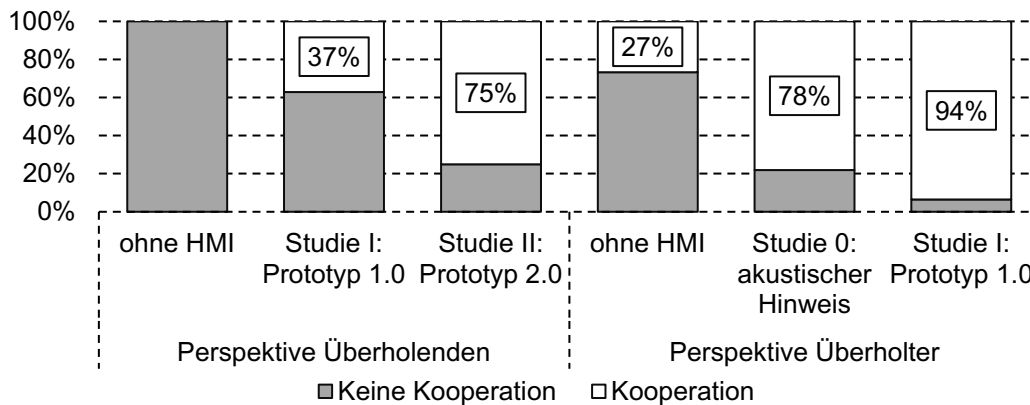


Abbildung 6.2: Erreichte Kooperationsrate über die Iterationsschritte des nutzerzentrierten Entwicklungsprozesses für das HMI-Konzept ohne Vermenschlichung

Die Untersuchungen zum Einfluss menschlicher Charakteristiken führt in Studie IV (Mimik & Gestik) im Vergleich zur Studie III (Identität & Emotion) zu einer Steigerung der Kooperationsrate in der Perspektive des Überholten von 80 % auf 85 % (Abbildung 6.3).

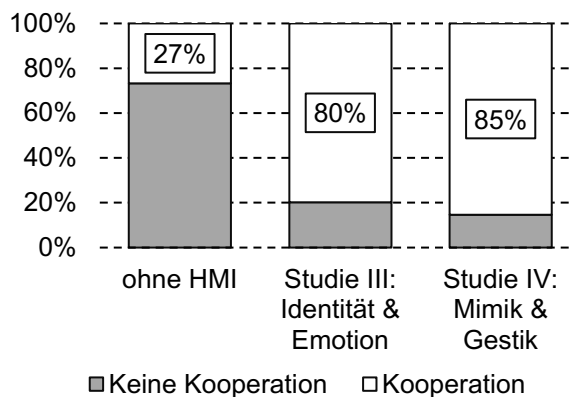


Abbildung 6.3: Erreichte Kooperationsrate über die Iterationsschritte des nutzerzentrierten Entwicklungsprozesses für eine vermenschlichte HMI

Auswirkungen der vermenschlichten HMI auf die Kooperationsbereitschaft der Lkw-Fahrer in der Überholenden-Perspektive sind bisher nicht betrachtet. Die summative Evaluation untersucht abschließend eine weitere mögliche Steigerung der Kooperationsrate durch die finalen HMI-Konzepte (Prototyp 3.0 Kapitel 5.1.4 und ICo Kapitel 5.2.4).

Das kooperative Fahrverhalten wird quantitativ nach den von MERTENS ET AL. [32] definierten Aufgaben des CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen gemessen (Kapitel 2.4.4):

- Reduzierung der Überholdauer auf < 45s
- Auswahl geeigneter Überholstelle
- Absichern eines verringerten Sicherheitsabstands
- Anpassung der Geschwindigkeit

Die detaillierten Fragestellungen und daraus abgeleitete Hypothesen zu kooperatives Fahrverhalten können Tabelle 6.1 entnommen werden:

Tabelle 6.1: Fragestellungen und abgeleitete Hypothesen bezüglich der Kooperationsbereitschaft
Kodierung Fragestellung und abgeleitete Hypothesen

Kodierung	Fragestellung und abgeleitete Hypothesen
F3.HMI	Wie wirkt sich die Nutzung einer HMI bei Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen auf die Kooperationsbereitschaft von Lkw-Fahrern aus?
H1	Die Nutzung einer HMI steigert kooperative Handlungen
H0	Die Nutzung einer HMI steigert kooperative Handlungen nicht
F3.VHMI	Wie wirkt sich die zusätzliche Nutzung einer vermenschlichten HMI bei Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen auf die Kooperationsbereitschaft von Lkw-Fahrern aus?
H1	Die zusätzlich vermenschlichte HMI steigert kooperative Handlungen
H0	Die zusätzlich vermenschlichte HMI steigert kooperative Handlungen nicht

6.1.2 Qualitäten der HMI

Die Qualität der HMI wird anhand der Akzeptanz (Kapitel 2.2), Vertrauen (Kapitel 2.2.1), Usability (Kapitel 2.2.2) und User Experience (Kapitel 2.2.3) gemessen:

Die Akzeptanz (Fragestellung F4.A; Tabelle 6.2) entspricht dem Nutzungswunsch des Lkw-Fahrers gegenüber dem CoDAS und ist damit Voraussetzung für die erfolgreiche Nutzung (Kapitel 2.2).

Tabelle 6.2: Fragestellungen und abgeleitete Hypothesen bezüglich der Usability

Kodierung	Fragestellung und abgeleitete Hypothesen
F4.A	Wie verändert sich die Akzeptanz (Nützlichkeit/ Zufriedenheit) durch Vermenschlichung?
H1	Die Vermenschlichung steigert die wahrgenommene Nützlichkeit
H0 ₁	Die Vermenschlichung steigert die wahrgenommene Nützlichkeit nicht
H2	Die Vermenschlichung steigert die wahrgenommene Zufriedenheit
H0 ₂	Die Vermenschlichung steigert die wahrgenommene Zufriedenheit nicht

Das Vertrauen (Fragestellung F4.V; Tabelle 6.3) kann durch die HMI beeinflusst werden und bestimmt wie der Lkw-Fahrer mit dem System interagiert (Kapitel 2.2.1). In dieser Studie wird ein möglicher Effekt der Vermenschlichung auf das Vertrauen gemessen.

Tabelle 6.3: Fragestellungen und abgeleitete Hypothesen bezüglich des Vertrauens

Kodierung	Fragestellung und abgeleitete Hypothesen
F4.V	Wie verändert sich das Vertrauen durch Vermenschlichung?
H1	Die Vermenschlichung steigert das Vertrauen
H0	Die Vermenschlichung steigert nicht das Vertrauen

Die Usability (Fragestellung F4.B; Tabelle 6.4) hat direkte Auswirkungen auf die Akzeptanz und damit den Nutzungswunsch der Lkw-Fahrer gegenüber dem CoDAS (Kapitel 2.2.2). Durch die nutzerzentrierte Entwicklung der beiden HMI-Konzepte unter Berücksichtigung des mentalen Modells (Kapitel 2.1.4) des Lkw-Fahrers, sollen grundlegende Bedienfehler vermieden werden.

Tabelle 6.4: Fragestellungen und abgeleitete Hypothesen bezüglich der Usability

Kodierung	Fragestellung und abgeleitete Hypothesen
F4.B	Wie verändert sich die Usability durch Vermenschlichung?
H1	Die Vermenschlichung steigert die Usability
H0	Die Vermenschlichung steigert nicht die Usability

Die User Experience (Fragestellung F4.UX; Tabelle 6.5) umfasst die Wahrnehmungen und Reaktionen während und nach der Nutzung des CoDAS (Kapitel 2.2.3). In Studie III präferieren mehr als die Hälfte der Versuchsteilnehmer eine vermenschlichte HMI (Kapitel 5.2.2). Die Ergebnisse zeigen, dass dies nicht anhand der Qualitäten Vertrauen oder Akzeptanz festgemacht werden kann. Die Befragung II zeigt, dass der Nutzungswunsch der Lkw-Fahrer, eine vermenschlichte HMI zu verwenden von hedonischen Qualitäten wie z.B. Freude, abhängt (Kapitel 4.2.2). Daher wird die User Experience für den Vergleich der beiden ausgearbeiteten HMI-Konzepte untersucht:

Tabelle 6.5: Fragestellungen und abgeleitete Hypothesen bezüglich der User Experience

Kodierung	Fragestellung und abgeleitete Hypothesen
F4.UX	Wie verändert sich die User Experience (pragmatische/ hedonische Qualität) durch Vermenschlichung?
H1	Die Vermenschlichung steigert die pragmatische Qualität
H0 ₁	Die Vermenschlichung steigert nicht die pragmatische Qualität
H2	Die Vermenschlichung steigert die hedonische Qualität
H0 ₂	Die Vermenschlichung steigert nicht die hedonische Qualität

6.2 Methodik

Nachfolgend werden die für diese Studie relevanten Methoden und Designelemente beschrieben.

6.2.1 Versuchsaufbau

Für die summative Evaluation steht der dynamische Lkw-Fahrsimulator des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München zur Verfügung (Kapitel 3.3.2). Für die Fahrsimulation wird die Software SILAB © 5 des Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH verwendet.

Die in Kapitel 5.1.4 finalisierte GUI des HMI-Konzepts wird auf einem 1920 x 720 TFT Display im Instrumentencluster hinter dem Multifunktionslenkrad angezeigt (siehe Abbildung 6.4). Die GUI wird über Eventpunkte in der Fahrsimulation (z.B. Bahnmarkierungen, Streckenabschnitte, etc.) sowie durch Fahrerinput (z.B. Eingabe am Multifunktionslenkrad, Gaspedalstellung, etc.) gesteuert.



Abbildung 6.4: Innenansicht des Lkw-Fahrerarbeitsplatz für die summativen Evaluation

Das in Kapitel 5.2.4 finalisierte vermenschlichte HMI-Konzept ICo wird auf einem 10,8 Zoll Tablet dargestellt. Die Halterung des Tablets befindet sich auf der Höhe des Sekundärdisplays in der Mittelkonsole (Abbildung 6.4). Die Ansteuerung des vermenschlichten Assistenten erfolgt, wie die der HMI, über die Fahrsimulation und den Fahrerinput. Zusätzlich ermöglicht das Wizard-of-Oz Setup (Kapitel 5.2.3) dem Versuchsleiter, auf Aussagen der Versuchsteilnehmer individuell und passend zu reagieren. Hierfür steht dem Versuchsleiter eine grafische Oberfläche sowie ein Sprachleitfaden zur Verfügung, der die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Versuchsleitern und -teilnehmern gewährleisten soll.

6.2.2 Studiendesign

Das Studiendesign beinhaltet die drei Bedingungen Baseline, HMI, HMI + ICo. Demnach erleben die in der Studie beteiligten Lkw-Fahrer alle drei Bedingungen hintereinander (Within-Subject Design). In der Baseline-Bedingung fahren die Versuchsteilnehmer Überholmanöver in den beiden Perspektiven, Überholenden und Überholten, ohne Unterstützung durch ein CoDAS bzw. einer HMI. Ihnen steht nur die funktionale und visuelle Unterstützung eines Abstandstem-pomat zur Verfügung. In der HMI-Bedingung erhalten die Versuchsteilnehmer in den zwei Perspektiven des Überholmanövers Unterstützung, durch die in Kapitel 5.1.4 beschriebene HMI. In der HMI + ICo-Bedingung steht ihnen zusätzlich, die in Kapitel 5.2.4 entwickelte vermensch-

lichte HMI ICo zur Seite. Für die abschließende Bewertung der Hypothesen werden die Bedingungen Baseline, HMI und HMI + ICo miteinander verglichen. Um eine Gefährdung der Validität durch z.B. Störvariablen, Lerneffekte, etc. möglichst auszuschließen [292], wird die Abfolge der Bedingungen, randomisiert.

6.2.3 Fahrscenarien und Versuchsstrecken

Das simulierte Ego-Fahrzeug entspricht einer vollbeladenen Sattelzugmaschine mit einem Gesamtgewicht von 40 t. Das CoDAS wird von dem Versuchsteilnehmer auf eine Wunschgeschwindigkeit von 80 km/h und einer vorgegebenen Hysterese von ± 5 km/h (max. Abweichung von der Wunschgeschwindigkeit) eingestellt.

Es wird eine durchgehend dreispurige Autobahn simuliert. Neben der Autobahnauf- und -abfahrt werden vier weitere Fahrscenarien (S.1-S.4) implementiert:

S.1 Ego-Fahrzeug überholt: Das Ego-Fahrzeug fährt auf die Autobahn auf und schließt zu einem 4 km/h langsamer fahrender Lkw (30 t) auf. Ist der Abstand des Ego-Fahrzeugs zum vorausfahrenden Lkw ≤ 100 m, berechnet das CoDAS Überholmöglichkeiten und gibt über die HMI Rückmeldung, dass ein kooperatives Überholmanöver eingeleitet wird (siehe Abbildung 6.5). Vorausgesetzt der Versuchsteilnehmer übersteuert das CoDAS nicht, wird er mithilfe der HMI durch das kooperative Überholmanöver geleitet (Kapitel 5.1.4). Das Ego-Fahrzeug beschleunigt und der vorausfahrende Lkw reduziert seine Geschwindigkeit entsprechend der voreingestellten Hysterese um bis zu 5 km/h.

S.2 Folgefahrt: Vor dem Ego-Fahrzeug fährt ein simulierter Lkw auf die Autobahn auf und beschleunigt auf die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs. Ist der Abstand des Ego-Fahrzeugs zum vorausfahrenden Lkw ≤ 100 m berechnet das CoDAS Überholmöglichkeiten und gibt über die HMI dem Fahrer die Information, dass kein Überholmanöver koordiniert werden konnte (siehe Abbildung 6.5).

S.3 Ego-Fahrzeug wird überholt: Das Ego-Fahrzeug fährt auf die Autobahn auf. Ein simulierter Lkw (30 t) mit einer 4 km/h höheren Geschwindigkeit fährt auf das Ego-Fahrzeug auf. Ist der Abstand des simulierten Lkw zum Ego-Fahrzeug ≤ 100 m, berechnet das CoDAS Überholmöglichkeiten und gibt über die HMI dem Fahrer Rückmeldung, dass ein kooperatives Überholmanöver eingeleitet wird (siehe Abbildung 6.5). Vorausgesetzt der Versuchsteilnehmer übersteuert nicht, wird er mithilfe der HMI durch das kooperative Überholmanöver geleitet (Kapitel 5.1.4). Das Ego-Fahrzeug reduziert, der überholende Lkw erhöht seine Geschwindigkeit entsprechend der voreingestellten Hysterese um bis zu 5 km/h.

S.4 Systemausfall: Das Ego-Fahrzeug fährt auf die Autobahn auf. Ein simulierter Lkw (30 t) mit einer 4 km/h höheren Geschwindigkeit fährt auf das Ego-Fahrzeug auf. Ist der Abstand des simulierten Lkw zum Ego-Fahrzeug ≤ 100 m, berechnet das CoDAS Überholmöglichkeiten und gibt über die HMI dem Fahrer Rückmeldung, dass ein kooperatives Überholmanöver eingeleitet wird. Vorausgesetzt der Versuchsteilnehmer übersteuert nicht, wird er mithilfe der HMI durch das kooperative Überholmanöver (Kapitel 5.1.4) geleitet. Das Ego-Fahrzeug reduziert, der überholende Lkw erhöht seine Geschwindigkeit entsprechend der voreingestellten Hysterese um bis zu 5 km/h. Der simulierte Lkw führt einen Spurwechsel durch. Befinden sich beide Fahrzeuge auf ihrer jeweiligen Spur auf gleicher Höhe, bricht das CoDAS ab und informiert den Fahrer über den Grund für den Abbruch (siehe Abbildung 6.5). Beide Fahrzeuge erhöhen bzw. reduzieren daraufhin wieder auf ihre Geschwindigkeiten.

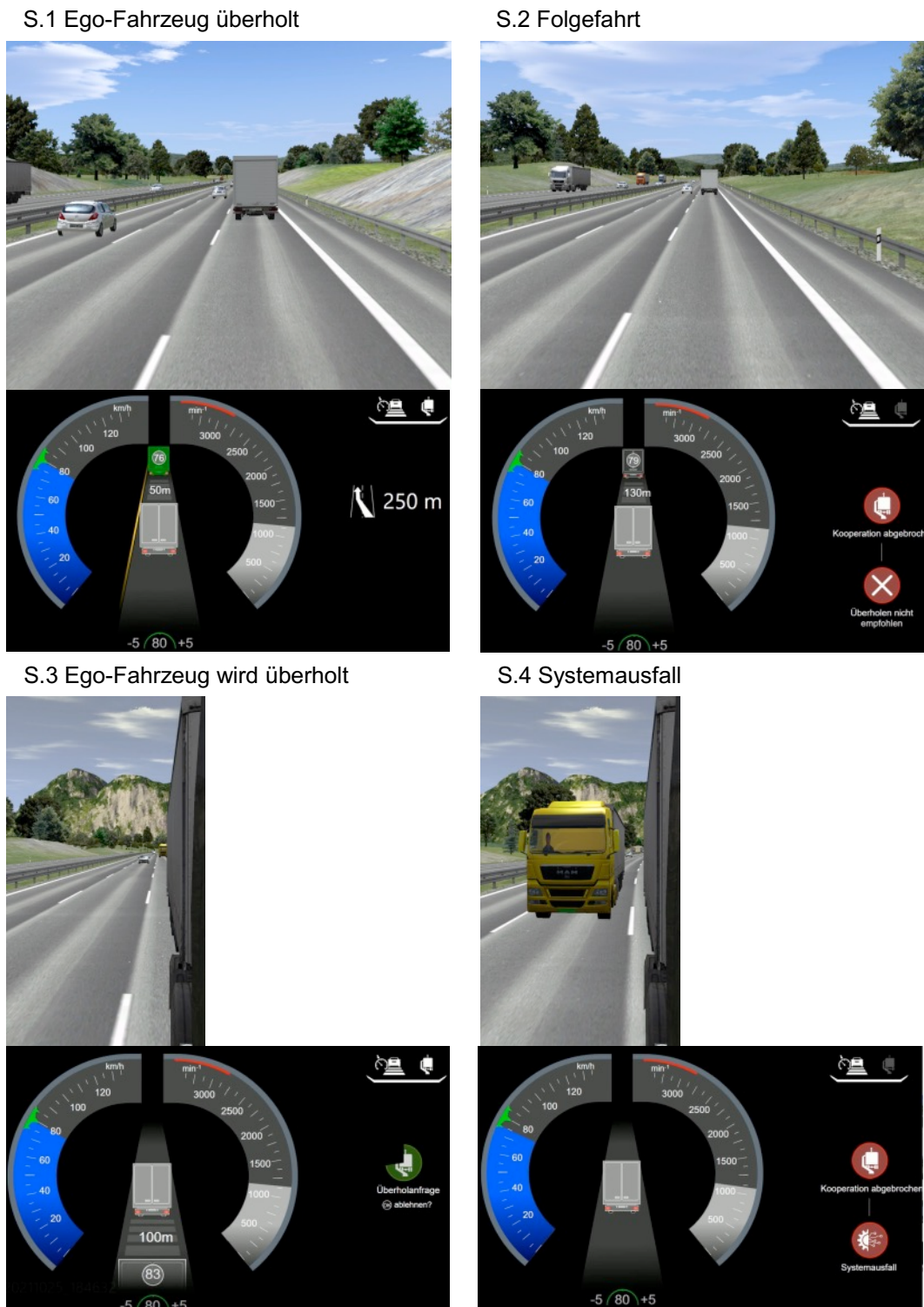


Abbildung 6.5: Darstellung der Fahrscenarien S1 - S4 mit entsprechender Rückmeldung der HMI

Die vier Fahrscenarien werden innerhalb sechs verschiedener Fahrstrecken angeordnet. Die Abfolge der Fahrscenarien sowie der Perspektive variiert dabei. Je nach Randomisierung durchfährt der Versuchsteilnehmer pro Bedingung zuerst eine Fahrstrecke als Überholender (FS.1 - 3) und anschließend als Überholter (FS.4 - 6), bzw. in umgekehrter Reihenfolge.

Um die Ein- und Ausscherabstände beim Überholmanöver zu bestimmen, wird unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsdifferenz der beteiligten Fahrzeuge (4 km/h) und deren

Beladung (30 bzw. 40 t) die Soll-TTC (time-to-collision) bestimmt. Nach MERTENS [21, 293, S. 32] ergibt durch den Bremsweg für die Geschwindigkeiten 76, 80 bzw. 84 km/h und der Beladung von 30 bzw. 40 t, eine Soll-TTC, woraus sich der Abstand beim Ausscheren und Einscheren ergibt (Tabelle 6.6):

Tabelle 6.6: Berechneter Aus- und Einscherabstand in Abhängigkeit der Soll-TTC gemäß CoDAS

	Ausscheren		Einscheren	
	Soll-TTC (in s)	Abstand (in m)	Soll-TTC (in s)	Abstand (in m)
S.1 Ego-Fahrzeug überholt:	27,82	30,92	17,97	19,96
• Überholender (80 km/h, 40 t)				
• Überholter (76 km/h, 30 t)				
S.3 Ego-Fahrzeug wird überholt	25,48	28,31	24,24	26,93
• Überholender (84 km/h, 30 t)				
• Überholter (80 km/h, 40 t)				

Werden diese Abstände erreicht, wird durch das CoDAS ein Spurwechsel initiiert und dem Fahrer über die HMI eine Rückmeldung gegeben. Abbildung 6.6 verdeutlicht das simulierte Fahrmanöver durch die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der relevanten Parameter:

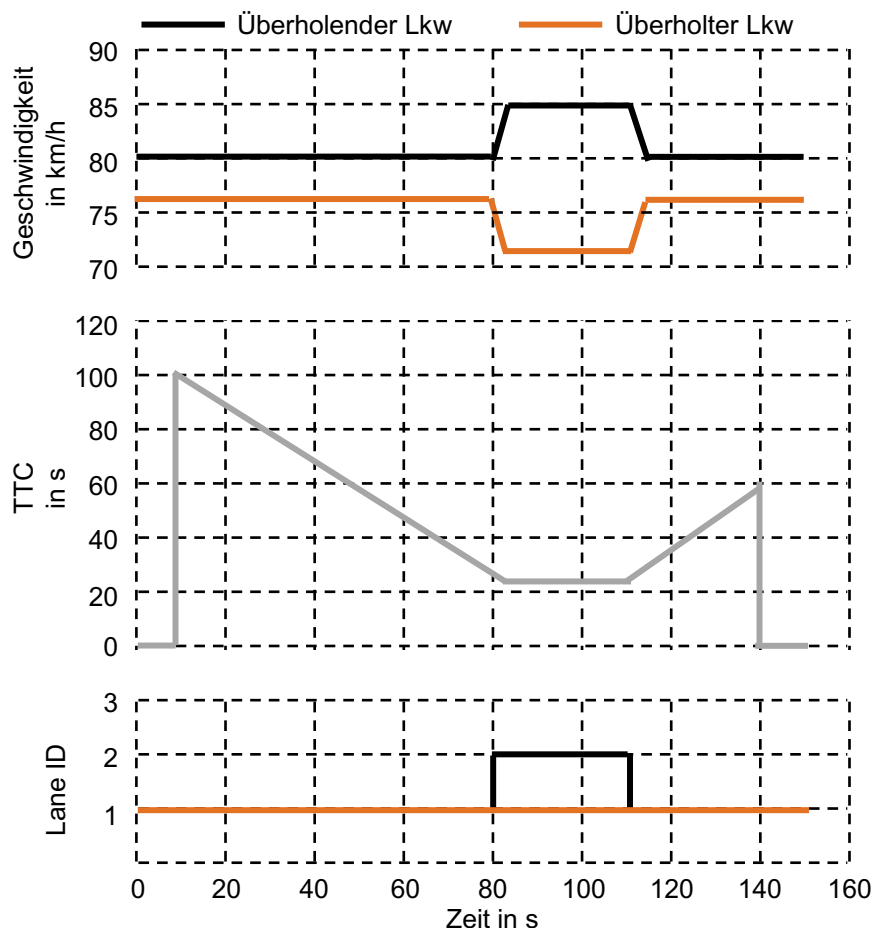


Abbildung 6.6: Schematische Darstellung eines simulierten Überholmanövers nach [293]

6.2.4 Datenerhebung

Zur Beantwortung der formulierten Forschungsfragen sowie Überprüfung der daraus abgeleiteten Hypothesen werden Messgrößen für das Kooperationsverhalten der Versuchsteilnehmer sowie die Qualität der HMI definiert. Zudem werden Daten zur Demografie sowie Kontrollvariablen zur Überprüfung etwaiger Korrelationseffekte erhoben.

Kooperationsverhalten

Das Kooperationsverhalten wird anhand der Kooperationsrate (Anzahl stattgefundener Kooperationen/Anzahl möglicher Kooperationen) gemessen. Diese wird durch die Umsetzung der Handlungsvorgaben des CoDAS definiert. In der Perspektive des Überholenden bedeutet dies die Einhaltung der systemseitig vorgegebenen Geschwindigkeit und Durchführung des Spurwechsels zum definierten Zeitpunkt. In der Perspektive des Überholten bedeutet dies, die Einhaltung der systemseitig vorgegebenen Geschwindigkeit. Das Annehmen bzw. Ablehnen (z.B. durch Übersteuern) einer Kooperation wird binär gezählt. Zusätzlich werden die Fahrdaten bzgl. der in Kapitel 6.1.1 definierten Charakteristik kooperativer Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen erhoben. Die sind im Konkreten: die Überholdauer, der Abstand beim Aus- und Einscheren sowie die Überholgeschwindigkeit.

Neben den objektiven Daten zum Kooperationsverhalten werden zudem subjektive Daten zum Kooperationsverhalten gemessen. Die Versuchsteilnehmer werden gebeten, nach jeder simulierten Bedingung drei Aussagen (eigene Formulierung) über den Nutzen der HMI zu bewerten. Der Grad der Zustimmung wird auf einer 5-stufigen Likert-Skala (1 = „*Stimme gar nicht zu*“ ... 5 = „*Stimme voll zu*“) gemessen (Tabelle 6.7):

Tabelle 6.7: Subjektiver Nutzen der HMI für das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen

Item-Nr.	Aussage	Ratingskala
1	Die HMI motiviert mich zum Eingehen einer Kooperation während Lkw-Überholmanöver	1 ... 5
2	Durch die HMI erkenne ich Kooperationspartner während Lkw-Überholmanöver.	1 ... 5
3	Durch die HMI kann ich während Lkw-Überholmanöver die Absicht des anderen Kooperationspartner einschätzen.	1 ... 5

Qualität der HMI

Die Qualität der HMI wird anhand subjektiver Messgrößen erhoben. Hierfür werden standardisierte Fragebögen verwendet, die schon in den vorherigen Studien I bis IV Anwendung finden.

Zur Untersuchung der Akzeptanz wird die VAN-DER-LAAN-Skala [85] genutzt. Diese misst die Akzeptanz eines Systems innerhalb zwei Dimensionen. Die praktischen Aspekte werden durch die Dimension Nützlichkeit und die Annehmlichkeiten des Systems über die Dimension Zufriedenheit gemessen. Die Versuchsteilnehmer nehmen hierzu gegenüber neun gegensätzlichen Wortpaaren, mit Hilfe einer 5-stufigen Likert-Skala Stellung (z.B. 0 = „*nützlich*“ ... 5 = „*nutzlos*“).

Zur Ermittlung der Usability wird der SUS [257] ermittelt. Dieser standardisierte Fragebogen besteht aus zehn Aussagen, deren Zustimmung bzw. Ablehnung anhand einer 5-stufigen Likert-Skala erfolgt (1 = „*Stimme gar nicht zu*“ ... 5 = „*Stimme voll zu*“).

Zur Bewertung des Vertrauens in die HMI wird der Trust Scale. [258] erhoben. Dieser besteht aus 11 Aussagen und sieben Abstufungen (1 = „*Trifft gar nicht zu*“ ... 7 = „*Trifft völlig zu*“) zur Einschätzung des Vertrauens der Versuchsteilnehmer bei der Interaktion mit dem System.

Die User-Experience in der Interaktion mit der HMI wird anhand der Kurzversion des User Experience Questionnaire - Short (UEQ-S) [294] [295] erhoben. Damit wird der Gesamteindruck gemessen. Hierfür werden zwei Qualitäten ermittelt: die pragmatische (aufgabenbezogene Qualitätsmerkmale) und hedonische Qualität (Qualitätsmerkmale, die über die reine Nützlichkeit: z.B. Freude bei der Nutzung). Der UEQ-S besteht aus acht gegensätzlichen Wortpaaren, mit deren Hilfe die Versuchsteilnehmer anhand einer 7-stufigen Skala die Qualitäten bewerten sollen (z.B. 1 = „*behindernd*“ ... 7 = „*unterstützend*“ oder 1 = „*langweilig*“ ... 7 = „*spannend*“).

Abschließend wird ein Präferenzurteil zwischen den drei Bedingungen (Baseline, HMI, HMI + ICo) mit Begründungen der Versuchsteilnehmer erhoben.

Demographie und Kontrollvariablen

Zur Messung der Demographie werden Alter, Geschlecht, Dauer des Führerscheinbesitzes, Jahresfahrleistung und der vorrangige Einsatzbereich nach Distanz (Fernverkehr national/ international, Regionalverkehr bis 150 km pro Tag, Nahverkehr bis 50 km pro Tag) erhoben. Zudem werden die Vorerfahrung mit Fahrer- sowie Sprachassistenzsysteme abgefragt.

Zur Ermittlung der Technikbereitschaft, als abhängige Größe für die Akzeptanz gegenüber einem automatisierten System (Kapitel 2.2) wird die Kurzsкала nach NEYER ET AL. [296] verwendet. Diese umfasst 12 Aussagen, die sich in die Dimensionen Technikakzeptanz, Technikkompetenzüberzeugungen und Technikkontrollüberzeugungen untergliedern. Die Versuchsteilnehmer stimmen den Aussagen mithilfe einer 5-stufigen Likert-Skala zu (1 = „*Stimmt gar nicht*“ ... 5 = „*Stimmt völlig*“).

Die Tendenz zu Anthropomorphisieren (Kapitel 2.3.1) wird anhand des IDAQ-Scores (IDAQ = Individual Differences in Anthropomorphism Questionnaire) [119] gemessen. Dieser umfasst fünf Aussagen, die ermitteln, inwieweit die Versuchsteilnehmer technischen Systemen Bewusstsein bzw. Absichten zusprechen. Mithilfe einer 10-stufigen Skala können die Versuchsteilnehmer der Aussage zustimmen, bzw. diese ablehnen (1 = „*gar nicht*“ ... 10 = „*sehr*“)

Zur Messung des situativ auftretenden Anthropomorphismus wird die Skala des Anthropomorphismus der Godspeed Questionnaire Series (GQS) [283] erhoben. Diese Serie wurde ursprünglich entwickelt, um die soziale Interaktion mit Robotern zu messen. Versuchsteilnehmer bewerten das erlebte System anhand vier gegensätzlicher Wortpaare mittels einer sechs-stufigen Skala (z.B. 1 = „*unecht*“ ... 6 = „*natürlich*“).

Zur Erhebung der subjektiv wahrgenommenen Relevanz von Kooperation im Straßenverkehr, speziell bei Lkw-Überholmanövern, werden zu Beginn der Evaluation folgende vier Fragen gestellt (Tabelle 6.8):

Tabelle 6.8: Erhebung der subjektiven Relevanz für Kooperation im Straßenverkehr/ während Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen

Item-Nr.	Frageitem	Ratingskala
1	Wie wichtig ist Ihnen Kooperation im Straßenverkehr?	1 ... 5
2	Wie wichtig ist anderen Lkw-Fahrer Kooperation im Straßenverkehr?	1 ... 5
3	Wie häufig kooperieren Sie beim Überholen?	1 ... 5
4	Wie häufig kooperieren andere Lkw-Fahrer beim Überholen?	1 ... 5

6.2.5 Versuchsplan

Zur Einführung wird den Versuchsteilnehmern der Fahrsimulator sowie der Hintergrund und das Ziel der Studie („*Evaluation unterschiedlicher HMI-Konzepte für ein Fahrerassistenzsystem für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen*“) vorgestellt. Nach der Sicherheitseinweisung, erfolgt die Einweisung in die Funktionalität des CoDAS und die Bedienung über die HMI. Nach Unterweisung und Aufklärung über die Datenschutzbestimmung unterzeichnen die Versuchsteilnehmer die Einverständniserklärung zur Teilnahme an der Studie. Es folgt die Vorbefragung, die sich in die Erhebung der demographischen Daten und Kontrollvariablen gliedert. Nach der Einweisung in die Bedienung des ACC und einer Eingewöhnungsfahrt im Fahrsimulator, in der die Versuchsteilnehmer ihr erstes Lkw-Überholmanöver in der Fahrsimulation erleben, folgt der erste Teil der Studie. Abhängig vom Randomisierungsplan erlebt der Versuchsteilnehmer die erste von drei Bedingungen (Baseline, HMI, HMI + ICo) in der Perspektive Überholenden oder Überholten. Anschließend wird der Versuchsteilnehmer gebeten, das erlebte System mittels Fragebogen zu bewerten. Nach einer Pause erfolgt Teil 2, gefolgt von Teil 3 (Abbildung 6.7). Nachdem die Versuchsteilnehmer die letzte erlebte Bedingung bewerten und ihr Präferenzurteil fällen, erhalten die Versuchsteilnehmer ihre Aufwandentschädigung von 15 € pro Stunde. Insgesamt dauert die Fahrsimulatorstudie ca. 3 Stunden.

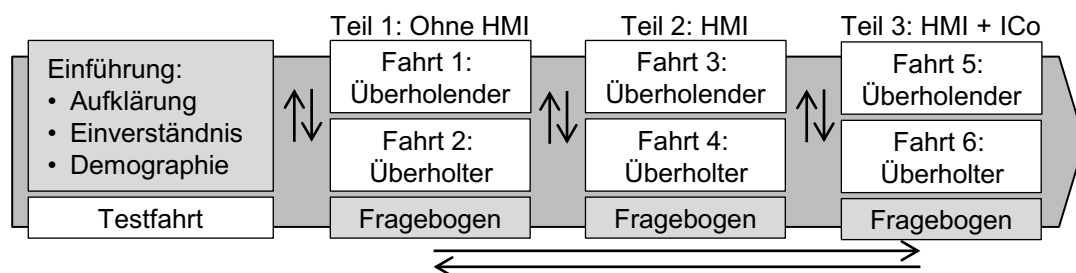


Abbildung 6.7: Versuchsplan der summativen Evaluation

6.2.6 Stichprobe

Die teilnehmenden Lkw-Fahrer werden über die Datenbank des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik rekrutiert und haben mindestens einmal an einer Fahrsimulatorstudie am Lehrstuhl teilgenommen. Voraussetzung für die Teilnahme an der Evaluation ist der Besitz eines gültigen Lkw-Führerscheins Klasse C/ CE sowie Lkw-Fahrerfahrung auf Autobahnen, um die Validität der Messwerte zu garantieren.

Das Probandenkollektiv umfasst 33 Versuchsteilnehmer. Zwei von ihnen mussten aufgrund von Motion Sickness, einer aufgrund eines technischen Problems die Studie abbrechen. Dies ergibt einen Datensatz von 30 Lkw-Fahrern (28 männlich, 2 weiblich) im Alter von 30 bis 62 Jahre (M = 52,0, SD = 8,0). Die teilnehmenden Lkw-Fahrer geben an, zwischen 8 und 42 Jahren im Besitz eines Lkw-Führerscheins (M = 28,2, SD = 9,9) zu sein. 46,7 % der Fahrer sind im (inter-)nationalen Fernverkehr unterwegs, 20 % im Regionalverkehr (bis 150 km pro Tag) und 13,3 % im Nahverkehr (bis 50 km pro Tag). 20 % der Fahrer sind in anderen Einsatzbereichen tätig (z.B. Fahrschule). Bezüglich der jährlichen Fahrleistung geben 30 % der Lkw-Fahrer an, mehr als 100.000 km pro Jahr zu fahren, 43,3 % 50.000 bis 100.000 km und 13,3 % 10.000 bis 50.000 km. Und der Rest weniger als 10.000 km im Jahr mit dem Lkw unterwegs zu sein.

Alle an der Studie teilnehmenden Lkw-Fahrer kennen sowohl den Tempomat als auch das ACC. Der Tempomat wird von 93 % der Fahrer oft bis immer genutzt, das ACC von 67 % der Fahrer. Der Spurverlassenswarner (LDW) ist ebenfalls allen teilnehmenden Fahrern bekannt, jedoch nutzen nur 53 % diesen oft bis immer. Der Spurwechselassistent (LCA) kennen 83 % der Lkw-Fahrer, von denen 20 % angeben, ihn oft bis immer zu nutzen.

Sprachassistenzsysteme werden in der Nutzung mit dem Smartphone (z.B. Siri, Google Assistent etc.) von 10 % der teilnehmenden Lkw-Fahrer oft bis immer genutzt. Zuhause geben 13 % (z.B. Amazon Alexa) und im Kontext Automobil 17 % der teilnehmenden Lkw-Fahrer an, die Sprachassistenz oft bis immer zu nutzen.

In der Erhebung des Problembewusstseins, zeigt sich, dass 97 % den teilnehmenden Lkw-Fahrer Kooperation im Straßenverkehr wichtig bzw. sehr wichtig einschätzen. Kooperation während Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen wird zu 77 % so eingestuft (Abbildung 6.8). Ein deutlich anderes Bild zeigt sich bei der Einschätzung der teilnehmenden Lkw-Fahrer wie wichtig bzw. sehr wichtig anderen Lkw-Fahrer Kooperation im Straßenverkehr bzw. während Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen ist. Hier liegt die Einschätzung bei lediglich 30 % bzw. 23 %.

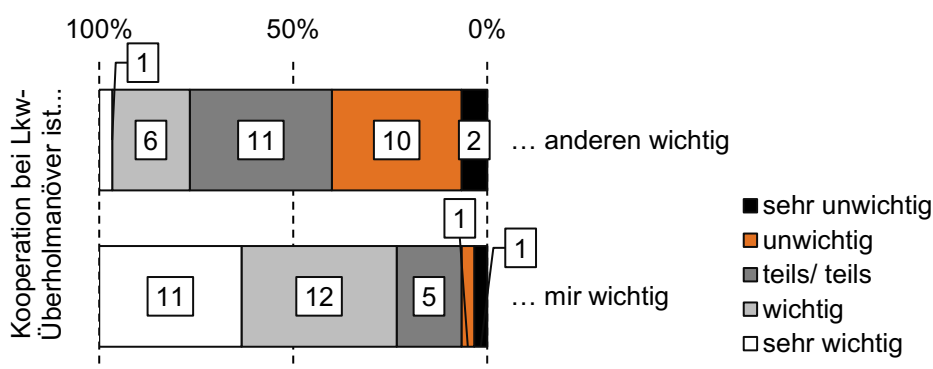


Abbildung 6.8: Fremd- und Selbstbild bezüglich Problembewusstsein Kooperation im Straßenverkehr

Die Erhebung der Technikbereitschaft unter den teilnehmenden Lkw-Fahrer ergab mit dem Gesamt-Score von M = 4,14, SD = 0,67 (Rating-Score: 1 ... 5) eine hohe Indikation (Technikakzeptanz: M = 3,93, SD = 0,95; Technikkompetenzüberzeugung: M = 4,43, SD = 0,86; Technikkontrollüberzeugung: M = 4,01, SD = 0,86).

Die deskriptive Auswertung des IDAQ-SCORES zur Erfassung der tendenziellen Neigung zum Anthropomorphismus der teilnehmenden Lkw-Fahrer ergibt mit M = 3,01, SD = 1,93 (Rating-Score: 1 ... 10) eine niedrige Indikation.

6.3 Ergebnisse

Folgend werden die Ergebnisse der Analyse abhängiger Variablen vorgestellt (Kapitel 6.2.4):

Um mögliche signifikanten Effekte zu erfassen, werden neben der deskriptiven Analyse der Daten, inferenzstatistische Verfahren angewandt. Aufgrund der Charakteristik der Daten (u.a. ordinalskaliert, nicht normalverteilt) wird auf nicht-parametrische, voraussetzungsärmere Verfahren (im Vergleich zu parametrische) zurückgegriffen, auch verteilungsfreie Verfahren genannt [297, S. 130]. Da es sich zwischen den Bedingungen Baseline vs. HMI vs. HMI + ICo um den Vergleich von drei verbundenen Stichproben handelt (Forschungsfrage: F3.HMI und F3.VMM), wird der Friedmann-Test [298, S. 687] angewandt. Beim Vergleich von zwei verbundenen Stichproben (HMI vs. HMI + ICo - Forschungsfragen: F3.VMM, F4.A, F4.B, F4.V und F4.UX) wird der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test genutzt [297, S. 133]. Die Voraussetzungen beider Testverfahren sind normalskalierte unabhängige Variablen (Baseline, HMI bzw. HMI + ICo) und eine ordinalskalierte abhängige Variable (z.B. User Experience, Usability oder Vertrauen). Im Fall des Wilcoxon-Testverfahren ist zudem eine (etwa) symmetrischen Verteilungsform der Differenzen beider Messwertpaare vorausgesetzt [299, S. 1051]. Liegt keine symmetrische Verteilungsform vor, wird im Fall von zwei verbundenen Stichproben der Vorzeichen-test angewandt.

Wird eine abhängige Variable subjektiv durch Frageitems erhoben, wird die interne Konsistenz der Skala, mit der die Variable gemessen wird, mittels Cronbachs Alpha α erhoben. Cronbach Alpha gibt die Stärke der Reliabilität an. Bis auf den Fragebogen zur Erhebung des situativen Anthropomorphismus – GQS [283] (HMI: $\alpha = 0,68$; HMI + ICo: $\alpha = 0,65$) und den Fragebogen zum subjektiven Nutzen kooperativer Unterstützung (HMI: $\alpha = 0,69$; HMI + ICo: $\alpha = 0,65$) erreichen alle weiteren Fragebögen mit $\alpha > 0,7$ eine akzeptable interne Konsistenz $\alpha > 0,7$ nach [298, S. 800],

Für die Überprüfung der aufgestellten Forschungsfragen und Hypothesen (Kapitel 6.1) wird das Signifikanzniveau bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$ gesetzt [292, S. 26, 300]. Die Auswertung wird mit der Statistik-Software IBM® SPSS® Statistics (Version 26) durchgeführt.

6.3.1 Kooperatives Fahrverhalten

Für die Analyse der abhängigen Variable Kooperationsverhalten wird ein Überholmanöver nach HEGEMAN [165] definiert (Kapitel 2.4.1). Damit bestimmt die Überquerung der Leitlinie mit dem linken vorderen Rad des Lkw den Anfang und das Ende des Überholmanövers. Sobald das vordere linke Rad die Leitlinie quert, wird Überholdauer und Ausscherabstand gemessen. Überquert das linke Rad die Leitlinie zum zweiten Mal, wird der Einscherabstand gemessen. Die Überholgeschwindigkeit wird als Durchschnittsgeschwindigkeit von Beginn bis Ende des Überholmanövers erfasst.

Bei vier teilnehmenden Lkw-Fahrern kam es in der Perspektive des Überholenden zu Aufzeichnungsfehlern, weshalb von den ursprünglich 60 durchgeführten Lkw-Überholmanövern (2 Überholmanöver pro Versuchsteilnehmer) nur die Daten von 52 Überholmanövern ausgewertet werden. In der Perspektive des Überholten müssen die erhobenen Daten von sechs Versuchsteilnehmern aufgrund von Aufzeichnungsfehlern ausgeschlossen werden - somit können insgesamt die Daten von 50 dieser Überholmanöver ausgewertet werden.

Kooperationsrate

In der Perspektive des Überholenden ist der Vergleich der Kooperationsrate zwischen der Baseline- und HMI- bzw. HMI + ICo-Bedingung nicht ohne weiteres möglich, weil es kein vorgeschlagenes Überholmanöver gibt, dem der Fahrer folgen kann. Laut gesetzlicher Regelungen (Kapitel 2.4.1) darf ein Lkw-Überholmanöver nicht länger als 45 s dauern. In der Baseline-Bedingung ist dies in 18 von 52 messbaren Überholmanövern der Fall (Überholdauer: $M = 39,40$ s; $SD = 5,35$ s). Hierfür beschleunigen die Versuchsteilnehmer von 80 km/h auf durchschnittlich 84,41 km/h ($SD = 1,66$ km/h) und nehmen in 16 von den 18 Fällen einen geringen Ausscherabstand ($M = 30,48$ m; $SD = 8,73$ m) in Kauf. Das bedeutet, dass in zwei von 52 Überholmanövern kooperativ gehandelt wird (Kapitel 2.4.1). Jedoch werden von den Versuchsteilnehmern in allen 18 Fällen der vorgeschriebene Einscherabstand von 50 m unterschritten ($M = 21,15$ m; $SD = 8,04$ m). In den Bedingungen HMI bzw. HMI + ICo wird von einem kooperativen Überholmanöver ausgegangen, wenn der Versuchsteilnehmer den Anweisungen des HMI folgt und das System nicht übersteuert. Dies ist in der HMI-Bedingung bei 45 und in der HMI + ICo-Bedingung bei 46 von 52 messbaren Überholmanövern der Fall. Kommt es zu Kooperationsabbrüche durch die Versuchsteilnehmer, finden diese in den Zuständen 5 und 9 Abstand absichern pre und post (Tabelle 2.3) durch ein zu frühes Aus- bzw. Einscheren statt.

In der Perspektive des Überholten wird in der Baseline-Bedingung von kooperativem Handeln gesprochen, wenn der Versuchsteilnehmer seine Geschwindigkeit reduziert, um das Überholmanöver in möglichst kurzer Zeit abzuschließen. Dies ist bei 9 von 50 messbaren Überholmanövern der Fall. In der HMI- bzw. HMI + ICo-Bedingung wird wie in der Perspektive Überholenden von kooperativem Handeln ausgegangen, wenn der Versuchsteilnehmer den Anweisungen der HMI Folge leistet und das System nicht übersteuert. Dies ist in der HMI-Bedingung bei 48 von 50 und in der HMI + ICo-Bedingung bei allen 50 messbaren Überholmanövern der Fall.

Es ergeben sich die in Abbildung 6.9 gezeigten Kooperationsraten (0 = nie kooperiert; 1 = immer kooperiert) in den Perspektiven des Überholenden und des Überholten.

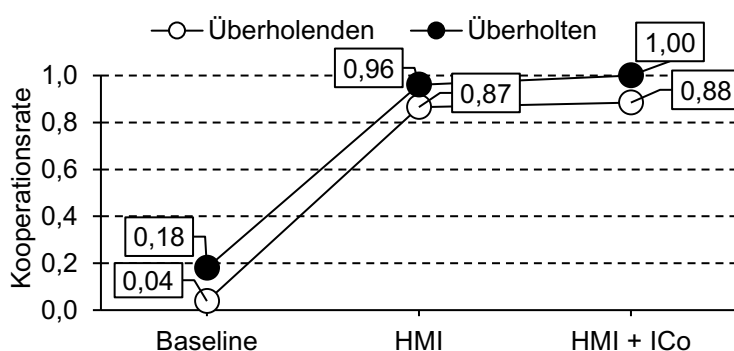


Abbildung 6.9: Kooperationsrate in Abhängigkeit der HMI (links) und HMI + ICo (rechts); (0 = nie kooperiert; 1 = immer kooperiert)

In beiden Perspektiven kann ein signifikanter Unterschied (Friedmann-Test) der Kooperationsrate nachgewiesen werden (Tabelle 7.1). Im Vergleich kooperieren die Versuchsteilnehmer unter der Bedingung HMI bzw. HMI + ICo signifikant häufiger als unter der Bedingung Baseline. Die Vermenschlichung hat jedoch keine signifikante Auswirkung auf die Kooperationsrate.

Tabelle 6.9: Deskriptive und inferenzstatistische Auswertung der Kooperationsrate

Perspektive	Baseline M (SD)	HMI M (SD)	HMI + ICo M (SD)	Inferenzstatistische Auswertung
Überholenden	0,04 (0,14)	0,87 (0,30)	0,88 (0,26)	Friedmann-Test: $\chi^2(2) = 37,81$, $p < ,01$, $n = 26$ Baseline vs. HMI: $z = -1,31$, $p < ,01$ Baseline vs. HMI + ICo: $z = -1,35$, $p < ,01$ HMI vs. HMI + ICo: $z = -0,04$, $p > ,05$
Überholter	0,18 (0,38)	0,96 (0,14)	1,00 (0,00)	Friedmann-Test: $\chi^2(2) = 39,6$, $p < ,01$, $n = 26$ Baseline vs. HMI: $z = -1,18$, $p < ,01$ Baseline vs. HMI + ICo: $z = -1,28$, $p < ,01$ HMI vs. HMI + ICo: $z = -0,10$, $p > ,05$

Fahrdaten

In der Analyse der Fahrdaten (Tabelle 6.10) in der Perspektive des Überholenden zeigt sich, dass in den Bedingungen HMI bzw. HMI + ICo im Vergleich zur Baseline die Überholdauer signifikant reduziert wird (Abbildung 6.10).

Tabelle 6.10: Deskriptive und inferenzstatistische Auswertung der Fahrdaten in der Perspektive des Überholenden

Fahrdaten	Baseline M (SD)	HMI M (SD)	HMI + ICo M (SD)	Inferenzstatistische Auswertung
Überholdauer	59,89 (18,99)	32,29 (5,78)	31,86 (3,48)	Friedmann-Test: $\chi^2(2) = 36,23$, $p < ,01$, $n = 26$ Baseline vs. HMI: $z = -1,39$, $p < ,01$ Baseline vs. HMI + ICo: $z = 1,5$, $p < ,01$ HMI vs. HMI + ICo: $z = -0,12$, $p > ,05$
Ausscherabstand	40,67 (19,42)	31,12 (7,90)	29,51 (3,01)	Friedmann-Test: $\chi^2(2) = 14,77$, $p < ,01$, $n = 26$ Baseline vs. HMI: $z = 0,92$, $p < ,01$ Baseline vs. HMI + ICo: $z = 0,92$, $p < ,01$ HMI vs. HMI + ICo: $z = 0,00$, $p > ,05$
Einscherabstand	20,17 (8,36)	31,00 (7,17)	31,30 (7,22)	Friedmann-Test: $\chi^2(2) = 23,15$, $p < ,01$, $n = 26$ Baseline vs. HMI: $z = -1,115$, $p < ,01$ Baseline vs. HMI + ICo: $z = -1,192$, $p < ,01$ HMI vs. HMI + ICo: $z = -0,08$, $p > ,05$

Dies trifft ebenfalls für den Ausscherabstand zu (Abbildung 6.11). Auch dieser reduziert sich signifikant unter den Bedingungen HMI bzw. HMI + ICo im Vergleich zur Baseline (Tabelle 6.10).

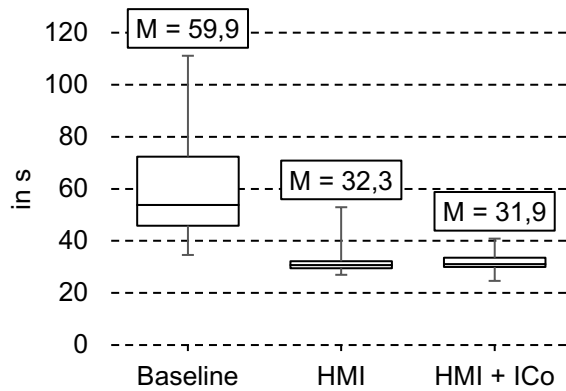


Abbildung 6.10: Überholddauer in der Perspektive des Überholenden

Der Einscheraabstand erhöht sich signifikant unter den Bedingungen HMI bzw. HMI + ICo im Vergleich zur Baseline. Einen signifikanten Einfluss der Vermenschlichung auf die Fahrdaten lässt sich nicht feststellen (Tabelle 6.10).

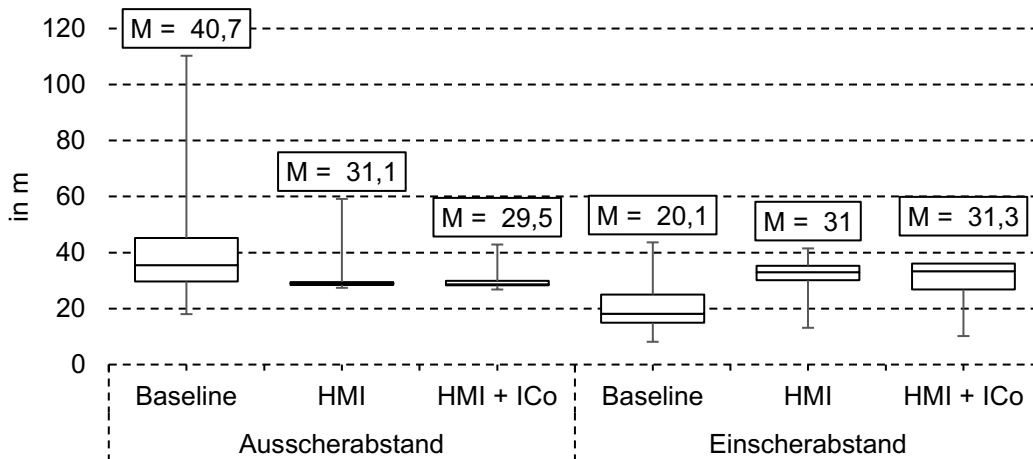


Abbildung 6.11: Aus- und Einscheraabstand in der Perspektive des Überholenden

In der Perspektive des Überholten zeigt sich ebenfalls, dass in den Bedingungen HMI bzw. HMI + ICo im Vergleich zur Baseline die Überholddauer signifikant reduziert wird (Tabelle 6.11; Abbildung 6.12).

Tabelle 6.11: Deskriptive und inferenzstatistische Auswertung der Überholddauer in der Perspektive des Überholten

Fahrdaten	Baseline M (SD)	HMI M (SD)	HMI + ICo M (SD)	Inferenzstatistische Auswertung
Überholddauer	40,65 (5,54)	30,93 (6,29)	31,81 (6,64)	Friedmann-Test: $\chi^2(2) = 19,76$, $p < ,01$, $n = 25$ Baseline vs. HMI: $z = 1,24$, $p < ,01$ Baseline vs. HMI + ICo: $z = 0,80$, $p < ,05$ HMI vs. HMI + ICo: $z = -0,44$, $p > ,05$

Ein signifikanter Einfluss der Vermenschlichung in der Perspektive des Überholten lässt sich wiederum nicht feststellen.

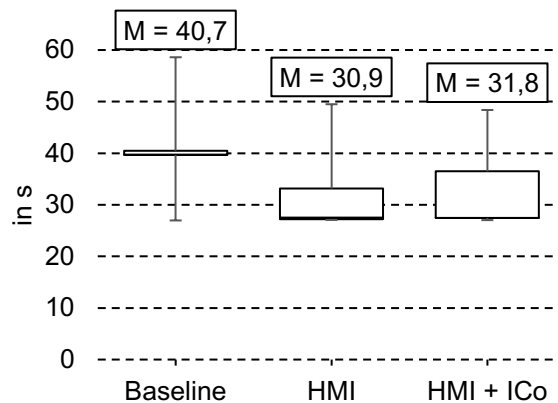


Abbildung 6.12: Überholdauer in der Perspektive des Überholten

Subjektiver Nutzen hinsichtlich kooperativer Unterstützung

Die Erhebung des subjektiven Nutzens des CoDAS-Systems unter Verwendung der HMI bzw. HMI + ICo Bedingung erzielt hohe Werte. 86,7 % bzw. 83,3 % der Versuchsteilnehmer stimmen der Aussage zu bzw. voll zu, durch die HMI motiviert zu sein eine Kooperation während Lkw-Überholmanöver einzugehen. 100 % bzw. 93,3 % der Versuchsteilnehmer stimmen zu bzw. voll zu durch die HMI den Kooperationspartner während Lkw-Überholmanöver erkennen zu können. 93,3 % bzw. 90 % der Versuchsteilnehmer stimmen zu bzw. voll zu, durch sie die Absicht des anderen einschätzen zu können. ICo führt hierbei nicht zu signifikanten Unterschieden.

6.3.2 Qualität der HMI

Zur Messung der Qualität der HMI in Abhängigkeit der Vermenschlichung werden subjektive Fragebögen zu den abhängigen Variablen Usability, Akzeptanz, Vertrauen und User Experience erhoben. Zudem wird die Präferenz für eine der drei Bedingungen (HMI vs. HMI + ICo) abgefragt. Von 30 teilnehmenden Lkw-Fahrern können alle Fragebogendaten ausgewertet werden.

Usability

Die mittels des standardisierten SUS-Fragebogens [257] erhobenen Werte zur Bestimmung der wahrgenommenen Usability zeigen nach BANGOR ET AL. [259] für beide Bedingungen exzellente Werte (min. 0 bis max. 100) (Abbildung 6.13).

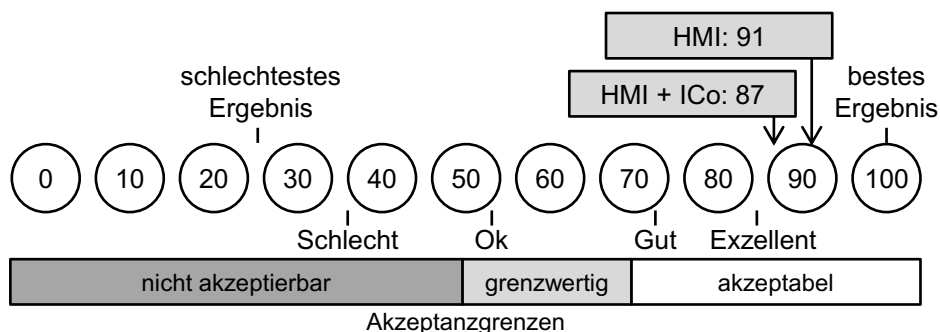


Abbildung 6.13: Wahrgenommene Usability (SUS-Skala nach [259])

Die inferenzstatistische Auswertung zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen HMI und HMI + ICo (Tabelle 6.12).

Tabelle 6.12: Statistische Auswertung der abhängigen Variable Usability

Variable	Bedingung	M	SD	inferenzstatistische Auswertung
Usability	HMI	91	12	Wilcoxon-Test: $z = -1,825$, $p = ,068$; $n = 30$
	HMI + ICo	87	14	

Vertrauen

Die Auswertung des subjektiv bewerteten Vertrauens nach JIAN ET AL. [258] zeigt für beide Bedingungen ein hohes Maß an Vertrauen (min. 1 bis max. 7). Es können keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen berechnet werden (Tabelle 6.13).

Tabelle 6.13: Statistische Auswertung der abhängigen Variable Vertrauen

Variable	Bedingung	M	SD	inferenzstatistische Auswertung
Vertrauen	HMI	6,09	0,83	Vorzeichen-Test: $z = 0,00$, $p = 1,000$; $n = 30$
	HMI + ICo	5,97	0,98	

Akzeptanz

Beide Bedingungen HMI und HMI + ICo erreichen auf den Akzeptanzskalen Zufriedenheit und Nützlichkeit nach VAN DER LAAN [85] positive Werte (die Gesamtbewertung des Systems bewegt sich auf den zwei Skalen zwischen - 2 bis + 2). Es lassen sich keine signifikanten Unterschiede in der Bewertung der beiden Bedingungen ausmachen (Tabelle 6.14).

Tabelle 6.14: Statistische Auswertung der abhängigen Variable Akzeptanz

Variable	Bedingung	M	SD	inferenzstatistische Auswertung
Zufriedenheit	HMI	1,34	0,55	Wilcoxon-Test: $z = -0,80$, $p = ,427$; $n = 30$
	HMI + ICo	1,33	0,77	
Nützlichkeit	HMI	1,34	0,46	Wilcoxon-Test: $z = -1,60$, $p = ,110$; $n = 30$
	HMI + ICo	1,35	0,65	

User Experience

Die subjektive Erhebung der User Experience mit dem standardisierten UEQ [295] resultiert in den zwei Dimensionen pragmatische und hedonische Qualität, die zu einem Gesamtscore (min. -3 bis max. 3) zusammengefasst werden können. Die deskriptiven Werte zeigen in der Benchmark-Analyse für beide Bedingungen gute Werte. Einzig die HMI + ICo Bedingung erzielt sowohl in der pragmatischen als auch hedonischen Qualität eine exzellente Bewertung (nach [301]; Abbildung 6.14):

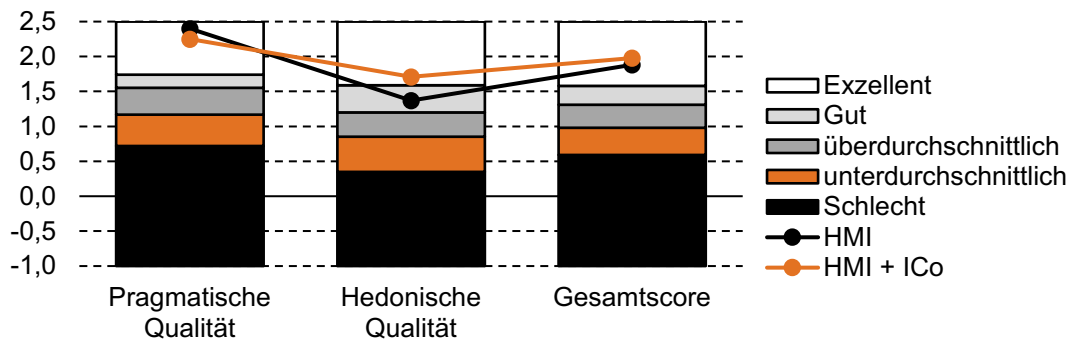


Abbildung 6.14: Benchmarkanalyse der User Experience Dimensionen nach [301]

Die inferenzstatistische Auswertung ergibt einen Unterschied in der hedonischen Qualität. So erleben die Versuchsteilnehmer das System in der Bedingung HMI + ICo stimulierender (z.B. mit mehr Spaß und Freude) (Tabelle 6.15):

Tabelle 6.15: Statistische Auswertung der abhängigen Variable User Experience

Variable	Bedingung	M	SD	inferenzstatistische Auswertung
Pragmatische Qualität	HMI	2,40	0,65	Wilcoxon-Test: $z = -0,92$, $p = ,359$; $n = 30$
	HMI + ICo	2,26	0,88	
Hedonische Qualität	HMI	1,37	1,07	Wilcoxon-Test: $z = 2,42$, $p < ,05$; $n = 30$
	HMI + ICo	1,71	1,05	
Gesamtscore	HMI	1,88	0,74	Wilcoxon-Test: $z = 1,362$, $p = ,173$; $n = 30$
	HMI + ICo	1,98	0,81	

6.3.3 Einfluss der Technikbereitschaft

Um einen möglichen Einfluss der Technikbereitschaft auf die abhängigen Variablen (Usability, Vertrauen, Akzeptanz und User Experience) zur Messung der Qualität der HMI zu ermitteln, wird eine Rangkorrelationsanalyse nach Spearman [298, S. 223] durchgeführt (Anhang F; Tabelle F.1). Die Auswertung zeigt, dass sich die wahrgenommene Nützlichkeit (Dimension der Akzeptanz) gegenüber dem System (unabhängig der Bedingung) mit der Technikbereitschaft erhöht (Tabelle 6.3).

Tabelle 6.16: Einfluss der Technikbereitschaft auf die wahrgenommene Nützlichkeit des Systems

Variable	HMI	HMI + ICo
Nützlichkeit	$r_s = 0,39$; $p < ,05$	$r_s = 0,42$; $p < ,05$

6.3.4 Einfluss des Anthropomorphismus

Der situativ auftretende Anthropomorphismus (Kapitel 2.3.1) wird mittels dem GQS [283] erhoben. Er besteht aus vier Wortpaaren. Abbildung 6.15 zeigt die Verteilung der Ausprägungen (Angabe des Median) für die HMI bzw. HMI + ICo Bedingung. Das System in der HMI + ICo

Bedingung wird demnach eher wie ein Mensch wahrgenommen, bzw. ihm ein Bewusstsein attribuiert. Über die vier Wortpaare wird jeweils ein Mittelwert für die Bedingung HMI bzw. HMI + ICo gebildet, die sich nicht signifikant unterscheiden.

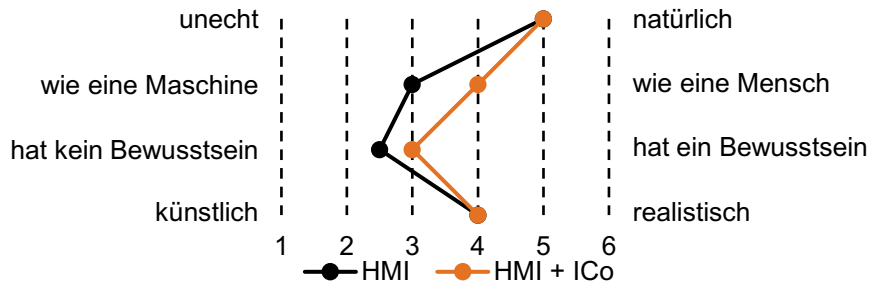


Abbildung 6.15: Subjektive Bewertung (Median) der Versuchsteilnehmer des GQS Fragebogen bzgl. situativ auftretenden Anthropomorphismus [283]

Um den möglichen Einfluss einer Tendenz zum Anthropomorphismus (Kapitel 2.3.1) auf die Qualität der HMI bzw. auf den situativ auftretenden Anthropomorphismus zu messen, wird eine Rangkorrelationsanalyse nach Spearman [298, S. 223] durchgeführt (Anhang F; Tabelle F.2). Die Auswertung zeigt keinen Einfluss auf die subjektive Bewertung der abhängigen Variablen zur Qualität der HMI oder auf den situativ auftretenden Anthropomorphismus.

6.3.5 Präferenz

Das Präferenzurteil am Ende des summativen Vergleichs, zeigt einen hohen Nutzungswunsch gegenüber dem CoDAS unter der Bedienung der HMI bzw. HMI + ICo. Alle teilnehmenden Lkw-Fahrer würden das System, unabhängig der Bedingung, in ihrem Lkw nutzen wollen. 30 % präferieren die HMI-Bedingung, 70 % die HMI + ICo-Bedingung.

Um den Einfluss der Vermenschlichung auf die Präferenz zu untersuchen, wird die Stichprobe entsprechend der gewählten Präferenz aufgeteilt und der situative Anthropomorphismus innerhalb jener Gruppen verglichen (Tabelle 7.1; Abbildung 6.16).

Tabelle 6.17: Statistische Auswertung des situativen Anthropomorphismus je nach Präferenz

Präferenz	Bedingung	M	SD	inferenzstatistische Auswertung
HMI	HMI	3,58	0,82	Wilcoxon-Test: $z = -2,21, p < ,05; n = 9$
	HMI + ICo	2,94	0,69	
HMI + ICo	HMI	3,52	0,93	Wilcoxon-Test: $z = 2,47, p < ,05; n = 21$
	HMI + ICo	3,95	0,85	

Die Auswertung des situativen Anthropomorphismus in den unterteilten Gruppen zeigt, dass die Versuchsteilnehmer ihrer präferierten Bedingung jeweils menschlichere Züge zuschreiben.

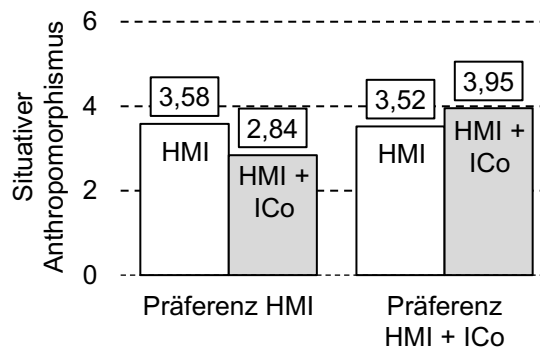


Abbildung 6.16: Mittelwerte des situativ auftretenden Anthropomorphismus [283] je nach Präferenz

6.4 Diskussion der Ergebnisse

Mit der summativen Evaluation erfolgt die finale Evaluation zweier HMI, die kooperatives Verhalten von Lkw-Fahrern während Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen fördern sollen (Forschungsfrage F1; Kapitel 3.2). Die Studie untersucht zudem mögliche Veränderungen der Kooperationsbereitschaft durch eine vermenschlichte HMI (Forschungsfrage F3; Kapitel 3.2). Um diese Veränderungen begründen zu können, werden folgende Qualitäten der HMI erhoben: Akzeptanz, Vertrauen, Usability und User Experience (Forschungsfrage F4; Kapitel 3.2).

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der summativen Evaluation interpretiert und die Studienfragen beantwortet (Kapitel 6.4.1). Es werden die Grenzen der durchgeführten Studie aufgezeigt (Kapitel 6.4.3) und die Erkenntnisse zusammengefasst (Kapitel 6.4.4).

6.4.1 Beantwortung der Studienfragen

Die Beantwortung der Studienfragen unterteilt sich in die Evaluation des kooperativen Fahrverhaltens und der Qualität der HMI.

Kooperatives Fahrverhalten

Zu F3.HMI – Die HMI steigert kooperatives Fahrverhalten: Das kooperative Fahrverhalten der Versuchsteilnehmer kann durch die Nutzung der HMI signifikant gesteigert werden. In der Perspektive des Überholenden um 95 % und in der Perspektive des Überholten um 81 %. Die Überholdauer sinkt um ca. 46 % auf 32,3 s in der Perspektive des Überholenden und um ca. 38 % auf 30,9 s in der Perspektive des Überholten. Damit liegt die Überholdauer deutlich unter den gesetzlich vorgeschriebenen 45 s. Die Null-Hypothese wird verworfen und die H1 Hypothese wird angenommen (Tabelle 6.18):

Tabelle 6.18: Abgeleitete Hypothesen aus der Fragestellung F3.HMI

Kodierung	Hypothese	Entscheidung
H1	Die Nutzung einer HMI steigert kooperative Handlungen	✓
H0	Die Nutzung einer HMI steigert nicht kooperative Handlungen	X

Nachdem die technische Machbarkeit eines CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen durch MERTENS [21] dargestellt wurde, zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass die entwickelte HMI, den Lkw-Fahrer befähigen, dieses CoDAS zu bedienen. Die gemeinsame Wissensbasis ([61, 172, 209]; Kapitel 2.5.1), sowie der koordinierter Abstimmungsprozess ([172, 234]; Kapitel 2.5.2) steigern die Kooperation während Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen.

Die Häufigkeit der Kooperationsabbrüchen ist mit 7 von 52 bzw. 2 von 50 möglichen Kooperation gering. Die Abbrüche führen zu keinem Unfall oder kritischen Fahrsituationen. Kommt es zu einem Abbruch in der Perspektive des Überholenden, sind die Gründe dafür ein zu früher Spurwechsel in den Zuständen 4 - Abstand absichern (pre) und 9 – Abstand absichern (post) (Tabelle 5.2; Kapitel 2.4.4). Da sich diese Abbrüche nur während des ersten Überholmanöver beobachten lassen und keiner der Versuchsteilnehmer das Manöver wiederholt abgebrochen hat, ist zu vermuten, dass sich das mentale Model der Versuchsteilnehmer schnell korrigiert ([64, 67] Kapitel 2.1.4) und langfristig keine systematischen Bedienfehlern zu erwarten sind.

Zu F3.VHMI – Vermenschlichung hat keinen Einfluss auf das Kooperationsverhalten: In der Betrachtung der deskriptiven Statistik ist eine leichte Erhöhung des kooperativen Verhaltens der Versuchsteilnehmer zu sehen. Diese ist jedoch nicht signifikant messbar. Somit wird die Nullhypothese beibehalten (Tabelle 6.19):

Tabelle 6.19: Abgeleitete Hypothesen aus der Fragestellung F3.VHMI

Kodierung	Hypothese	Entscheidung
H1	Die zusätzliche vermenschlichte HMI steigert kooperative Handlungen	X
H0	Die zusätzliche vermenschlichte HMI steigert nicht kooperative Handlungen	✓

Ein Grund hierfür kann das bereits hohe Kooperationsniveau bei der Nutzung des Prototyp 3.0 sein. Weitere Verbesserungen können eventuell nur geringe Änderungen im Kooperationsverhalten bewirken und sind mit den angewandten Methoden nicht messbar.

Durch die hohe Anzahl an kooperativen Überholmanövern sind die Handlungsanweisungen der vermenschlichten HMI in der Interaktion mit den Versuchsteilnehmern überwiegend positiv. Das System muss den Nutzer nicht korrigieren oder ermahnen. Negatives Feedback ist jedoch überzeugender als positives Feedback [137, S. 343]. Die Vermutung ist daher, dass durch häufigere Ermahnungen bzw. negatives Feedback der Einfluss der vermenschlichten HMI auf das Fahrverhalten der Lkw-Fahrer höher wäre.

Die Annahme ist, dass die Vermenschlichung den Lkw-Fahrer intrinsisch und nachhaltig zur Kooperation motiviert und diese Motivation „[...] eine hohe Resistenz gegen weitere [...] Faktoren wie Stress und Zeitdruck aufweist.“ (Kapitel 3.1.2). In dieser Studie kann diese Annahme nicht bestätigt werden. Es wird jedoch gezeigt, dass Vermenschlichung die Kooperationsbereitschaft nicht mindert.

Der Effekt der Vermenschlichung kann sich womöglich erst unter realen Fahrbedingungen messen lassen. Die Untersuchungsmethodik Fahrsimulation ist limitiert [302]. Sie kann zwar Fahrsituationen realistisch abbilden, bleibt jedoch am Ende nur eine Simulation der realen Fahrbedingungen. Es besteht bei einer empirischen Studie außerdem immer die Gefahr, dass der Versuchsteilnehmer so handelt, wie es von den Versuchsleitern vermeintlich gewünscht ist [303, 304]. Des Weiteren hängt die Stärke der Überzeugungskraft (hier der vermenschlichten HMI) davon ab, wie sehr sich der Mensch geistig in die Aufgabe involviert fühlt [136]. Wäre der

Versuchsteilnehmer dem, eingangs beschriebenen, realen Druck und Stress ausgesetzt (Kapitel 2.4.2) könnte das Ergebnis ein anderes sein. Laut Versuchsteilnehmer schafft die Vermenschlichung „[...] eine bessere Atmosphäre“ (Nr. 23), macht die Fahrt „angenehmer“ (Nr. 29), und „[...] lenkt die Aufmerksamkeit auf das Geschehen“ (Nr. 31). Daher ist weiterhin zu vermuten, dass Vermenschlichung einen positiven Effekt auf die Kooperationsbereitschaft hat. Dies wäre in Feld- und Langzeitstudien im Realverkehr weiter zu untersuchen.

Qualität der Fahrer-Fahrzeug Interaktion

Zu F4.A – Die wahrgenommene Akzeptanz wird durch Vermenschlichung nicht geändert:

Die Ergebnisse der summativen Evaluation zeigen auf die Gesamtheit der Stichprobe keinen Unterschied zwischen der wahrgenommenen Nützlichkeit und Zufriedenheit der HMI unter der Nutzung einer vermenschlichten HMI. Somit müssen die Nullhypothesen beibehalten werden (Tabelle 6.20).

Tabelle 6.20: Abgeleitete Hypothesen aus der Fragestellung F4.A

Kodierung	Hypothese	Entscheidung
H1	Die Vermenschlichung steigert die wahrgenommene Nützlichkeit	X
H0 ₁	Die Vermenschlichung steigert nicht die wahrgenommene Nützlichkeit	✓
H1	Die Vermenschlichung steigert die wahrgenommene Zufriedenheit	X
H0 ₂	Die Vermenschlichung steigert nicht die wahrgenommene Zufriedenheit	✓

Zu F4.B – Die wahrgenommene Usability wird durch Vermenschlichung schlechter wahrgenommen:

Die inferenzstatistische Auswertung ergibt einen Trend. Die Usability der HMI wird durch die Vermenschlichung schlechter bewertet. Somit muss die Nullhypothese beibehalten werden (Tabelle 6.21):

Tabelle 6.21: Abgeleitete Hypothesen aus der Fragestellung F4.B

Kodierung	Hypothese	Entscheidung
H1	Die Vermenschlichung steigert die Usability	X
H0	Die Vermenschlichung steigert nicht die Usability	✓

Grund hierfür kann die Wahl zur Methode Wizard-of-Oz [277] sein. Die Methode wird gewählt, um die künstliche Intelligenz hinter der Vermenschlichung zu simulieren ([278]; Kapitel 5.2.1). Der Wizard beobachtet den Versuchsteilnehmer über eine Videokamera und steuert die vermenschlichte HMI über einen Computer. Dies braucht Zeit – es können nicht alle Fragen des Versuchsteilnehmer durch den Wizard ohne Verzögerung beantwortet werden (z.B. „Wie spielte der FC Bayern gestern?“). Der Versuchsteilnehmer hat durch die Vermenschlichung hohe Erwartungen an die HMI, die nicht vollumfänglich erfüllt werden können. Das womöglich inkorrekte mentale Modell ([70, 71]; Kapitel 2.1.4) führt zu Fehlbedienungen und womöglich zu einer negativen Bilanz der wahrgenommenen Usability. Dies zeigt die potenzielle Herausforderung, denen sich Entwickler von einer vermenschlichten HMI konfrontiert sehen [305]. Die Entwicklung des mentalen Modells des Versuchsteilnehmers, das zu den Fähigkeiten der HMI passt,

insbesondere, wenn der Versuchsteilnehmer die menschlichen Qualitäten der HMI als nahezu vollkommen einschätzt, muss Gegenstand zukünftiger Studien sein.

Zu F4.V – Das Vertrauen ändert sich durch Vermenschlichung nicht: Die erhobene Vertrauenswerte sind mit 5,97 (HMI) und 6,09 (HMI + ICo) von 7 möglichen Punkten hoch. Sie zeigen wie bereits die Ergebnisse zur Akzeptanzmessung, keinen Unterschied durch die Nutzung einer vermenschlichten HMI. Somit muss die Nullhypothese beibehalten werden (Tabelle 6.22):

Tabelle 6.22: Abgeleitete Hypothesen aus der Fragestellung F4.V

Kodierung	Hypothese	Entscheidung
H1	Die Vermenschlichung steigert das Vertrauen	X
H0	Die Vermenschlichung steigert nicht das Vertrauen	✓

Dieses Ergebnis widerspricht Erkenntnissen aus Studien mit vermenschlichten HMI-Konzepten im Pkw-Bereich [160–163]. So statten WAYTZ ET AL. [161] ein autonomes Fahrzeug mit menschlichen Charakteristiken (z.B. Name, Geschlecht und natürliche Sprache) aus und messen dadurch ein höheres Vertrauen in das Fahrzeug. Im Vergleich zu einem autonomen Fahrzeug könnten bei dem CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen die Nutzer die Kritikalität grundsätzlich geringer einschätzen, sodass sich das erzeugte Vertrauen auch auf einem anderen Niveau mit anderen Mechanismen befindet. In Studie II (Kapitel 5.1.3), bewerten die Versuchsteilnehmer z.B. die wahrgenommene Kritikalität [264] während Abbruchsituationen als eher niedrig.

Zu F4.UX – Die hedonische Qualität nimmt durch Vermenschlichung zu: In der Auswertung der User Experience zeigt sich eine signifikante Steigerung der wahrgenommenen hedonischen Qualität der HMI. Die Nullhypothese kann abgelehnt werden. Die wahrgenommene pragmatische Qualität ändert sich durch die Vermenschlichung nicht – die Nullhypothese muss beibehalten werden (Tabelle 6.20).

Tabelle 6.23: Abgeleitete Hypothesen aus der Fragestellung F4.UX

Kodierung	Hypothese	Entscheidung
H1	Die Vermenschlichung steigert die pragmatische Qualität	X
H0 ₁	Die Vermenschlichung steigert nicht die pragmatische Qualität	✓
H2	Die Vermenschlichung steigert die hedonische Qualität	✓
H0 ₂	Die Vermenschlichung steigert nicht die hedonische Qualität	X

Die Benchmark-Analyse zeigt einen exzellenten Wert für die wahrgenommene User Experience der HMI, sowohl für die pragmatischen, als auch hedonischen Qualitäten.

Die hedonische Qualität beschreibt die emotionale Reaktion des Nutzers auf ein Produkt [109, 306]. Sie umfasst Attribute wie Freude, Spaß oder Aufregung. Das Ergebnis unterstützt somit die Annahme, dass Vermenschlichung die Beziehung zum Produkt emotionalisiert [112].

6.4.2 Berücksichtigung der Präferenz

Die Akzeptanz resultiert im Nutzungswunsch [77] und weist keinen signifikanten Unterschied zwischen beide Bedingungen auf. Jedoch bevorzugen 70 % der Versuchsteilnehmer die Integration einer zusätzlich vermenschlichten HMI im Lkw. Diese Abweichung zur erwarteten Verteilung wirft die Frage auf, woran die Versuchsteilnehmer ihre Entscheidung festmachen.

Die Aufteilung der Stichprobe nach angegebener Präferenz ergibt, dass die Versuchsteilnehmer die Bedingung präferieren, die sie für menschenähnlicher empfinden. Dies bestätigt die Annahme, dass der Anthropomorphismus sich nicht linear zur Vermenschlichung verhält [123], sondern von individuellen Gründen abhängt [125] (Kapitel 2.3.1). Umso deutlicher wird, dass eine vermenschlichten HMI für die spätere Integration adaptierbar sein muss (Anforderung A7; Tabelle 4.5; Kapitel 4.2.2).

6.4.3 Limitation

Folgendes Kapitel zählt Störgrößen auf, die die Reliabilität und Validität dieser Studie einschränken.

Probandenkollektiv

Die Versuchsteilnehmer sind aus einer Datenbank des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München rekrutiert. Sie haben bereits mindestens einmal an einer Fahrsimulatorstudie teilgenommen. Daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Ergebnisse durch die Erfahrungen der Versuchsteilnehmer mit Fahrsimulatorstudien oder Erprobung neuer Assistenzsysteme beeinflusst sind. Die Versuchsteilnehmer haben sich freiwillig als Testperson gemeldet - das Probandenkollektiv besteht aus Lkw-Fahrern, die Interesse an neuen Technologien bzw. der aktuellen Forschung zeigen. Ein möglicher Einfluss auf die Ergebnisse kann nicht ausgeschlossen werden.

Übersteigertes Vertrauen

Die hohe Kooperationsrate zeigt, dass der Lkw-Fahrer mit der entwickelten HMI in der Lage ist, den Anweisungen des CoDAS zu folgen. Das CoDAS empfiehlt dem Lkw-Fahrer, über die HMI zu einem bestimmten Zeitpunkt einen Spurwechsel durchzuführen (Zustand 6 bzw. 8; Tabelle 2.3; Kapitel 2.4.4). Die Querführung liegt weiterhin in der Verantwortung des Lkw-Fahrers, der sich vor einem Spurwechsel vergewissern muss, dass die entsprechende Spur frei ist. In dieser Studie wird nicht untersucht, ob die Versuchsteilnehmer dieser Pflicht nachkommen. Es ist nicht auszuschließen, dass die Versuchsteilnehmer ein übersteigertes Vertrauen ([86]; Kapitel 2.2.1) in das System haben und den rückwärtigen Verkehr missachten. Besonders unter der Annahme, dass dieses CoDAS seine Marktreife zu einem Zeitpunkt erlangt, wenn Fahrzeuge mit unterschiedlichem Automationsgrad fahren, sind weitere Untersuchungen zu dieser Fragestellung erforderlich.

Wirkung der Vermenschlichung und des Anthropomorphismus

Es wird angenommen, dass Effekte durch die vermenschlichte HMI entstehen, wenn ein situativer Anthropomorphismus [122] und/oder die Tendenz zu Anthropomorphisieren [125]

vorliegt (Kapitel 2.3.1). Hierfür wird in dieser Studie die Skala zur Messung des Anthropomorphismus der GQS (situativer Anthropomorphismus) und der IDAQ-Wert (Tendenz zu Anthropomorphisieren) erhoben. Die interne Konsistenz der GQS-Skala wird jedoch als fragwürdig deklariert nach [298, S. 800].

Die Auswertung der Daten zu der GQS-Skala ergibt keine Unterschiede zwischen den zwei Bedingungen in der Gesamtheit der Stichprobe. Dies widerspricht Ergebnissen aus Studien anderer Disziplinen, in denen ebenfalls die GQS-Skala als Erhebungsinstrument genutzt wird [307]. ZLOKOWTZI [123] zeigt mittels der Erhebung, dass durch das Hinzufügen von Emotionen, der situative Anthropomorphismus in der Interaktion mit einem Roboter steigt. In der summativen Evaluation werden ebenfalls Emotionen als menschliche Charakteristik hinzugefügt, lösen bei dieser Stichprobe jedoch kein Anthropomorphismus aus. Der generelle Zusammenhang, wie von [123] beschrieben, kann also im Kontext einer vermenschlichten HMI im Lkw nicht bestätigt werden. Die Mechanismen zur Erzeugung eines situativen Anthropomorphismus sind nicht vollkommen verstanden und beruhen vermutlich auf individuellen Faktoren, aus denen sich mit dem aktuellen Forschungsstand kein eindeutiger Wirkzusammenhang ableiten lassen [308].

In der Evaluation wird die zusätzliche Nutzung einer vermenschlichten HMI getestet, nicht die Vermenschlichung selbst. Das bedeutet, die Bewertungen der Vermenschlichung erfolgt nicht isoliert von der Bewertung der nicht-vermenschlichten HMI.

Grenzen der Wizard-of-Oz Methode

Die Grenzen der Fahrsimulation sind bereits in Kapitel 6.4.1 thematisiert. Hier soll kurz auf die Limitation der Wizard-Of Oz Methode ([277]; Kapitel 5.2.1) eingegangen werden.

Durch den Versuchsaufbau bewertet der Versuchsteilnehmer die vermeintliche Interaktion mit dem Gegenstand – tatsächlich bewertet dieser jedoch die Interaktion mit dem Wizard [309]. Daher wird versucht, Störvariablen durch den Wizard zu reduzieren, indem die Anzahl an Wizards geringgehalten wird (in dieser Studie zwei) und/oder ein vordefiniertes Skript dem Wizard zur Verfügung steht. Ein Einfluss kann jedoch nicht ganz ausgeschlossen werden.

Der Wizard reagiert indem er die Versuchsteilnehmer beobachtet und versucht, die Intelligenz der vermenschlichten HMI zu imitieren. Die Spracherkennung wird jedoch in naher Zukunft noch nicht perfekt sein [309]. Das bedeutet, die gewonnenen Erkenntnisse beruhen auf eine perfekte Vermenschlichung, die so nicht in ein marktreifes System einfließen wird. Eine Alternative zur Wizard-Of-Oz Methode, wäre die Ghost-in-the-Machine Methode [310], in der der Wizard (Ghost) als Grundlage für seine Entscheidung kein Video, sondern die Output-Daten der Sensorik erhält (z.B. Output der Spracherkennung). Damit hätte die Interaktion im Versuchsaufbau eine höhere Ähnlichkeit mit einer Mensch-Maschine Interaktion, anstatt einer Mensch-Mensch Interaktion.

6.4.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die summative Evaluation liefert folgende Erkenntnisse zur Beantwortung der in dieser Arbeit formulierten Forschungsfragen F3 & F4 (Kapitel 3.2):

- **F3 – Wie wirkt sich die Vermenschlichung einer HMI auf die Kooperationsbereitschaft bei Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen aus?**

Die Ergebnisse der Studie ergeben, dass sich die Kooperationsbereitschaft der Lkw-Fahrer nicht signifikant ändert. Die deskriptive Statistik zeigt, dass mit der HMI

ohne eine Vermenschlichung bereits eine hohe Bereitschaft erzielt wird. Die zusätzliche Vermenschlichung erhöht oder verringert diese Bereitschaft nicht.

- **F4 – Wie wirkt sich Vermenschlichung auf die Fahrer-Fahrzeug Interaktion bezüglich der wahrgenommenen Usability, Vertrauen, Akzeptanz und User Experience aus?**

Einflüsse der Vermenschlichung auf die Usability und User Experience sind messbar. Die Usability wird tendenziell schlechter wahrgenommen, liegt jedoch noch immer im exzellenten Bereich. Hierbei zeigt sich die Herausforderung, dass durch ein vermenschlichtes Design keine zu hohen Erwartungen beim Nutzer erzeugt werden sollten, die womöglich durch eine künstliche Intelligenz nicht befriedigt werden können. Die Werte der User Experience unterstützen die These, dass Vermenschlichung Emotionen hervorrufen. Die hedonischen Qualitäten nehmen durch Vermenschlichung zu. Die Mehrheit der befragten Lkw-Fahrer möchten die vermenschlichte HMI nutzen. Dies wird durch die hohen Akzeptanz- und User Experience Werte untermauert.

7 Diskussion und Ausblick

Im Folgenden wird der Beitrag dieser Arbeit zur Gestaltung einer HMI für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen diskutiert. Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit werden in konkrete Gestaltungsempfehlungen überführt (Kapitel 7.1.1). Es wird ein Ausblick auf die nächsten Schritte im Entwicklungsprozess der HMI gegeben (Kapitel 7.1.2). Zudem wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf höhere Automationsstufen (SAE-Level > 1) erörtert (Kapitel 7.1.3). Zum Abschluss werden die Erkenntnisse dieser Arbeit bezüglich vermenschlichter HMI im Lkw zusammengefasst (Kapitel 7.2.1) und weitere Use Cases für diese Gestaltungsform im Lkw gesammelt (Kapitel 7.2.2).

7.1 Erhöhung der Kooperationsbereitschaft

Im Verlauf dieser Arbeit wurde die stufenweise Entwicklung einer HMI für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen beschrieben. Über die Iterationsschritte hinweg konnte die erzielte Kooperationsrate kontinuierlich gesteigert werden: auf 87 % in der Perspektive des Überholenden und 96 % in der Perspektive des Überholten (Abbildung 7.1).

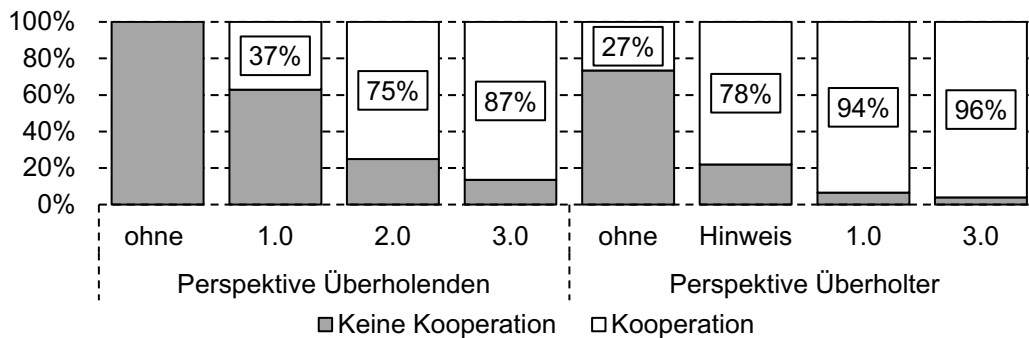


Abbildung 7.1: Erhöhung der Kooperationsrate über den Verlauf der HMI-Entwicklung

Nachdem MERTENS in seiner Arbeit [21] die technische Machbarkeit eines CoDAS für Lkw-Überholassistenten bewiesen hat, zeigt die vorliegende Arbeit, dass der Lkw-Fahrer durch die entwickelte HMI dieses System effektiv nutzen kann und will: Die Fahrer beginnen das Manöver erst, nachdem sie in den Streckenabschnitt eingefahren sind, der hierfür von dem CoDAS als geeignet berechnet wurde und über die HMI an den Fahrer übermittelt wurde. Sie scheren aus, wenn der systemseitig abgesicherte Abstand zum Vorderfahrzeug erreicht wurde und passen ihre Geschwindigkeit in der Rolle des Überholenden und Überholten entsprechend der Vorgaben der HMI an. Auch der Spurwechsel beim Einscheren erfolgt auf die Weisung der HMI hin, dass durch V2X-Kommunikation einen geringeren Abstand im Vergleich zu den aktuellen gesetzlichen Vorgaben ermöglicht. Durch die Entwicklung der HMI für das CoDAS für Lkw-

Überholmanöver, leistet diese Arbeit, einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und -effizienz sowie Arbeitsklima des Lkw-Fahrers.

7.1.1 Wesentliche Gestaltungsempfehlungen

Die Herausforderungen in der Gestaltung einer HMI für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen sind unter anderem die Schaffung einer gemeinsamen Wissensbasis (Kapitel 2.5.1) und die Koordination eines Abstimmungsprozess aller Manöver-Beteiligten (Kapitel 2.5.2). Im Folgenden werden die aus dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse in Gestaltungsempfehlungen überführt.

Gestaltungsempfehlungen für eine gemeinsame Wissensbasis: Wie bereits Studien aus dem Pkw-Bereich empfehlen ([209, 210]; Kapitel 2.5.1), zeigen die durchgeführten Studien dieser Arbeit, dass die Visualisierung des Kooperationspartners, des kooperativen Fahrmanövers, sowie des Fortschritts der Kooperation für eine gemeinsame Wissensbasis förderlich sind. Eine statische Darstellung des Kooperationspartners und der Situation ist im Vergleich zu einer dynamischen Darstellung für diesen Zweck allerdings ausreichend (Studie I; Kapitel 5.1.2).

Wesentliche Informationen zur Beschreibung des Kooperationspartners sind dessen Geschwindigkeit sowie dessen Abstand zum Ego-Fahrzeug (Befragung I; Kapitel 4.2.1, Studie I; Kapitel 5.1.2). Diese sind für die Interpretation der Hilfsbedürftigkeit des Kooperationspartners und der Kostenbewertung der Kooperation entscheidende Größen [17]. Sie schaffen Transparenz und ermöglichen, das kooperative Verhalten des Partners nachzuvollziehen [184]. Die Unterteilung der Kooperation in die zehn Zustände des CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen schafft den Ablauf zur Anzeige der notwendigen Informationen (Studie I; Kapitel 5.1.2, Studie II; Kapitel 5.1.3).

Haben beide Fahrzeuge der Kooperation zugestimmt, entsteht eine virtuelle Verbindung, die durch eine Visualisierung dem Fahrer zurückgemeldet werden sollte (Studie I; Kapitel 5.1.2). Eine farbliche Kodierung des Kooperationspartners zeigt dem Lkw-Fahrer, wann eine Kooperation stattfindet und Fahrzeugdaten ausgetauscht werden.

Die möglichen Kosten einer Kooperation werden durch ein relatives Geschwindigkeitsspektrum (eingestellte Hysterese; Kapitel 2.4.4) visualisiert, innerhalb dessen das CoDAS agieren kann. Der Lkw-Fahrer kann das Verhalten des CoDAS abschätzen und damit eine Entscheidungsgrundlage für oder gegen die Kooperation treffen (Summative Evaluation; Kapitel 6).

Gestaltungsempfehlungen für den Abstimmungsprozess: Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass es sinnvoll ist dem Lkw-Fahrer nur eine Kooperationsmöglichkeit anzubieten (z.B. Bremsen). Die Wahl dem Fahrer zu überlassen (z.B. Ansage „*Bitte Kooperieren!*“), führt zu weniger Kooperation (Studie 0; Kapitel 4.1).

Um Fehlbedienungen auszuschließen bzw. eine hohe Usability zu erreichen, empfiehlt es sich, die Kommunikation zwischen den Kooperationspartnern zu automatisieren. Anders als Studien aus dem Pkw-Bereich suggerieren [175, 209, 210, 213], zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass ein erforderliches manuelles Starten oder Zustimmung zu weniger Kooperationen führen (Studie I; Kapitel 5.1.2, Studie II; Kapitel 5.1.3).

Um eine hohe Kooperationsrate zu erzielen und dennoch eine Partizipation der Lkw-Fahrer zu ermöglichen [209, 210], sollte eine Kooperationsanfrage aktiv abgelehnt anstatt aktiv angenommen werden (Summative Evaluation; Kapitel 6).

Handlungsanweisungen sollten eindeutig und möglichst als Kombination von Text und Symbolen gestaltet werden (Studie II; Kapitel 5.1.3, Summative Evaluation; Kapitel 6). Es konnte gezeigt werden, dass beispielsweise die Anzeige einer farblichen Kodierung des Fahrbahnrandes (z.B. grün) zusammen mit einem Richtungspfeils und der Handlungsanweisung in Text-Form (z.B. „jetzt“), die Kooperationsrate für einen Spurwechsel (Zustand 6 und Zustand 8, Tabelle 5.2; Kapitel 2.4.4) erhöht. Der zeitliche Horizont bis zum Spurwechsel sollte anhand von Metern angegeben werden. Auch hier ist eine farbliche Kodierung des Fahrbahnrandes (z.B. gelb) sinnvoll, um vorzeitige Spurwechsel zu vermeiden.

Kommt es dennoch zu Fehlbedienungen oder ungewolltem Übersteuern, sollte eine Rückfallebene einen unerwünschten vorzeitigen Abbruch der Kooperation verhindern. Dem Fahrer wird angezeigt, dass er durch seine aktuellen Fahr- und Lenkbewegungen das geplante Manöver übersteuert. Gleichzeitig, kann er durch eine angepasste Fahrweise die Kooperation fortführen, ohne den Abstimmungsprozess erneut zu initiieren (Summative Evaluation; Kapitel 6).

Aus den beschriebenen Empfehlungen lassen sich zehn Maxime für die Entwicklung dieser HMI ableiten (Tabelle 7.1):

Tabelle 7.1: Zehn Gestaltungsempfehlungen für einer HMI für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen

Adressierte Herausforderung	Empfehlung	Evaluation
Gemeinsame Wissensbasis	Visualisiere den Kooperationspartner!	[209], Studie I
	Visualisiere das kooperative Fahrmanöver!	[209], Studie I
	Visualisiere den Fortschritt der Kooperation!	[210], Studie I & II
	Visualisiere die Verbindlichkeit der Kooperation!	Studie I
	Visualisiere die Kosten einer Kooperation!	Summative Evaluation
Abstimmungsprozess	Beschränke die Kooperationsmöglichkeit auf eine!	Studie 0
	Automatisiere die Kommunikation zwischen den Kooperationspartnern!	Studie I & II
	Visualisiere Handlungsanweisungen durch Text und Symbol!	Studie II, Summative Evaluation
	Bevorzuge aktives Ablehnen gegenüber aktivem Annehmen!	Summative Evaluation
	Gestalte eine Rückfallebene, um bei Bedienfehler die Kooperation aufrechtzuerhalten!	Summative Evaluation

7.1.2 Weiterer Forschungsbedarf

Der nächste Schritt ist die Implementierung der HMI im Fahrzeug. Feldstudien mit der HMI unter der Nutzung des CoDAS können Aufschluss über das Nutzungsverhalten unter realen Fahrbedingungen geben. Relevant sind Informationen über die Nutzungsdauer, Anzahl erfolgreicher oder abgebrochener kooperativer Überholmanöver. Die gewonnenen Daten können wiederum, wie von MERTENS angedacht [21, S. 81], in einer Verkehrssimulation integriert und damit die

Auswirkungen auf den Gesamtverkehr simuliert werden. Dadurch wäre eine Einschätzung möglich, inwieweit kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen den Lkw aus dem in Kapitel 2.4.2 beschriebenen Dilemma befreien könnten.

Aussagen der Versuchsteilnehmer in den Nachbefragungen der Studien zeigen, dass neben der Entwicklung einer HMI für das CoDAS noch weitere Maßnahmen nötig sind: Es bedarf einer gesetzlichen Regelung, die für den verringerten Sicherheitsabstand, der durch das CoDAS ermöglicht wird, einen Rahmen schafft. Außerdem muss der Pkw-Fahrer in den Kooperationsprozess eingebunden und „[...] ebenfalls zur Kooperation motiviert werden“, um z.B. dem Lkw mit ausreichend Abstand einen Spurwechsel zu ermöglichen (Nr.6; summative Evaluation; Kapitel 6). Zudem besteht das Problem, dass nicht der Lkw-Fahrer selbst, sondern der Spediteur den Lkw kauft. Wenn der Arbeitgeber bereits die Fahrer aufgrund von Kostendruck anweist, bei Ruhe und Lenkzeiten gegen das Gesetz zu verstoßen, wird er aller Voraussicht kein Geld für ein Assistenzsystem ausgeben, das den Fahrer anhält, für andere seine Geschwindigkeit zu reduzieren [311].

7.1.3 Übertragbarkeit auf höhere Automatisierungsgrade

Die Ergebnisse zeigen, dass die Versuchsteilnehmer es akzeptieren, dass ein CoDAS (SAE Level 1) für eine Kooperation während Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen, die Geschwindigkeiten anpasst und Sicherheitsabstände reduziert - vorausgesetzt, die für sie notwendigen Informationen werden über die entwickelte HMI dargestellt.

Die Erweiterung des CoDAS in ein SAE-Level 2 bzw. 3 System würde dazu führen, dass der Lkw-Fahrer den vorgeschlagenen Spurwechsel nicht mehr selbst durchführen muss, jedoch immer zur Übernahme im Falle eines Systemfehlers bereit ist. Damit wäre der vorzeitige Spurwechsel unterbunden und der Anteil von Kooperationsabbrüchen könnte weiter reduziert werden. Die Bereitstellung der geeigneten Informationen durch die HMI wären vermutlich weiterhin nötig, um dem Lkw-Fahrer die Transparenz über das Fahrzeugverhalten zu geben ([72]; Kapitel 2.1.5), Andernfalls könnte womöglich der Fahrer das System übersteuern und eine bereits anlaufende Kooperation aufgrund falsch interpretierten Verhalten seines Fahrzeugs abbrechen, wodurch die Sicherheit der Manöverbeteiligten gefährdet werden könnte [234, 312]. Weiterer Forschungsbedarf besteht darin, etwaige zusätzliche Informationen und Handlungsanweisungen zu ermitteln, sodass eine notwendige Übernahme während einer Kooperation sicher erfolgen kann. RICHARDSON [242] liefert zu Übernahmeszenarien im Lkw erste Erkenntnisse.

Bei SAE-Level 4-Systemen stellt sich die Frage, inwieweit Lkw-Fahrer Informationen über kooperative Fahrmanöver und dessen Abstimmungsprozess benötigen. Hierzu gibt es erste Untersuchungen aus dem Pkw-Bereich [313], die darauf schließen lassen, dass die Transparenz des Systems über die Darstellung einer HMI von Bedeutung sein wird, um das Vertrauen der Lkw-Fahrer aufrechtzuerhalten [51], vorausgesetzt der Lkw-Fahrer sitzt noch im Fahrzeug.

Automatisierte Fahrzeuge werden sich regelkonform verhalten und sich dadurch defensiv und langsam bewegen [312]. Verhalten sich automatisierte Fahrzeuge ähnlich dem Menschen, werden sie vermutlich eher akzeptiert. Das heißt das Fahrzeug muss befähigt werden zu kooperieren. Diese Studie liefert einen Beitrag wie automatisierte Lkw kooperative Überholmanöver auf Autobahnen ausführen können, damit die Lkw-Fahrer sie akzeptieren.

7.2 Gesteigerter Nutzen durch Vermenschlichung

In dieser Arbeit wurde iterativ eine vermenschlichte HMI für die Nutzergruppe Lkw-Fahrer entwickelt. Hierzu wurden unterschiedliche menschliche Charakteristiken einer HMI hinzugefügt und deren Auswirkungen auf die Kooperationsbereitschaft, Akzeptanz, Vertrauen, Usability und User Experience gemessen. Anhand der Ergebnisse wurde die vermenschlichte HMI optimiert und in der summativen Evaluation den gesteigerten Nutzen dieser vermenschlichten HMI erhoben. Über die Iterationsschritte hinweg konnte die erzielte Kooperationsrate in der Perspektive des Überholten durch die Interaktion mit der vermenschlichten HMI auf 85 % gesteigert werden. In Kombination mit der in Kapitel 7.1 beschriebenen nicht vermenschlichten HMI ergibt sich eine Kooperationsbereitschaft von 100 %. Dies zeigt, dass durch einen einfachen Hinweis des vermenschlichten HMI bereits eine Steigerung der Kooperation in der Perspektive des Überholten erreicht werden kann. Die maximale Kooperationsbereitschaft kann jedoch nicht ohne eine nicht vermenschlichte HMI erzielt werden.

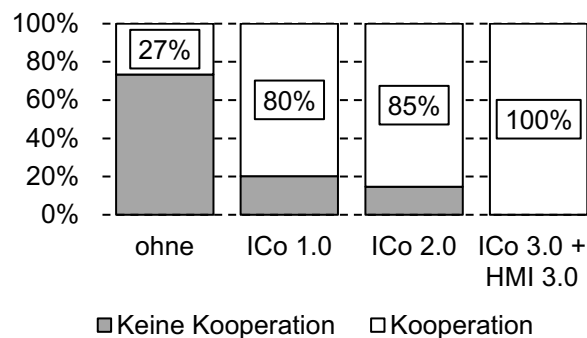


Abbildung 7.2: Erhöhung der Kooperationsrate in der Perspektive des Überholten über den Verlauf der Entwicklung der vermenschlichten HMI ICo

7.2.1 Weitere Erkenntnisse

Die Lkw-Fahrer bevorzugen einen virtuellen Assistenten: Basierend auf den Ergebnissen der Studie III (Kapitel 5.2.2) und Studie IV (Kapitel 5.2.3) sollte eine vermenschlichte HMI im Lkw einem virtuellen Assistenten entsprechen, der über folgende menschliche Charakteristiken verfügt:

- Psychologische Merkmale: Identität, Emotionen
- Physische Merkmale: Gestalt, Mimik
- Sprache: Verbal, Para-Verbal

Die Lkw-Fahrer wünschen sich einen adaptierbaren Assistenten: Neben der Integration der genannten menschlichen Charakteristiken empfiehlt sich eine adaptive Gestaltung der vermenschlichten HMI. Die Ergebnisse aus der Befragung II (Kapitel 4.2.2), sowie Aussagen der Studienteilnehmern in den Folgeinterviews nach Studie III und IV zeigen, dass die Lkw-Fahrer den virtuellen Assistenten auf ihre Bedürfnisse anpassen wollen. Zum Beispiel soll individuell entschieden werden können, ob ein Gesicht des Assistenten angezeigt wird oder nicht.

Der situative Anthropomorphismus ist unabhängig vom Grad der Vermenschlichung: Die Annahme dieser Arbeit ist, dass mit steigender Vermenschlichung der situativ wahrgenommene Anthropomorphismus steigt. Dieser wiederum führt zu einer höheren Akzeptanz und einem

gesteigerten Nutzen. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass der situative Anthropomorphismus unabhängig vom Grad der Vermenschlichung wahrgenommen wird. Allerdings beeinflusst dieser die Präferenz und den Nutzungswunsch positiv (summative Evaluation; Kapitel 6.3.4). Dieses Erkenntnis unterstützt die Empfehlung, dem Lkw-Fahrer die Möglichkeit zu geben, den für ihn passenden Assistenten selbst zu konfigurieren.

Die Lkw-Fahrer wünschen sich einen reaktiven und initiierenden Assistenten: Neben Auskünften, möchten die Lkw-Fahrer eine vermenschlichte HMI, die ihnen die Arbeit erleichtert (Befragung I und Studie IV). Zum Beispiel unterstützt der Assistent bei der Planung von Ruhe- und Lenkzeiten, der Kommunikation mit dem Disponenten oder macht den Lkw-Fahrer auf vorausliegende Ereignisse auf der Strecke aufmerksam.

Eine vermenschlichte HMI steigert die hedonische Qualität der Interaktion: Die Vermenschlichung hat den Effekt, dass die Lkw-Fahrer die Interaktion mit der HMI interessanter, freudiger und aufregender empfinden (Studie IV und summative Evaluation). Sie interagieren mit einer vermenschlichten HMI häufiger, insbesondere, wenn diese eine Gestalt und Mimik hat.

Eine vermenschlichte HMI hat einen positiven Einfluss auf die Fahrperformanz: In Studie IV zeigten die Lkw-Fahrer eine höhere Spurhaltequalität, wenn sie mit einer vermenschlichten HMI interagierten. Die Vermutung ist, dass die Fahrer durch die Interaktion weniger in die Monotonie der Fahraufgabe verfallen.

7.2.2 Weiterer Forschungsbedarf

Die User Experience wird mit Zunahme der Automation im Fahrzeug eine immer größere Rolle spielen [314]. Diese Arbeit zeigt, dass die hedonische Qualität – das emotionale Erleben der Fahrer-Fahrzeug Interaktion mit der Vermenschlichung steigt. Die Fahrer selbst präferieren die vermenschlichte HMI, weil sie unter anderem vor Langeweile schützt und Freude bereitet (*„Ich empfinde es als erfrischend, wenn Informationen aufheiternder übergebracht werden und nicht nur plump“* Nr. 15; summative Abschlussevaluation; Kapitel 6). Bezogen auf den dynamischen kognitiven Prozess des Anthropomorphismus, der bei der Nutzung vermenschlichter Technologien ausgelöst wird (Kapitel 2.3.1), sollte in Langzeitstudien im Lkw überprüft werden, ob dieser positive Effekt mit der Nutzungsdauer abnimmt oder sich verfestigt, bzw. verstärkt.

Der Lkw wird in Zukunft weiter an Kompetenz bzgl. der Fahraufgaben (Kapitel 2.1.1) gewinnen. Der Fokus der Fahrer-Fahrzeug Entwicklung wird daher weniger die Unterstützung des Fahrers bei der Bewältigung der Fahraufgabe sein, sondern ab SAE-Level 3 dem Fahrer das Verhalten des Fahrzeugs transparent zu machen und seine Aufmerksamkeit für etwaige Übernahme zu sensibilisieren. Diese Arbeit zeigt anhand der Ergebnisse aus Studie IV (Kapitel 5.2.3) und Fahreraussagen (z.B. *„Sprechen ist gut gegen die Langeweile“* Nr. 2 - summative Abschlussevaluation; Kapitel 6), dass Lkw-Fahrer durch die Interaktion mit einer vermenschlichten HMI ihre Fahraufgabe anhand objektiv gemessener Fahrdaten besser meistern. Dies wird bestätigt durch Studien aus dem Pkw-Bereich [164]. Ist der Lkw-Fahrer von der komplexen Fahraufgabe befreit und nimmt eine beobachtende und überwachende Rolle ein, droht ihm der passive Ermüdungszustand [164]. Es ist zu vermuten, dass eine vermenschlichte Interaktion, den Lkw-Fahrer vor dieser Ermüdung bewahren könnte [164], was in weiteren Studien zu verifizieren ist.

8 Zusammenfassung

Die Arbeitsbelastung von Lkw-Fahrer ist hoch: Durch die Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Ruhezeiten zusammen mit den Anforderungen an eine pünktliche Lieferung der transportierten Ware entsteht ein hoher Zeit- und Leistungsdruck.

Ein nur um wenige Stundenkilometer langsamer fahrender Lkw vor ihnen führt sie in ein Dilemma. Um nicht durch das langsamere Fahrzeug Zeit zu verlieren, überholt der Lkw-Fahrer. Der Lkw-Fahrer versucht die Zeit, in der er die linke Spur blockiert, zu minimieren. Er fährt dazu beim Spurwechsel nah auf das vordere Fahrzeug auf, unterschreitet den gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheitsabstand von 50 m, wechselt abrupt auf die linke Spur und überholt ohne Beachtung der zugelassenen Höchstgeschwindigkeit. Dieses rasche Manöver wiederholt er beim Wiedereinschwenken, indem er knapp vor dem überholten Lkw auf die rechte Spur fährt. Neben einem erhöhten Sicherheitsrisiko und einer schlechten Energieeffizienz durch die überhöhte Geschwindigkeit, sorgt dieses Fahrmanöver für ein erhöhtes Konfliktpotential zwischen den Verkehrsteilnehmern. Die steigende Auslastung der Straße verstärkt den Konflikt zusätzlich.

Eine Lösung aus dem Dilemma Zeit vs. Effizienz vs. Konfliktpotential mit anderen Verkehrsteilnehmern ist die Nutzung eines CoDAS (Cooperative Driver Assistance System). Mithilfe von kollektiver Sensorik kann das Überholmanöver zwischen den Verkehrsteilnehmern abgestimmt werden. Das CoDAS berechnet den idealen Streckenabschnitt, -zeitpunkt sowie die Geschwindigkeit für ein Überholmanöver. Durch V2X (Vehicle-to-everything)-Technologie kann der reduzierte Sicherheitsabstand abgesichert werden, wodurch sich die Überholstrecke und damit die Überholzeit nochmals reduzieren lässt.

Der Stand der Wissenschaft zeigt, dass solch ein System technologisch machbar und zeitnah umgesetzt werden könnte. Der Erfolg dieses CoDAS hängt jedoch maßgeblich von der Nutzung ab. Hierfür muss der Lkw-Fahrer zum einen in der Lage sein, das CoDAS zu nutzen, zum anderen es nutzen wollen. Es benötigt die Motivation der Lkw-Fahrer, durch ihre Kooperationsbereitschaft die Sicherheit und Verkehrseffizienz für alle zu erhöhen. Das bedeutet für den Fahrer in der Perspektive des Überholenden seinen Überholwunsch solange zurückzustellen, bis der ideale Ort und Zeitpunkt erreicht ist. In der Perspektive des Überholten die Geschwindigkeit zu reduzieren, sodass das Manöver zügig abgeschlossen werden kann. Verantwortlich für die Bedienbarkeit und die Motivation ist die HMI (Human-Machine Interface). Eine HMI für ein CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen existiert bislang nicht.

Die Analyse des Stands der Wissenschaft ergibt drei wesentliche Herausforderungen für die Gestaltung einer HMI für das CoDAS: (1) eine gemeinsame Wissensbasis der Kooperationspartner, (2) ein Abstimmungsprozess zwischen den Kooperationspartner und (3) die Zustimmung der Partner zur Kooperation. Letzteres betont die Notwendigkeit von Motivationsstrategien zur Erhöhung der Kooperationsbereitschaft von Lkw-Fahrern.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Gestaltung einer Fahrer-Fahrzeug Interaktion für das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen, durch die Entwicklung einer HMI. Diese soll eine

gemeinsame Wissensbasis schaffen und einen Abstimmungsprozess zwischen den Kooperationspartnern ermöglichen. Parallel wird ein HMI-Konzept entwickelt, das besonders auf die Erhöhung der Kooperationsbereitschaft von Lkw-Fahrern abzielt. Hierzu wird ein Ansatz untersucht, der bereits in verschiedenen Anwendungsbereichen positive Wirkung erzielt: Anthropomorphismus und Vermenschlichung werden genutzt, um Technologie für den Nutzer überzeugender zu gestalten. In dieser Arbeit wird evaluiert, ob eine vermenschlichte HMI im Lkw den Lkw-Fahrer überzeugen kann häufiger zu kooperieren.

Mithilfe des iterativen, nutzerzentrierten Entwicklungsansatzes werden zwei HMI-Konzepte entwickelt und evaluiert. Hierfür werden neben drei qualitativen Experten- und Nutzerbefragungen, sechs Fahrstudien durchgeführt. Beide HMI-Konzepte durchlaufen separat voneinander zwei Optimierungsschleifen (Prototyp 1.0, 2.0 und 3.0). In einer summativen Evaluation werden die finalen Prototypen abschließend analysiert und den Einfluss der Vermenschlichung quantifiziert. Es werden neben der Kooperationsbereitschaft auch die Usability, das Vertrauen, die Akzeptanz und die User Experience analysiert.

Als Ergebnis entsteht (1) ein HMI-Konzept, das ein klassisches Anzeige- und Bedienkonzept im Instrumentencluster darstellt und über das Multifunktionslenkrad bedient wird. Die GUI liefert den Kooperationspartnern die Informationsinhalte und -abfolge, die sie brauchen, um gemeinsam ein erfolgreiches kooperatives Lkw-Überholmanöver durchzuführen. Die summative Evaluation zeigt, dass Lkw-Fahrer das HMI-Konzept nutzen können und nutzen wollen.

Daneben entsteht (2) eine vermenschlichte HMI, die in Form des virtuellen Assistenten namens ICo mit den Lkw-Fahrern interagiert. ICo hat eine Identität und kann über Sprache und Mimik verschiedene Emotionen darstellen. Die summative Evaluation zeigt, dass die Lkw-Fahrer das klassische HMI in Kombination mit ICo einer reinen klassischen HMI bevorzugen. Die Vermenschlichung hat dabei keinen Einfluss auf die Kooperationsbereitschaft, Usability, Akzeptanz und Vertrauen. Jedoch steigert ICo die wahrgenommene hedonische Qualität der Interaktion.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Ein Lkw-Überholmanöver auf einer Autobahn	2
Abbildung 1.2:	Aufbau der Arbeit	4
Abbildung 2.1:	Vereinfachte Darstellung des Fahrer-Fahrzeug Regelkreis nach [40, S. 29]..	8
Abbildung 2.2:	Automatisierungsgrad nach SAE Level Stufen [49].....	8
Abbildung 2.3:	Erweiterung des Fahrer-Fahrzeug Regelkreis um ein ADAS und der Integration einer HMI in der Fahrer-Fahrzeug Interaktion in Anlehnung an [63, S. 33]	9
Abbildung 2.4:	Mentales, präsentiertes und implementiertes Modell der Interaktionsgestaltung nach [66, S. 51].....	10
Abbildung 2.5:	Modell des Situationsbewusstsein im Informationsverarbeitungsprozess nach [72, S. 532]	11
Abbildung 2.6:	Technologieakzeptanzmodell nach Davis [77, S. 476].....	12
Abbildung 2.7:	Vertrauensmodell nach Hoff & Bashir [92, S. 427] bezogen auf das ADAS .	13
Abbildung 2.8:	User Experience Lebenszyklus nach [104, S. 312]	14
Abbildung 2.9:	Das CUE-Modell (Components of User Experience) nach [105, S. 262].....	15
Abbildung 2.10:	Dynamik des Anthropomorphismus nach [120, S. 226]	17
Abbildung 2.11:	Fahrzeugbewegung und Fahraufgabe bei einem Lkw-Überholmanöver auf der Autobahn nach [165, S. 15, 166, S. 20, 167, S. 266]; S_A = Sicherheitsabstand, F_L = Fahrzeuglänge	20
Abbildung 2.12:	Dilemma des Lkw-Fahrers zwischen Sicherheit, Zeit, Effizienz und Konflikte mit anderen Verkehrsteilnehmern	21
Abbildung 2.13:	Entscheidungsprozess für kooperativen Verhalten im Straßenverkehr nach [17, S. 172]	22
Abbildung 2.14:	Phasen der Kooperation im Straßenverkehr nach [190, S. 9].....	23
Abbildung 2.15:	Roadmap für die Entwicklung der V2X-Kommunikationstechnologie nach [21, S. 14, 195]	25
Abbildung 3.1:	Nutzerzentrierter Entwicklungsprozess nach DIN EN ISO 9241-210 [241] ..	37
Abbildung 3.2:	Studien in den jeweiligen Phasen des Nutzerzentrierten Entwicklungsprozess für das nicht vermenschlichte und vermenschlichte HMI-Konzept.....	38
Abbildung 3.3:	Dynamischer Lkw-Fahrsimulator des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München.....	39

Abbildung 3.4:	Dynamische Sitzkiste des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München mit ICo	39
Abbildung 4.1:	Zusammensetzung der explorativen Anforderungsanalyse	41
Abbildung 4.2:	Anzahl der Kooperationen aufgeteilt nach Art der Kooperation in der Perspektive des Überholten	43
Abbildung 4.3:	Nützlichkeit und Zufriedenheit-Score nach [85] für die vier Ausprägung der akustischen Hinweise	43
Abbildung 5.1:	Durchgeführte Studien im nutzerzentrierten Entwicklungsprozess zur Entwicklung des HMI-Konzepts für das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen	47
Abbildung 5.2:	GUI des HMI-Konzepts Prototyp 1.0 mit den vier Informationsbereiche (Ausschnitt zeigt alle Informationen simultan)	49
Abbildung 5.3:	Anzahl an kooperativer Lkw-Überholmanöver in den Perspektiven Überholenden und Überholter	51
Abbildung 5.4:	Wahrgenommene Usability der zwei HMI-Varianten in der Perspektive des Überholenden nach der Unterteilung von [259]	51
Abbildung 5.5:	Nützlichkeits- und Zufriedenheits-Score nach [85] für die zwei Varianten der HMI in der Perspektive des Überholten im Vergleich zu keiner Information über eine HMI	52
Abbildung 5.6:	GUI des HMI-Konzepts Prototyp 2.0 (Ausschnitt zeigt alle Informationen simultan)	53
Abbildung 5.7:	Anzahl an kooperativer Lkw-Überholmanöver der HMI-Varianten zur Untersuchung des Kooperationsstarts	54
Abbildung 5.8:	Wahrgenommene Usability der HMI-Varianten zur Untersuchung des Kooperationsstarts nach der Unterteilung von [259]	55
Abbildung 5.9:	Resultierende GUI des Prototyp 3.0	56
Abbildung 5.10:	Durchgeführte Studien im nutzerzentrierten Entwicklungsprozess zur Entwicklung des vermenschlichten HMI-Konzepts im Lkw	57
Abbildung 5.11:	Bilder vom interdisziplinären Workshop: links pinnen Teilnehmer ihre Ideen an die Ideen-Pool Wand, rechts eine Skizze und ein ausgefüllter Ideensteckbrief	58
Abbildung 5.12:	Komponenten der vermenschlichten HMI; links die Skizze und rechts die Umsetzung von ICo	59
Abbildung 5.13:	Durchschnittliche Anzahl an Kooperationen	62
Abbildung 5.14:	Durchschnittliche Anzahl an Interaktionen mit ICo (N = Anzahl an Versuchsteilnehmer)	63
Abbildung 5.15:	Resultierende Version des vermenschlichten HMI-Konzepts	64
Abbildung 6.1:	Einordnung der Summativen Evaluation im nutzerzentrierten Entwicklungsprozess	65

Abbildung 6.2:	Erreichte Kooperationsrate über die Iterationsschritte des nutzerzentrierten Entwicklungsprozesses für das HMI-Konzept ohne Vermenschlichung66
Abbildung 6.3:	Erreichte Kooperationsrate über die Iterationsschritte des nutzerzentrierten Entwicklungsprozesses für eine vermenschlichte HMI.....66
Abbildung 6.4:	Innenansicht des Lkw-Fahrer Arbeitsplatz für die summativen Evaluation69
Abbildung 6.5:	Darstellung der Fahrszenarien S1 - S4 mit entsprechender Rückmeldung der HMI71
Abbildung 6.6:	Schematische Darstellung eines simulierten Überholmanövers nach [293] .72
Abbildung 6.7:	Versuchsplan der summativen Evaluation.....75
Abbildung 6.8:	Fremd- und Selbstbild bezüglich Problembewusstsein Kooperation im Straßenverkehr.....76
Abbildung 6.9:	Kooperationsrate in Abhängigkeit der HMI (links) und HMI + ICo (rechts); (0 = nie kooperiert; 1 = immer kooperiert).....78
Abbildung 6.10:	Überholdauer in der Perspektive des Überholenden.....80
Abbildung 6.11:	Aus- und Einscherabstand in der Perspektive des Überholenden80
Abbildung 6.12:	Überholdauer in der Perspektive des Überholten.....81
Abbildung 6.13:	Wahrgenommene Usability (SUS-Skala nach [259]).....81
Abbildung 6.14:	Benchmarkanalyse der User Experience Dimensionen nach [301]83
Abbildung 6.15:	Subjektive Bewertung (Median) der Versuchsteilnehmer des GQS Fragebogen bzgl. situativ auftretenden Anthropomorphismus [283].....84
Abbildung 6.16:	Mittelwerte des situativ auftretenden Anthropomorphismus [283] je nach Präferenz85
Abbildung 7.1:	Erhöhung der Kooperationsrate über den Verlauf der HMI-Entwicklung93
Abbildung 7.2:	Erhöhung der Kooperationsrate in der Perspektive des Überholten über den Verlauf der Entwicklung der vermenschlichten HMI ICo97
Abbildung A.1:	HMI-Konzept des Spurwechselassistent von BMW [288, S. 17].....xxxiv
Abbildung A.2:	Darstellung des zeitlichen Horizonts bis zum Spurwechsel im HMI-Konzept des Fahrstreifenwechselassistent von Habenicht [166, S. 63].....xxxiv
Abbildung A.3:	Darstellung der Kopplung im HMI-Konzept des Projekts COMPANION [226, S. 272]xxxiv
Abbildung A.4:	Darstellung der Hysterese im HMI-Konzept des ECO-Tempomat von Mercedes Benz Trucks – Predictive Powertrain Control im Actros [231].. xxxv
Abbildung A.5:	Darstellung der offenen Lücke im HMI-Konzept des CoDAS für das Einfädeln an Anschlussstellen auf Autobahnen [209, S. 192] xxxv
Abbildung B.1:	Skizze eines HMI-Zustands [315, S. 64].....xxxvi
Abbildung C.1:	Zustände 1-8 des HMI-Prototyp 3.0 in der Perspektive des Überholenden [288]xxxvii

Abbildung C.2:	Zustände 9 und 10 des HMI-Prototyp 3.0 in der Perspektive des Überholenden [288].....	xxxviii
Abbildung C.3:	Zustände 1-10 des HMI-Prototyp 3.0 in der Perspektive des Überholten [288]	xxxix
Abbildung C.4:	Abbruchzustände des HMI-Prototyp 3.0 [288].....	xl
Abbildung D.1:	Wizard of Oz Framework in ROS.....	xli
Abbildung E.1:	Zustände der vermenschlichten HMI [288].....	xlii

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Stand der Wissenschaft zu vermenschlichter HMI im Fahrzeug (SA = Sprachassistent, VA = virtueller Assistent, RA = Roboter Assistent)..	19
Tabelle 2.2:	Kooperationsgrad des CoDAS nach [194].....	24
Tabelle 2.3:	Zustände des CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen nach [32].	27
Tabelle 2.4:	Für die Unterstützungsmöglichkeiten des CoDAS vergleichbare ADAS bzw. CoDAS und deren HMI-Konzepte.....	30
Tabelle 4.1:	Charakteristik der Fahrsimulatorstudie 0	42
Tabelle 4.2:	Charakteristik der Befragung I	44
Tabelle 4.3:	Nutzungsanforderungen an die HMI für das CoDAS Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen	45
Tabelle 4.4:	Charakteristik der Befragung II	46
Tabelle 4.5:	Nutzungsanforderungen an eine vermenschlichte HMI für den Lkw.....	46
Tabelle 5.1:	Charakteristik des Konzeptentwurfs für die HMI des CoDAS	48
Tabelle 5.2:	Zehn Zustände von kooperativen Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen, mit den entsprechen Informationen in jedem Zustand (A = Überholender; B = Überholter).....	49
Tabelle 5.3:	Charakteristik der Fahrsimulatorstudie I	50
Tabelle 5.4:	Charakteristik der Fahrsimulatorstudie II	53
Tabelle 5.5:	Charakteristik des Konzeptentwurfs für die vermenschlichte HMI im Lkw....	57
Tabelle 5.6:	Technische Komponente des vermenschlichten HMI-Konzepts	59
Tabelle 5.7:	Charakteristik der Fahrsimulatorstudie III	60
Tabelle 5.8:	Beispiele für Sprachprompts des Sprachassistenten und ICo im Vergleich .	60
Tabelle 5.9:	Charakteristik der Fahrsimulatorstudie IV.....	61
Tabelle 6.1:	Fragestellungen und abgeleitete Hypothesen bezüglich der Kooperationsbereitschaft	67
Tabelle 6.2:	Fragestellungen und abgeleitete Hypothesen bezüglich der Usability.....	67
Tabelle 6.3:	Fragestellungen und abgeleitete Hypothesen bezüglich des Vertrauens	68
Tabelle 6.4:	Fragestellungen und abgeleitete Hypothesen bezüglich der Usability.....	68

Tabelle 6.5:	Fragestellungen und abgeleitete Hypothesen bezüglich der User Experience	68
Tabelle 6.6:	Berechneter Aus- und Einschereabstand in Abhängigkeit der Soll-TTC gemäß CoDAS.....	72
Tabelle 6.7:	Subjektiver Nutzen der HMI für das CoDAS für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen	73
Tabelle 6.8:	Erhebung der subjektiven Relevanz für Kooperation im Straßenverkehr/ während Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen	75
Tabelle 6.9:	Deskriptive und inferenzstatistische Auswertung der Kooperationsrate	79
Tabelle 6.10:	Deskriptive und inferenzstatistische Auswertung der Fahrdaten in der Perspektive des Überholenden	79
Tabelle 6.11:	Deskriptive und inferenzstatistische Auswertung der Überholdauer in der Perspektive des Überholten	80
Tabelle 6.12:	Statistische Auswertung der abhängigen Variable Usability	82
Tabelle 6.13:	Statistische Auswertung der abhängigen Variable Vertrauen	82
Tabelle 6.14:	Statistische Auswertung der abhängigen Variable Akzeptanz	82
Tabelle 6.15:	Statistische Auswertung der abhängigen Variable User Experience	83
Tabelle 6.16:	Einfluss der Technikbereitschaft auf die wahrgenommene Nützlichkeit des Systems	83
Tabelle 6.17:	Statistische Auswertung des situativen Anthropomorphismus je nach Präferenz	84
Tabelle 6.18:	Abgeleitete Hypothesen aus der Fragestellung F3.HMI.....	85
Tabelle 6.19:	Abgeleitete Hypothesen aus der Fragestellung F3.VHMI	86
Tabelle 6.20:	Abgeleitete Hypothesen aus der Fragestellung F4.A.....	87
Tabelle 6.21:	Abgeleitete Hypothesen aus der Fragestellung F4.B.....	87
Tabelle 6.22:	Abgeleitete Hypothesen aus der Fragestellung F4.V	88
Tabelle 6.23:	Abgeleitete Hypothesen aus der Fragestellung F4.UX	88
Tabelle 7.1:	Zehn Gestaltungsempfehlungen für einer HMI für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen.....	95
Tabelle F.1	Einfluss der Technikbereitschaft auf die abhängigen Variablen.....	xliii
Tabelle F.2	Einfluss der Tendenz zum Anthropomorphisieren auf die abhängigen Variablen und den situativen Anthropomorphismus	xliii

Literaturverzeichnis

- [1] E. Fischer, "Versorgungsengpass droht – Allein in Deutschland fehlen derzeit 60.000 bis 80.000 Lkw-Fahrer," *Handelsblatt*, 22 Sep., 2021. <https://bit.ly/3X46Gii>
- [2] T. Puls, "Faktencheck Güterverkehr in Deutschland: Von der fehlenden Infrastruktur zum Verlagerungspotenzial," Initiative für Verkehrsinfrastruktur e. V., Köln, Gutachten in Auftrag gegeben durch Pro Mobilität, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://bit.ly/3VaWbZr>
- [3] Statistisches Bundesamt (Destatis), *Lkw-Verkehr: Ein Drittel aller Berufskraftfahrer und -fahrerinnen ist 55 und älter* (Pressemitteilung Nr. N 023), 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/05/PD22_N023_13.html
- [4] Intraplan Consult GmbH und Bundesamt für Güterverkehr (BAG), Hg., "Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr Mittelfristprognose Winter 2021/22," im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMDV), Mrz. 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://bit.ly/3TR9PPH>
- [5] Intraplan Consult GmbH und BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH, Hg., "Verkehrsverflechtungsprognose 2030: Schlussbericht," im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMDV), Rep. Forschungsbericht FE-Nr.: 96.0981/2011, Jun. 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://bit.ly/3gotAR3>
- [6] International Transport Workers Federation (ITF), "Changing Delivery Business Models in a Post-Pandemic World," Mrz. 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://bit.ly/3glnAZs>
- [7] Bundesamt für Güterverkehr (BAG), "Marktbeobachtung Güterverkehr," Jahresbericht 2020, Aug. 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://bit.ly/3EPb4up>
- [8] International Road Transport Union (IRU), "The future of road transport," Nov. 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://bit.ly/3tLfcW4>
- [9] Ecorys *et al.*, "Study on exploring the possible employment implications of connected and automated driving: Final Report," im Auftrag der Europäischen Union, Okt. 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ecorys.com/cad>
- [10] I. C. Sousa und S. Ramos, "Working conditions, health and retirement intentions: a case study of truck drivers," *International Journal of Workplace Health Management (IJWHM)*, Jg. 11, Nr. 3, S. 114–129, 2018, doi: 10.1108/IJWHM-02-2018-0019.
- [11] C. Evers, "Auswirkungen von Belastungen und Stress auf das Verkehrsverhalten von Lkw-Fahrern," Dissertation, Philosophische Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn, 2009. [Online]. Verfügbar unter: <https://core.ac.uk/reader/304637550>

- [12] M. H. Belzer, "Work-stress factors associated with truck crashes: An exploratory analysis," *The Economic and Labour Relations Review*, Jg. 29, Nr. 3, S. 289–307, 2018, doi: 10.1177/1035304618781654.
- [13] ZF Friedrichshafen AG, "ZF-Zukunftsstudie Fernfahrer: Der Mensch im Transport- und Logistikmarkt," Institut für Nachhaltigkeit in Verkehr und Logistik, Sep. 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://bit.ly/3EPWByt>
- [14] J. Bergrath, "Umfrage zur Belastung der Lkw-Fahrer: Auf dem Rücken der Fahrer," *Fernfahrer*, 04 Mai., 2021. <https://bit.ly/3OoEb19>
- [15] C. Ji-Hyland und D. Allen, "What do professional drivers think about their profession? An examination of factors contributing to the driver shortage," *International Journal of Logistics Research and Applications*, Jg. 25, Nr. 3, S. 231–246, 2022, doi: 10.1080/13675567.2020.1821623.
- [16] D. Ellinghaus und J. Steinbrecher, *Lkw im Straßenverkehr: Eine Untersuchung über die Beziehungen zwischen Lkw- und Pkw-Fahrern*. Uniroyal Verkehrsuntersuchung, 2002.
- [17] A. Benmimoun, D. Neunzig und C. Maag, "Effizienzsteigerung durch professionelles/partnerschaftliches Verhalten im Straßenverkehr," *FAT-Schriftenreihe*, Nr. 181, 2004.
- [18] B. Schlag, C. Schulze und J. Schade, "Akzeptanzuntersuchung zu Einführung und Einsatz Innovativer Nutzfahrzeuge: Abschlussbericht," Technische Universität Dresden, Lehrstuhl Verkehrspsychologie, Dresden, Forschungsprojekt im Auftrag der FAT e.V., 2007.
- [19] C. Henn, "Umfrage: Das nervt Autofahrer," *ADAC*, 04 Jun., 2021. <https://www.adac.de/verkehr/umfrage-genervte-autofahrer/>
- [20] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMDV) und Deutscher Verkehrssicherheitsrat (DVR). "Für mehr Verständnis: Pkw - Lkw Lkw-Pkw." <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/StV/fuer-mehr-verstaendnis-pkw-lkw.html>
- [21] J.-C. Mertens, "Kooperative Lkw-Überholmanöver mit V2X," Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [22] J. Fank, P. Krebs und F. Diermeyer, "Analyse von Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen für die Entwicklung kooperativer Fahrerassistenzsysteme," *Forschung im Ingenieurwesen*, Jg. 83, Nr. 2, S. 305–316, 2019, doi: 10.1007/s10010-019-00314-z.
- [23] J. C. Mertens, J. Hauenstein, F. Diermeyer, L. Jahn und S. Kraus, "Cooperative Truck Overtaking on Freeways," in *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2020, S. 1–15, doi: 10.1109/EVER48776.2020.9243145.
- [24] J. Fank, P. Krebs und F. Diermeyer, "Analyse von Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen für die Entwicklung kooperativer Fahrerassistenzsysteme," Präsentation auf der VDI/VW Gemeinschaftstagung.
- [25] J. C. Mertens, J. Hauenstein, Diermeyer, F. und S. Kraus, "Reduced Safety Distance during Cooperative Truck Overtaking," in *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2020, S. 1–7, doi: 10.1109/EVER48776.2020.9242946.
- [26] Statistisches Bundesamt (Destatis), "Verkehr: Verkehrsunfälle 2020," Jul. 2022.

- [27] Statistisches Bundesamt (Destatis), "Verkehrsunfälle: Unfälle von Güterkraftfahrzeugen im Straßenverkehr 2020," Jan. 2022.
- [28] E. J. Hardman, G. M. Lunt und R. Smith, "Predicting the effects of different traffic rules on motorways using SISTM," in *IET Road Transport Information and Control - RTIC 2008 and ITS United Kingdom Members' Conference*, 2008, S. 1–8, doi: 10.1049/ic.2008.0801.
- [29] M. R. Luehder, "Lkw-Überholverbote auf Bundesautobahnen," *Straßenverkehrstechnik*, Nr. 34, 1990, Art. Nr. 2.
- [30] S. P. Hoogendoorn und P. H. Bovy, "A Closer Examination of Overtaking Prohibitions for Trucks," *IFAC Proceedings Volumes*, Jg. 33, Nr. 9, S. 227–234, 2000, doi: 10.1016/S1474-6670(17)38151-X.
- [31] E. Hardman, B. Morris, P. Owlett und T. Rees, "Die Auswirkungen des gegenseitigen Überholverbots für Lkw auf zweispurigen Fernstrassen auf den Verkehrsfluss und die Transportwege," Europäisches Parlament, Brüssel, Mrz. 2010.
- [32] J. C. Mertens, J. Hauenstein, F. Diermeyer und A. Zimmermann, "Strategic Coordination of Cooperative Truck Overtaking Maneuvers," in *Proceedings of the 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS 2021)*, 2021, S. 513–520.
- [33] H. Peng *et al.*, "Performance Analysis of IEEE 802.11p DCF for Multiplatooning Communications With Autonomous Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Jg. 66, Nr. 3, S. 2485–2498, 2017, doi: 10.1109/TVT.2016.2571696.
- [34] W. Rudschies, "C2X im VW Golf 8: Erster ADAC Test," *ADAC*, 14 Jul., 2020. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/assistenzsyste/c2x-im-vw-golf-8/>
- [35] A. Shazwani Ghazali, J. Ham, E. Barakova und P. Markopoulos, "The influence of social cues in persuasive social robots on psychological reactance and compliance," *Computers in Human Behavior*, Jg. 87, S. 58–65, 2018, doi: 10.1016/j.chb.2018.05.016.
- [36] J. R. Landwehr, A. L. McGill und A. Herrmann, "It's Got the Look: The Effect of Friendly and Aggressive "Facial" Expressions on Product Liking and Sales," *Journal of Marketing*, Jg. 75, Nr. 3, S. 132–146, 2011, doi: 10.1509/jmkg.75.3.132.
- [37] K. Wada, T. Shibata, T. Saito, K. Sakamoto und K. Tanie, "Psychological and Social Effects of One Year Robot Assisted Activity on Elderly People at a Health Service Facility for the Aged," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2005, S. 2785–2790, doi: 10.1109/ROBOT.2005.1570535.
- [38] J. Ham, R. H. Cuijpers und J.-J. Cabibihan, "Combining Robotic Persuasive Strategies: The Persuasive Power of a Storytelling Robot that Uses Gazing and Gestures," *International Journal of Social Robotics*, Jg. 7, Nr. 4, S. 479–487, 2015, doi: 10.1007/s12369-015-0280-4.
- [39] G. Geiser, "Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug," *Automobiltechnische Zeitschrift: ATZ*, Jg. 87, Nr. 2, S. 77–84, 1985.
- [40] H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen und M. Vollrath, *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [41] E. Donges, "A Conceptual Framework for Active Safety in Road Traffic," *Vehicle System Dynamics*, Jg. 32, 2-3, S. 113–128, 1999, doi: 10.1076/vesd.32.2.113.2089.

- [42] E. Donges, "Fahrerverhaltensmodelle," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 17–26.
- [43] E. Donges, "Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen," *Automobil-Industrie*, Jg. 27, Nr. 2, S. 183–190, 1982.
- [44] B. Spanner-Ulmer und P. Leiber, "Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle - Interaktion des Menschen mit dem Produkt," in *Automotive Management: Strategie und Marketing in der Automobilwirtschaft*, B. Ebel und M. B. Hofer, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 319–337.
- [45] J. Rasmussen, "Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Jg. SMC-13, Nr. 3, S. 257–266, 1983, doi: 10.1109/TSMC.1983.6313160.
- [46] E. Hollnagel und D. Woods, *Joint Cognitive Systems: Foundations of Cognitive Systems Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [47] L. Renner und B. Johansson, "Driver Coordination in Complex Traffic Environments," in *Proceedings of the 13th European Conference on Cognitive Ergonomics: Trust and Control in Complex Socio-Technical Systems*, 2006, S. 35–40, doi: 10.1145/1274892.1274899.
- [48] N. Moray, T. Inagaki und M. Itoh, "Adaptive automation, trust, and self-confidence in fault management of time-critical tasks," *Journal of experimental psychology. Applied*, Jg. 6, Nr. 1, S. 44–58, 2000, doi: 10.1037//1076-898x.6.1.44.
- [49] *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, SAE J3016, SAE International, Apr. 2021.
- [50] H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hg. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [51] K. Bengler, M. Rettenmaier, N. Fritz und A. Feierle, "From HMI to HMIs: Towards an HMI Framework for Automated Driving," *Information*, Jg. 11, Nr. 2, S. 61, 2020, doi: 10.3390/info11020061.
- [52] W. König, "Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine- Interaktion von Fahrerassistenzsystemen," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 621–632.
- [53] D. Damböck, "Automationseffekte im Fahrzeug – von der Reaktion zur Übernahme," Dissertation, Technische Universität München, München, 2013.
- [54] F. Flemisch, J. Kelsch, A. Schieben, J. Schindler, C. Löper und J. Schomerus, "Prospective Engineering of Vehicle Automation with Design Metaphors: Intermediate report from the H-Mode Projects," in *Prospektive Gestaltung von Mensch-Technik-Interaktion*, 2007, S. 173–178.
- [55] H. Winner und S. Hakuli, "Conduct-by-Wire: following a new paradigm for driving into the future," in *Proceedings of FISITA World Automotive Congress*, Yokohama, 2006.
- [56] N. B. Sarter, D. D. Woods und C. Billing, "Automation surprises," *Handbook Human Factors Ergonomics*, Jg. 2, S. 1926–1943, 1997.

- [57] F. Flemisch, H. Winner, R. Bruder und K. Bengler, "Kooperative Fahrzeugführung," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 1103–1110.
- [58] S. Dekker und D. Woods, "MABA-MABA or Abracadabra? Progress on Human-Automation Co-ordination," *Cognition, Technology & Work*, Jg. 4, S. 240–244, 2002.
- [59] G. Klein, D. WOODS, J. Bradshaw, R. Hoffman und P. Feltovich, "Ten Challenges for Making Automation a "Team Player" in Joint Human-Agent Activity," *IEEE Intelligent Systems*, Jg. 19, Nr. 6, S. 91–95, 2004, doi: 10.1109/MIS.2004.74.
- [60] F. Flemisch, K. Bengler, H. Bubb, H. Winner und R. Bruder, "Towards cooperative guidance and control of highly automated vehicles: H-Mode and Conduct-by-Wire," *Ergonomics*, Early Access. doi: 10.1080/00140139.2013.869355.
- [61] M. Walch, K. Mühl, J. Kraus, T. Stoll, M. Baumann und M. Weber, "From Car-Driver-Handovers to Cooperative Interfaces: Visions for Driver–Vehicle Interaction in Automated Driving," in *Automotive user interfaces: Creating interactive experiences in the car* (Human-computer interaction series), G. Meixner, Hg., Cham: Springer, op. 2017, S. 273–294.
- [62] F. Buschmann, R. Meunier, H. Rohner, P. Sommerlad und M. Stal, *Pattern-oriented software architecture: A system of patterns* (ProQuest Ebook Central). Chichester: Wiley, 2013.
- [63] S. A. Hofauer, "Fahrer-Fahrzeug-Interaktion einer automatisierten, kraftstoffeffizienten Fahrzeuglängsführung," Dissertation, Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2017.
- [64] D. A. Norman, "Some observations on mental models," in *Mental Models*, D. Gentner und A. Stevens, Hg., Psychology Press, 1983, S. 7–14.
- [65] J. R. Wilson und A. Rutherford, "Mental Models: Theory and Application in Human Factors," *Hum Factors*, Jg. 31, Nr. 6, S. 617–634, 1989, doi: 10.1177/001872088903100601.
- [66] A. Butz und A. Krüger, *Mensch-Maschine-Interaktion*. OLDENBOURG WISSENSCHAFTSVERLAG, 2014.
- [67] M. Beggiano 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*, Jg. 18, S. 47–57, 2013, doi: 10.1016/j.trf.2012.12.006.
- [68] G. Weller, *The Psychology of Driving on Rural Roads: Development and Testing of a Model* (Verkehrspsychologie). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften GmbH, 2010.
- [69] B. Schlag und G. Weller, "Verhaltenswissenschaftliche Aspekte von Fahrerassistenzsystemen," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 71–83.
- [70] M. R. Endsley, "Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems," *Hum Factors*, Jg. 37, Nr. 1, S. 32–64, 1995, doi: 10.1518/001872095779049543.
- [71] N. B. Sarter und D. D. Woods, "How in the World Did We Ever Get into That Mode? Mode Error and Awareness in Supervisory Control," *Hum Factors*, Jg. 37, Nr. 1, S. 5–19, 1995, doi: 10.1518/001872095779049516.

- [72] M. R. Endsley, "Situation Awareness," in *Handbook of human factors and ergonomics*, G. Salvendy, Hg., Chichester: Wiley, 2006, S. 528–542.
- [73] C. D. Wickens und J. G. Hollands, *Engineering psychology and human performance*, 3. Aufl. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2000.
- [74] H. Eom und S. H. Lee, "Human-Automation Interaction Design for Adaptive Cruise Control Systems of Ground Vehicles," *Sensors (Basel, Switzerland)*, Early Access. doi: 10.3390/s150613916.
- [75] B. Donmez, L. N. Boyle und J. D. Lee, "Mitigating driver distraction with retrospective and concurrent feedback," *Accident Analysis & Prevention*, Early Access. doi: 10.1016/j.aap.2007.09.023.
- [76] N. A. Stanton und M. S. Young, "Driver behaviour with adaptive cruise control," *Ergonomics*, Jg. 48, Nr. 10, S. 1294–1313, 2005, doi: 10.1080/00140130500252990.
- [77] F. D. Davis, "User acceptance of information technology: system characteristics, user perceptions and behavioral impacts," *International Journal of Man-Machine Studies*, Jg. 38, Nr. 3, S. 475–487, 1993, doi: 10.1006/imms.1993.1022.
- [78] M. Fishbein und I. Ajzen, *Belief, attitude, intention and behavior: An introduction to theory and research* (Addison-Wesley series in social psychology). Reading, Mass; Addison-Wesley, 1975.
- [79] F. D. Davis, "Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology," *MIS Quarterly*, Jg. 13, Nr. 3, S. 319, 1989.
- [80] W. R. King und J. He, "A meta-analysis of the technology acceptance model," *Information & Management*, Jg. 43, Nr. 6, S. 740–755, 2006, doi: 10.1016/j.im.2006.05.003.
- [81] M. Rothensee, *Psychological determinants of the acceptance of future ubiquitous computing applications* (Schriftenreihe Studien zur Wirtschaftsinformatik 42). Hamburg: Dr. Kovač, 2010.
- [82] K. Wieglering, "Ubiquitous Computing," in *Handbuch Technikethik*, A. Grunwald und M. Simonidis-Puschmann, Hg., Stuttgart: J.B. Metzler, 2013, S. 374–378.
- [83] C. Ussat, "Personalisierte Optionsauswahl im Fahrzeuginformationssystem," Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II, Humboldt-Universität Berlin, Berlin, 2012.
- [84] M. Ghazizadeh, Y. Peng, J. D. Lee und L. N. Boyle, "Augmenting the Technology Acceptance Model with Trust: Commercial Drivers' Attitudes towards Monitoring and Feedback," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Jg. 56, Nr. 1, S. 2286–2290, 2012, doi: 10.1177/1071181312561481.
- [85] J. D. van der Laan, H. Adriaan und W. Dick De, "A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Jg. 5, Nr. 1, S. 1–10, 1997, doi: 10.1016/S0968-090X(96)00025-3.
- [86] J. Lee und K. See, "Trust in Automation: Designing for Appropriate Reliance," *Human factors*, Jg. 46 1, S. 50–80, 2004.
- [87] G. Pöhler, T. Heine und B. Deml, "Itemanalyse und Faktorstruktur eines Fragebogens zur Messung von Vertrauen im Umgang mit automatischen Systemen," *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, Jg. 70, Nr. 3, S. 151–160, 2016, doi: 10.1007/s41449-016-0024-9.

- [88] D. Manzey, "Systemgestaltung und Automatisierung," in *Human Factors*, P. Badke-Schaub, G. Hofinger und K. Lauche, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 333–352.
- [89] D. Manzey und J. E. Bahner, "Vertrauen in Automation als Aspekt der Verlässlichkeit von Mensch-Maschine-Systemen," in *Beiträge zur Mensch-Maschine-Systemtechnik aus Forschung und Praxis. Festschrift für Klaus-Peter Timpe*, K. Karrer, B. Gauss und Steffens C., Hg., Düsseldorf: Symposium, 2005, S. 93–109.
- [90] B. M. Muir, "Trust between humans and machines, and the design of decision aids," *International Journal of Man-Machine Studies*, Jg. 27, Nr. 5, S. 527–539, 1987, doi: 10.1016/S0020-7373(87)80013-5.
- [91] R. Parasuraman und V. Riley, "Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse," *Hum Factors*, Jg. 39, Nr. 2, S. 230–253, 1997, doi: 10.1518/001872097778543886.
- [92] K. A. Hoff und M. Bashir, "Trust in automation: integrating empirical evidence on factors that influence trust," *Human factors*, Early Access. doi: 10.1177/0018720814547570.
- [93] G. H. Walker, N. A. Stanton und P. Salmon, "Trust in vehicle technology," *International Journal of Vehicle Design (IJVD)*, Jg. 70, Nr. 2, 2016, Art. Nr. 74419, doi: 10.1504/IJVD.2016.074419.
- [94] M. T. Dzindolet, S. A. Peterson, R. A. Pomranky, L. G. Pierce und H. P. Beck, "The role of trust in automation reliance," *International Journal of Human-Computer Studies*, Jg. 58, Nr. 6, S. 697–718, 2003, doi: 10.1016/S1071-5819(03)00038-7.
- [95] J. Lee und N. Moray, "Trust, control strategies and allocation of function in human-machine systems," *Ergonomics*, Jg. 35, Nr. 10, S. 1243–1270, 1992, doi: 10.1080/00140139208967392.
- [96] F. M. F. Verberne, J. Ham und C. J. H. Midden, "Trust in smart systems: sharing driving goals and giving information to increase trustworthiness and acceptability of smart systems in cars," *Human factors*, Jg. 54, Nr. 5, S. 799–810, 2012, doi: 10.1177/0018720812443825.
- [97] S. C. Roberts, M. Ghazizadeh und J. D. Lee, "Warn me now or inform me later: Drivers' acceptance of real-time and post-drive distraction mitigation systems," *International Journal of Human-Computer Studies*, Jg. 70, Nr. 12, S. 967–979, 2012, doi: 10.1016/j.ijhcs.2012.08.002.
- [98] J. Koo, J. Kwac, W. Ju, M. Steinert, L. Leifer und C. Nass, "Why did my car just do that? Explaining semi-autonomous driving actions to improve driver understanding, trust, and performance," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, Jg. 9, Nr. 4, S. 269–275, 2015, doi: 10.1007/s12008-014-0227-2.
- [99] N. Bevan, "Measuring usability as quality of use," *Software Quality Journal*, Jg. 4, Nr. 2, S. 115–130, 1995, doi: 10.1007/BF00402715.
- [100] C. Backhaus, "Begriffsdefinition Ergonomie und Gebrauchstauglichkeit," in *Usability-Engineering in der Medizintechnik*, C. Backhaus, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, S. 11–19.
- [101] *DIN EN ISO 9241-110:2020, Ergonomics of human-system interaction - Part 110: Interaction principles (ISO 9241-110:2020); German version EN ISO 9241-110:2020*, Berlin.

- [102] M. Minge und M. Thüring, "Hedonic and pragmatic halo effects at early stages of User Experience," *International Journal of Human-Computer Studies*, Jg. 109, S. 13–25, 2018, doi: 10.1016/j.ijhcs.2017.07.007.
- [103] P. W. Jordan, "Human factors for pleasure in product use," *Applied Ergonomics*, Jg. 29, Nr. 1, S. 25–33, 1998, doi: 10.1016/S0003-6870(97)00022-7.
- [104] A. Pohlmeier, M. Hecht und L. Blessing, "User Experience Lifecycle Model ContinUE [Continuous User Experience]," in *Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 22 Nr. 29*, A. Lichtenstein, C. Stößel und C. Clemens, Hg., Düsseldorf: VDI-Verlag, 2009, S. 314–317.
- [105] M. Thüring und S. Mahlke, "Usability, aesthetics and emotions in human–technology interaction," *International Journal of Psychology*, Jg. 42, Nr. 4, S. 253–264, 2007, doi: 10.1080/00207590701396674.
- [106] K. Bengler, "Driver and Driving Experience in Cars," in *Automotive user interfaces: Creating interactive experiences in the car* (Human-computer interaction series), G. Meixner, Hg., Cham: Springer, op. 2017, S. 79–94.
- [107] B. Flügge und H. Roth, "Erlebnisraum Auto," in *Smart Mobility in der Praxis: Das Auto - unverzichtbar für den intermodalen Verkehr?*, B. Flügge, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 49–66.
- [108] M. Hassenzahl, A. Platz, M. Burmester und K. Lehner, "Hedonic and ergonomic quality aspects determine a software's appeal," in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '00*, T. Turner und G. Szwillus, Hg., 2000, S. 201–208, doi: 10.1145/332040.332432.
- [109] H. Gotthartsleitner, P. Eberle und C. Stary, "Zur Verschränkung von User Experience und Usability Engineering: Merkmale, Prinzipien und Vorgehensmodelle," *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, Nr. 63, S. 193–211, 2009.
- [110] J. Fank, N. T. Richardson und F. Diermeyer, "Anthropomorphising driver-truck interaction: a study on the current state of research and the introduction of two innovative concepts," *Journal on Multimodal User Interfaces*, Jg. 13, Nr. 2, S. 99–117, 2019, doi: 10.1007/s12193-019-00296-w.
- [111] K. Jagannath und E. Ha Rim Rho, "Intelligent Agents in Everyday Settings: Leveraging a Multi-Methods' Approach," in *Proceedings of the CHI '18: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2018.
- [112] C. Fullwood, S. Quinn, L. K. Kaye und C. Redding, "My virtual friend: A qualitative analysis of the attitudes and experiences of Smartphone users: Implications for Smartphone attachment," *Computers in Human Behavior*, Jg. 75, S. 347–355, 2017, doi: 10.1016/j.chb.2017.05.029.
- [113] Dudenredaktion. "'Anthropomorphismus" auf Duden online." <https://www.duden.de/node/7155/revision/7182> (Zugriff am: 19. Jun. 2020).
- [114] J. Forlizzi und K. Battarbee, "Understanding experience in interactive systems," in *DIS2004: Across the spectrum*, D. Benyon und P. Moody, Hg., 2004, S. 261–268, doi: 10.1145/1013115.1013152.
- [115] S. Agrawal und M.-A. Williams, "Would You Obey an Aggressive Robot: A Human-Robot Interaction Field Study," in *IEEE RO-MAN 2018: The 27th IEEE International*

- Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, J.-J. Cabibihan, Hg., 2018, S. 240–246, doi: 10.1109/ROMAN.2018.8525615.
- [116] S. Diederich, S. Lichtenberg, A. Brendel und S. Trang, “Promoting Sustainable Mobility Beliefs with Persuasive and Anthropomorphic Design: Insights from an Experiment with a Conversational Agent,” in *International Conference on Information Systems (ICIS)*, 2019.
- [117] N. Epley, A. Waytz und J. T. Cacioppo, “On seeing human: A three-factor theory of anthropomorphism,” *Psychological Review*, Jg. 114, Nr. 4, 2007, doi: 10.1037/0033-295X.114.4.864.
- [118] B. R. Duffy, “Anthropomorphism and the social robot,” *Robotics and Autonomous Systems*, Jg. 42, Nr. 3, S. 177–190, 2003, doi: 10.1016/S0921-8890(02)00374-3.
- [119] A. Waytz, J. Cacioppo und N. Epley, “Who Sees Human? The Stability and Importance of Individual Differences in Anthropomorphism,” *Perspectives on psychological science : a journal of the Association for Psychological Science*, Jg. 5, Nr. 3, S. 219–232, 2010, doi: 10.1177/1745691610369336.
- [120] S. Lemaignan, J. Fink und P. Dillenbourg, “The dynamics of anthropomorphism in robotics,” in *HRI '14: Proceedings of the 2014 ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*, 2014, S. 226–227, doi: 10.1145/2559636.2559814.
- [121] S. Cornelius und D. Leidner, “Acceptance of Anthropomorphic Technology: A Literature Review,” in *Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, 2021, S. 6422–6431.
- [122] P. Persson, J. Laaksolahti und P. Lönnqvist, “Anthropomorphism – a Multi-Layered Phenomenon,” in *AAAI Fall symposium, Socially Intelligent Agents: The Human in the Loop*, 2000.
- [123] J. A. Zlotowski, “Understanding Anthropomorphism in the Interaction Between Users and Robots,” University of Canterbury. HIT Lab NZ, Christchurch, New Zealand, 2015.
- [124] M. Mori, “The Uncanny Valley,” in *Energy*, Bd. 7, 1970, S. 33–35.
- [125] H. Tan, D. Wang und S. Sabanovic, “Projecting Life onto Robots: The Effects of Cultural Factors and Design Type on Multi-Level Evaluations of Robot Anthropomorphism,” in *Proceedings of the 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, 2018, S. 129–136, doi: 10.1109/ROMAN.2018.8525584.
- [126] P. Ruijten und R. Cuijpers, “Dynamic Perceptions of Human-Likeness While Interacting With a Social Robot,” in *Proceedings of the Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, B. Mutlu, Hg., 2017, S. 273–274, doi: 10.1145/3029798.3038361.
- [127] N. Kloweit, “The quest for appropriate models of human-likeness: Anthropomorphism in media equation research,” *AI & SOCIETY*, 2017, doi: 10.1007/s00146-017-0746-z.
- [128] B. Vandenberghe und K. Slegers, “Anthropomorphism As a Strategy to Engage End-Users in Health Data Ideation,” in *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, 2016, 18:1–18:4, doi: 10.1145/2971485.2971500.
- [129] W. Wang, “Smartphones as Social Actors? Social dispositional factors in assessing anthropomorphism,” *Computers in Human Behavior*, Jg. 68, S. 334–344, 2017, doi: 10.1016/j.chb.2016.11.022.

- [130] C. Nass, J. Steuer und E. R. Tauber, "Computers Are Social Actors," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1994, S. 72–78, doi: 10.1145/191666.191703.
- [131] B. Reeves und C. Nass, *The Media Equation: How People Treat Computers, Television, and New Media Like Real People and Places*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1996.
- [132] C. Nass, Y. Moon, B. J. Fogg, B. Reeves und D. C. Dryer, "Can computer personalities be human personalities?," *International Journal of Human-Computer Studies*, Jg. 43, Nr. 2, S. 223–239, 1995, doi: 10.1006/ijhc.1995.1042.
- [133] C. Nass und K. M. Lee, "Does computer-synthesized speech manifest personality? experimental tests of recognition, similarity-attraction, and consistency-attraction," *Journal of Experimental Psychology: Applied*, Jg. 7, S. 171–181, 2001.
- [134] Y. Moon und C. Nass, "How "Real" Are Computer Personalities?: Psychological Responses to Personality Types in Human-Computer Interaction," *Communication Research*, Jg. 23, Nr. 6, S. 651–674, 1996, doi: 10.1177/009365096023006002.
- [135] B. J. Fogg, "Computers as Persuasive Social Actors: Persuasive Technology: Using Computers to Change What We Think and Do," in *Persuasive Technology: Using Computers to Change What We Think and Do*, B. J. Fogg, Hg., USA: Elsevier Science, 2003, S. 89–120.
- [136] A. S. Ghazali, J. Ham, E. I. Barakova und P. Markopoulos, "Poker Face Influence: Persuasive Robot with Minimal Social Cues Triggers Less Psychological Reactance," in *27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, 2018, S. 940–946, doi: 10.1109/ROMAN.2018.8525535.
- [137] J. Ham und C. Midden, "A Persuasive Robotic Agent to Save Energy: The Influence of Social Feedback, Feedback Valence and Task Similarity on Energy Conservation Behavior," in *Social Robotics*, Berlin, Heidelberg, S. S. Ge, H. Li, J.-J. Cabibihan und Y. K. Tan, Hg., 2010, S. 335–344.
- [138] S. Vossen, J. Ham und C. Midden, "What Makes Social Feedback from a Robot Work? Disentangling the Effect of Speech, Physical Appearance and Evaluation," in *Persuasive Technology*, T. Ploug, P. Hasle und H. Oinas-Kukkonen, Hg., 2010, S. 52–57.
- [139] J. Goetz, S. Kiesler und A. Powers, "Matching robot appearance and behavior to tasks to improve human-robot cooperation," in *The 12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, 2003, S. 55–60, doi: 10.1109/RO-MAN.2003.1251796.
- [140] E. Delgado-Ballester, M. Palazón und J. Pelaez-Muñoz, "This anthropomorphised brand is so loveable: The role of self-brand integration," *Spanish Journal of Marketing - ESIC*, Jg. 21, Nr. 2, S. 89–101, 2017, doi: 10.1016/j.sjme.2017.04.002.
- [141] D. R. Large und G. Burnett, "Life on the Road: Exposing Drivers' Tendency to Anthropomorphise In-Vehicle Technology," in *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA)*, S. Bagnara, R. Tartaglia, S. Albolino, T. Alexander und Y. Fujita, Hg., 2018, S. 3–12.

- [142] M. Heerink, B. Kröse, V. Evers und B. Wielinga, "Assessing acceptance of assistive social agent technology by older adults: The Almere model," *International Journal of Social Robotics*, Jg. 2, S. 361–375, 2010, doi: 10.1007/s12369-010-0068-5.
- [143] A. Purington, J. G. Taft, S. Sannon, N. N. Bazarova und S. H. Taylor, "Alexa is my new BFF": Social Roles, User Satisfaction, and Personification of the Amazon Echo," in *CHI '17 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, G. Mark et al., Hg., 2017, S. 2853–2859, doi: 10.1145/3027063.3053246.
- [144] E. J. d. Visser *et al.*, "The World is not Enough: Trust in Cognitive Agents," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Jg. 56, Nr. 1, S. 263–267, 2012, doi: 10.1177/1071181312561062.
- [145] R. Pak, N. Fink, M. Price, B. Bass und L. Sturre, "Decision support aids with anthropomorphic characteristics influence trust and performance in younger and older adults," *Ergonomics*, Jg. 55, Nr. 9, S. 1059–1072, 2012, doi: 10.1080/00140139.2012.691554.
- [146] J. T. Luo, P. McGoldrick, S. Beatty und K. A. Keeling, "On-screen characters: Their design and influence on consumer trust," *Journal of Services Marketing*, Jg. 20, Nr. 2, S. 112–124, 2006, doi: 10.1108/08876040610657048.
- [147] NIO. "NIO ES8 - New Horizon." <https://www.nio.com/es8>
- [148] NISSAN. "Pivo concept car." <https://europe.nissannews.com/en-GB/releases/release-703-pivo-concept-car>
- [149] NISSAN. "Nissan IDS Concept: Eine Vision über EV der Zukunft und autonomes Fahren." <https://bit.ly/3tPdwuG>
- [150] Toyota. "Toyota Concept-i Makes the Future of Mobility Human." <https://press-room.toyota.com/toyota-concept-i-future-of-mobility-human-ces-2017/>
- [151] IVECO. "IVECO Driver Pal: IVECOs bahnbrechender sprachgesteuerter On-Board-Fahrerbegleiter." <https://bit.ly/3ESYxpN>
- [152] C. Nass *et al.*, "Improving automotive safety by pairing driver emotion and car voice emotion," in *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, G. van der Veer, Hg., 2005, S. 1973–1976, doi: 10.1145/1056808.1057070.
- [153] I.-M. Jonsson, M. Zajicek, H. Harris und C. Nass, "Thank You, I did not see that: In-car Speech Based Information Systems for Older Adults," in *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 2005, S. 1953–1956.
- [154] L. Takayama und C. Nass, "Driver safety and information from afar: An experimental driving simulator study of wireless vs. in-car information services," *International Journal of Human-Computer Studies*, Jg. 66, Nr. 3, S. 173–184, 2008, doi: 10.1016/j.ijhcs.2006.06.005.
- [155] K. Williams, J. A. Flores und J. Peters, "Affective Robot Influence on Driver Adherence to Safety, Cognitive Load Reduction and Sociability," in *Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI '14)*, E. Miller, Hg., 2014, S. 1–8, doi: 10.1145/2667317.2667342.
- [156] K. J. Williams, J. C. Peters und C. L. Breazeal, "Towards leveraging the driver's mobile device for an intelligent, sociable in-car robotic assistant," in *2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2013, S. 369–376, doi: 10.1109/IVS.2013.6629497.

- [157] I.-M. Jonsson und N. Dahlbäck, "Driving with a Speech Interaction System: Effect of Personality on Performance and Attitude of Driver," in *Human-Computer Interaction. Advanced Interaction Modalities and Techniques. HCI 2014. Lecture Notes in Computer Science*, Bd. 8511, M. Kurosu, Hg., Springer, Cham, 2014, S. 417–428.
- [158] D. Sirkin, K. Fischer, L. Jensen und Wendy Ju, "Eliciting Conversation in Robot Vehicle Interactions," *AAAI Spring Symposia*, 2016.
- [159] J. -Y. Yang, Y. -H. Jo, J. -C. Kim und D. -S. Kwon, "Affective interaction with a companion robot in an interactive driving assistant system," in *2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2013, S. 1392–1397, doi: 10.1109/IVS.2013.6629661.
- [160] Y. Forster, F. Naujoks und A. Neukum, "Increasing anthropomorphism and trust in automated driving functions by adding speech output," in *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2017, S. 365–372, doi: 10.1109/IVS.2017.7995746.
- [161] A. Waytz, J. Heafner und N. Epley, "The mind in the machine: Anthropomorphism increases trust in an autonomous vehicle," *Journal of Experimental Social Psychology*, Jg. 52, S. 113–117, 2014, doi: 10.1016/j.jesp.2014.01.005.
- [162] R. Häuslschmid, M. von Bülow, B. Pfleging und A. Butz, "Supporting Trust in Autonomous Driving," in *Proceedings of the 22nd International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI'17)*, G. A. Papadopoulos, Hg., 2017, S. 319–329, doi: 10.1145/3025171.3025198.
- [163] J. M. Kraus, F. Nothdurft, P. Hock, D. Scholz, W. Minker und M. Baumann, "Human After All," in *Adjunct Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI'16)*, P. Green, Hg., 2016, S. 129–134, doi: 10.1145/3004323.3004338.
- [164] D. Large, G. Burnett, V. Antrobus und L. Skrypchuk, "Stimulating Conversation: Engaging Drivers in Natural Language Interactions with an Autonomous Digital Driving Assistant to Counteract Passive Task-Related Fatigue," in *5th International Conference on Driver Distraction and Inattention (DDI2017)*, 2017.
- [165] G. Hegeman, "Assisted overtaking: An assessment of overtaking on two-lane rural roads," Dissertation, Technische Universität Delft, Delft, 2008.
- [166] S. Habenicht, "Entwicklung und Evaluation eines manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten," Dissertation, Technischen Universität Darmstadt, Roßdorf, 2012.
- [167] J. D. Schulze und M. Becke, "Lkw Spurwechsel auf mehrspurigen Richtungsfahrbahnen," *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, Jg. 45, Nr. 10, S. 260–266, 2007.
- [168] OLG Hamm. "Beschluss 4 Ss OWi 629/08." <https://openjur.de/u/31853.html> (Zugriff am: 22. Okt. 2021).
- [169] G. Kellermann, "Erkenntnisse zum Lkw-Überholverbot auf Autobahnen," *Straßenverkehrstechnik*, Jg. 46, Nr. 4, S. 196–200, 2002.
- [170] Dudenredaktion (o.J.). "Kooperation." <https://www.duden.de/node/82721/revision/82757> (Zugriff am: 22. Okt. 2021).
- [171] R. Tuomela und M. Tuomela, "Cooperation and trust in group context," *Mind & Society*, Jg. 4, Nr. 1, S. 49–84, 2005, doi: 10.1007/s11299-005-0008-5.

- [172] J.-M. Hoc, "Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations," *International Journal of Human-Computer Studies*, Jg. 54, Nr. 4, S. 509–540, 2001, doi: 10.1006/ijhc.2000.0454.
- [173] E. Staub, *Positive Social Behavior and Morality: Social and Personal Influences*. Academic Press, 1979.
- [174] D. Ellinghaus, "Rücksichtslosigkeit und Partnerschaft: eine sozialpsychologische Untersuchung über den Umgang unter Kraftfahrern im Straßenverkehr," IFAPLAN Gesellschaft für Angewandte Sozialforschung und Planung GmbH, Köln, im Auftrag der UNIROYAL-ENGLEBERT Reifen GmbH, 1986.
- [175] A.-K. Kraft, C. Maag und M. Baumann, "How to support cooperative driving by HMI design?," *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Jg. 3, 2019, doi: 10.1016/j.trip.2019.100064.
- [176] J. C. Mertens, C. Knies, F. Diermeyer, S. Escherle und S. Kraus, "The Need for Cooperative Automated Driving," *Electronics*, Jg. 9, Nr. 5, 2020, doi: 10.3390/electronics9050754.
- [177] C. Lehsing, "Untersuchungen zum Interaktionsverhalten urbaner Verkehrsteilnehmer," Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, München, 2019.
- [178] S. Hallerbach, U. Eberle und K. Frank, "Absicherungs- und Bewertungsmethoden für kooperative hochautomatisierte Fahrzeuge," in *AAET - Automatisiertes und vernetztes Fahren: Beiträge zum gleichnamigen 18. Braunschweiger Symposium*, Braunschweig Germany, Feb. 2018.
- [179] C. Knies, J. Fank und F. Diermeyer, "How to Measure Cooperation? Cost Functions for Cooperative Maneuver Planning on Highways*," in *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2019, S. 2483–2489, doi: 10.1109/ITSC.2019.8917075.
- [180] A. M. Khamis, M. S. Kamel und M. A. Salichs, "Cooperation: Concepts and General Typology," in *2006 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2006, S. 1499–1505, doi: 10.1109/ICSMC.2006.384929.
- [181] M. A. Nowak, "Five rules for the evolution of cooperation," *Science (New York, N. Y.)*, Jg. 314, Nr. 5805, S. 1560–1563, 2006, doi: 10.1126/science.1133755.
- [182] M. Levine, A. Prosser, D. Evans und S. Reicher, "Identity and Emergency Intervention: How Social Group Membership and Inclusiveness of Group Boundaries Shape Helping Behavior," *Personality and Social Psychology Bulletin*, Jg. 31, Nr. 4, S. 443–453, 2005, doi: 10.1177/0146167204271651.
- [183] T. de Ceunynck, E. Polders, S. Daniels, E. Hermans, T. Brijs und G. Wets, "Road Safety Differences between Priority-Controlled Intersections and Right-Hand Priority Intersections: Behavioral Analysis of Vehicle-Vehicle Interactions," *Transportation Research Record*, Jg. 2365, Nr. 1, S. 39–48, 2013, doi: 10.3141/2365-06.
- [184] H. M. Schroder, M. J. Driver und S. Streufert, *Menschliche Informationsverarbeitung: Die Strukturen der Informationsverarbeitung bei Einzelpersonen und Gruppen in komplexen sozialen Situationen* (Beltz-Monographien Psychologie). Weinheim, Basel: Beltz, 1975.

- [185] J. M. Tauer und J. M. Harackiewicz, "The effects of cooperation and competition on intrinsic motivation and performance," *Journal of Personality and Social Psychology*, Jg. 86, Nr. 6, S. 849–861, 2004, doi: 10.1037/0022-3514.86.6.849.
- [186] M. Zimmermann *et al.*, "Carrot and stick: A game-theoretic approach to motivate cooperative driving through social interaction," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Jg. 88, S. 159–175, 2018, doi: 10.1016/j.trc.2018.01.017.
- [187] T. Bauer, R. Risser, Soche, P., Teske, W. und C. Vaughan, "Kommunikation im Straßenverkehr: Literaturstudie aus juridischem, kommunikationstheoretischem und psychologischen Blickwinkel: 1. Zwischenbericht," Kuratorium für Verkehrssicherheit, Wien, 1980.
- [188] J. Imbsweiler, T. Stoll, M. Ruesch, M. Baumann und B. Deml, "Insight into Cooperation Processes for Traffic Scenarios: Modelling with Naturalistic Decision Making," *Cogn. Technol. Work*, Jg. 20, Nr. 4, S. 621–635, 2018, doi: 10.1007/s10111-018-0518-7.
- [189] B. Färber, "Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern," in *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*, M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 127–146.
- [190] A. Haar, A. Kleen, L. Albrecht, M. Schmettow und W. B. Verwey, "Intention wahrnehmen und Umfeld verstehen: kognitive Prozesse in der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern," in *32. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren*, 2016.
- [191] J. Fank, C. Knies, F. Diermeyer, L. Prasch, J. Reinhardt und K. Bengler, "Factors for User Acceptance of Cooperative Assistance Systems: A Two-Step Study Assessing Cooperative Driving," in *8. Tagung der Fahrerassistenz*, 2017.
- [192] R. Risser, "Behavior in traffic conflict situations," *Accident Analysis & Prevention*, Jg. 17, Nr. 2, S. 179–197, 1985, doi: 10.1016/0001-4575(85)90020-X.
- [193] F. Köster, "Kooperative Assistenz- und Automation in Straßenfahrzeugen: Handlungsfelder / Lösungsansätze/ Funktionsbeispiele," in *AAET Automatisierungssysteme Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, Braunschweig, Feb. 2014, S. 87–99.
- [194] O. Sawade und I. Radusch, "Survey and Classification of Cooperative Automated Driver Assistance Systems," in *2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall)*, 2015, S. 1–5, doi: 10.1109/VTCFall.2015.7391161.
- [195] CAR 2 CAR Communication Consortium. "Guidance for day 2 and beyond roadmap." <https://bit.ly/3VmAAwO>
- [196] H. Gunther, O. Trauer und L. Wolf, "The potential of collective perception in vehicular ad-hoc networks," in *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, 2015, S. 1–5, doi: 10.1109/ITST.2015.7377190.
- [197] L. Eiermann, F. Wirthmüller, K. Massow, G. Breuel und I. Radusch, "Driver Assistance for Safe and Comfortable On-Ramp Merging Using Environment Models Extended through V2X Communication and Role-Based Behavior Predictions," in *2020 IEEE 16th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, 2020, S. 263–270, doi: 10.1109/ICCP51029.2020.9266186.

- [198] F. A. Schiegg, J. Krost, S. Jesenski und J. Frye, "A Novel Simulation Framework for the Design and Testing of Advanced Driver Assistance Systems," in *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, 2019, S. 1–6, doi: 10.1109/VTCFall.2019.8891221.
- [199] V. Lizenberg, S. Knapp, R. Mannale, V. Wendel und F. Köster, "Simulationsbasierte Bewertungs- und Vergleichsmethodik für Abstimmungsverfahren in kooperativen Fahrfunktionen," in *AAET: Automatisiertes und vernetztes Fahren*, 2019, S. 48–65.
- [200] L. Eiermann, O. Sawade, S. Bunk, G. Breuel und I. Radusch, "Cooperative automated lane merge with role-based negotiation," in *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2020, S. 495–501, doi: 10.1109/IV47402.2020.9304711.
- [201] C. Burger, T. Schneider und M. Lauer, "Interaction aware cooperative trajectory planning for lane change maneuvers in dense traffic," in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2020, S. 1–8, doi: 10.1109/ITSC45102.2020.9294638.
- [202] L. Zhang, F. Chen, X. Ma, X. Pan und S. Yasmin, "Fuel Economy in Truck Platooning: A Literature Overview and Directions for Future Research," *Journal of Advanced Transportation*, Jg. 2020, S. 1–10, 2020, doi: 10.1155/2020/2604012.
- [203] O. Sawade, M. Schulze und I. Radusch, "Robust Communication for Cooperative Driving Maneuvers," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, Jg. 10, Nr. 3, S. 159–169, 2018, doi: 10.1109/MITS.2018.2842241.
- [204] J. C. Mertens, D. Erb, S. Kraus und F. Diermeyer, "ITS-G5 Antenna Position on Trucks," in *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2020, S. 363–369, doi: 10.1109/IV47402.2020.9304766.
- [205] M. J. Mataric, "Interaction and Intelligent Behavior," Dissertation, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, USA, 1995.
- [206] F. Vanderhaegen, S. Chalmé, F. Anceaux und P. Millot, "Principles of cooperation and competition: application to car driver behavior analysis," *Cognition, Technology & Work*, Jg. 8, Nr. 3, S. 183–192, 2006, doi: 10.1007/s10111-006-0037-9.
- [207] K. A. Braitman, A. T. McCartt, D. S. Zuby und J. Singer, "Volvo and Infiniti drivers' experiences with select crash avoidance technologies," *Traffic Injury Prevention*, Jg. 11, Nr. 3, S. 270–278, 2010.
- [208] C. D. Wickens, "Multiple resources and performance prediction," *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, Jg. 3, Nr. 2, S. 159–177, 2002, doi: 10.1080/14639220210123806.
- [209] A.-K. Kraft, "Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmern: Entwicklung und Evaluation von HMI-Konzepten zur Unterstützung kooperativen Fahrens," Dissertation, Institut für Psychologie und Pädagogik, Universität Ulm, Ulm, 2021.
- [210] M. Zimmermann, "Cooperative Interaction. Within Cars and Between Drivers," Dissertation, Fakultät Maschinenwesen Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, München, 2018.
- [211] Federal Highway Administration, "Multiple Sources of Safety Information from V2V and V2I: Phase II Final Safety Message Report," Washington, DC, 2022.

- [212] J. L. Campbell, V. Venkatraman, L. Hoekstra-Atwood, J. Lee und C. Richard, "HMI Design for Automated, Connected, and Intelligent Vehicles," in *Handbook of human factors for automated, connected, and intelligent vehicles*, D. L. Fisher, W. J. Horrey, J. D. Lee und M. A. Regan, Hg., Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2020, S. 337–358.
- [213] M. Zimmermann und K. Bengler, "A multimodal interaction concept for cooperative driving," in *2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2013, S. 1285–1290, doi: 10.1109/IVS.2013.6629643.
- [214] M. Baumann *et al.*, "D3-09 & D3-10 – Reference Designs and Design Patterns for Cooperation & DCoS State Inference and Adaptation & Multimodal Human-Machine Interfaces - Final Version," D3Cos - designing Dynamic Distributed Cooperative Systems, 2014.
- [215] K. Christofferson und D. Woods, "1. How to make automated systems team players," in *Advances in Human Performance and Cognitive Engineering Research*, Bd. 2, E. Salas, Hg., 1. Aufl. Amsterdam, New York: JAI, 2001, S. 1–12.
- [216] I. Llatser, T. Michalke, M. Dolgov, F. Wildschutte und H. Fuchs, "Cooperative Automated Driving Use Cases for 5G V2X Communication," in *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*, 2019, S. 120–125, doi: 10.1109/5GWF.2019.8911628.
- [217] C. Maag, *Fahrer und Verkehrsklima: Eine verkehrswissenschaftliche Untersuchung zu den Ursachen und Folgen von Emotionen im Straßenverkehr* (Zugl.: Würzburg, Univ., Diss., 2004) (Fortschritt-Berichte: Reihe 22, Mensch-Maschine-Systeme Nr. 18). Düsseldorf: VDI-Verl., 2004.
- [218] I. Blanchette und A. Richards, "The influence of affect on higher level cognition: A review of research on interpretation, judgement, decision making and reasoning," *Cognition and Emotion*, Jg. 24, Nr. 4, S. 561–595, 2010, doi: 10.1080/02699930903132496.
- [219] C. Maag, "Emerging Phenomena During Driving Interactions," in *Co-evolution of Intelligent Socio-technical Systems: Modelling and Applications in Large Scale Emergency and Transport Domains* (Understanding Complex Systems), E. Mittleton-Kelly, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer, 2013, S. 185–217.
- [220] BMW. "Die wichtigsten Fahrerassistenzsysteme im Überblick." <https://www.bmw.com/de/innovation/die-wichtigsten-fahrerassistenzsysteme.html> (Zugriff am: 15. Okt. 2022).
- [221] Volvo Trucks. "Fahrerassistenzsysteme von Volvo Trucks." <https://www.volvotrucks.de/de-de/innovationen/fahrerhaus/driver-support-systems.html> (Zugriff am: 15. Aug. 2022).
- [222] S. Springer, C. Schmidt und F. Schmalfuß, "Information needs of users of conventional, connected and automated, connected vehicles in urban mixed traffic [Informationsbedarf von Nutzern konventioneller, vernetzter und automatisierter, vernetzter Fahrzeuge im urbanen Mischverkehr]," *Forschung im Ingenieurwesen/Engineering Research*, Jg. 83, Nr. 4, S. 875–884, 2019, doi: 10.1007/s10010-019-00328-7.
- [223] S. Springer *et al.*, "HMI-testing for (non-) automated vehicles in urban connected mixed traffic: cooperative lane change," in *AutomotiveUI '19: Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications: Adjunct Proceedings*, 2019, S. 271–276.
- [224] S. Sadeghian Borojeni, T. Friedrichs, W. Heuten, A. Lüdtko und S. Boll, "Design of a Human-Machine Interface for Truck Platooning," in *Proceedings of the 2016 CHI*

- Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, J. Kaye, Hg., 2016, S. 2285–2291, doi: 10.1145/2851581.2892477.
- [225] M. Larburu, J. Sanchez und D. J. Rodriguez, “Safe Road Trains for Environment: Human Factors' Aspects in Dual Mode Transport Systems,” in *17th ITS World Congress*, 2010.
- [226] T. Friedrichs, S. S. Borojeni, W. Heuten, A. Lüdtkke und S. Boll, “PlatoonPal: User-Centered Development and Evaluation of an Assistance System for Heavy-Duty Truck Platooning,” in *Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI '16)*, 2016, 269-276, doi: 10.1145/3003715.3005449.
- [227] R. Zheng *et al.*, “Human-machine interface system for simulation-based automatic platooning of trucks,” in *Proceedings of the 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, 2013, S. 535–539, doi: 10.1109/ITSC.2013.6728286.
- [228] S. Krupenia *et al.*, “The 'Methods for designing for future autonomous systems' (MODAS) project : Developing the cab for a highly autonomous truck,” in *Proceedings of the 5th AHFE Conference: Advances in Human Factors and Ergonomics*, 2014.
- [229] S. Kato und T. Sadayuki, “Development of Human Machine Interface for Platooning Systems - Fundamental Proposal of HMI for Risk Avoidance,” in *17th ITS World Congress*, 2010.
- [230] MAN. “GPS-Gestützter Tempomat: MAN EfficientCruise.” <https://www.man.eu/de/de/lkw/assistenzsyste/gps-gestuetzter-tempomat/man-efficientcruise.html> (Zugriff am: 15. Aug. 2022).
- [231] Mercedes Benz Trucks. “Predictive Powertrain Control.: Einfach besser fahren - mit Predictive Powertrain Control.” <https://bit.ly/3EvYdvT> (Zugriff am: 15. Aug. 2022).
- [232] A.-K. Kraft, C. Maag, M. I. Cruz, M. Baumann und A. Neukum, “The effect of visual HMIs of a system assisting manual drivers in manoeuvre coordination in system limit and system failure situations,” *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Jg. 74, S. 81–94, 2020, doi: 10.1016/j.trf.2020.08.002.
- [233] A.-K. Kraft, C. Maag, M. I. Cruz, M. Baumann und A. Neukum, “Effects of explaining system failures during maneuver coordination while driving manual or automated,” *Accident Analysis & Prevention*, Jg. 148, 2020, doi: 10.1016/j.aap.2020.105839.
- [234] A.-K. Kraft, C. Maag und M. Baumann, “Comparing dynamic and static illustration of an HMI for cooperative driving,” *Accident; analysis and prevention*, Early Access. doi: 10.1016/j.aap.2020.105682.
- [235] *Intelligent transport systems — Lane change decision aid systems (LCDAS) — Performance requirements and test procedures*, ISO 17387:2008, ISO/TC 204 Intelligent transport system, Mai. 2008.
- [236] C. Bergenheim *et al.*, “Overview of Platooning Systems,” in *19th ITS World Congress*, 2012.
- [237] P. Kavathekar und Y. Chen, “Vehicle Platooning: A Brief Survey and Categorization,” in *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and*

- Computers and Information in Engineering Conference - August 28 - 31, 2011, 2012*, S. 829–845, doi: 10.1115/DETC2011-47861.
- [238] S. Eilers *et al.*, “COMPANION -- Towards Co-operative Platoon Management of Heavy-Duty Vehicles,” in *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2015, S. 1267–1273, doi: 10.1109/ITSC.2015.208.
- [239] Bundesamt für Güterverkehr (BAG), “Marktbeobachtung Güterverkehr: Auswertung der Arbeitsbedingungen in Güterverkehr und Logistik,” - Fahrerberufe -, Nov. 2021.
- [240] N. T. Richardson, C. Lehmer, M. Lienkamp und B. Michel, “Conceptual design and evaluation of a human machine interface for highly automated truck driving,” in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Changshu, Suzhou, China, 2018, S. 2072–2077, doi: 10.1109/IVS.2018.8500520.
- [241] *DIN EN ISO 9241-210:2020-03 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme*, Berlin.
- [242] N. T. Richardson, “Konzeption und Langzeittest der Mensch-Maschine- Schnittstelle für das hochautomatisierte Fahren im Lkw,” Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [243] A. M. Heinecke, *Mensch-Computer-Interaktion: Basiswissen für Entwickler und Gestalter*, 2. Aufl. (X.media.press). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [244] H. Bubb, “Methoden der ergonomischen Fahrzeugentwicklung,” in *Automobilergonomie*, H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen und M. Vollrath, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 583–616.
- [245] H. Schittenhelm, “Driver Assistance Systems in Oncoming Traffic Situations,” in *22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, 2011.
- [246] M. Zimmermann, L. Fahrmeier und K. J. Bengler, “A Roland for an Oliver? Subjective perception of cooperation during conditionally automated driving,” in *International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*, 2015, S. 57–63, doi: 10.1109/CTS.2015.7210400.
- [247] M. Zimmermann, S. Bauer, N. Lutteken, I. M. Rothkirch und K. J. Bengler, “Acting together by mutual control: Evaluation of a multimodal interaction concept for cooperative driving,” in *Proceedings of the 2014 International Conference on Collaboration Technologies and Systems*, W. W. Smari, G. C. Fox und M. Nygård, Hg., 2014, S. 227–235, doi: 10.1109/CTS.2014.6867569.
- [248] P. Mayring, “Qualitative Inhaltsanalyse,” in *Handbuch qualitative Forschung in der Psychologie*, G. Mey und K. Mruck, Hg., 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag, 2010, S. 601–613.
- [249] J. Fank und M. Lienkamp, “‘I’m Your Personal Co-Driver--How Can I Assist You?’ Assessing the Potential of Personal Assistants for Truck Drivers,” in *Intelligent Human Systems Integration 2019*, Karwowski, Waldemar and Ahram, Tareq, Hg., 2019, S. 795–800, doi: 10.1007/978-3-030-11051-2_121.
- [250] M. D. Graaf, S. B. Allouch und J. V. Dijk, “Why Would I Use This in My Home? A Model of Domestic Social Robot Acceptance,” *Human-Computer Interaction*, Jg. 34, Nr. 2, S. 115–173, 2017.

- [251] J. Fank, C. Knies und F. Diermeyer, "After You! Design and Evaluation of a Human Machine Interface for Cooperative Truck Overtaking Maneuvers on Freeways," in *13th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI'21)*, 2021, S. 90–98, doi: 10.1145/3409118.3475139.
- [252] A. Shepherd, *Hierarchical Task Analysis*, 1. Aufl. Hoboken: Taylor and Francis, 2003.
- [253] J. Nielsen, *Usability Engineering*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1994.
- [254] T. Tullis, "Using Card-sorting Techniques to Organize your Intranet," *Intranet Journal of Strategy & Management*, Jg. 1, S. 1–9, 2003.
- [255] H. L. McQuaid, A. Goel und M. McManus, "When you can't talk to customers," in *Proceedings of the 2003 international conference on Designing pleasurable products and interfaces*, J. Forlizzi und B. Hanington, Hg., 2003, S. 120–125, doi: 10.1145/782896.782926.
- [256] K. A. Ericsson und H. A. Simon, Hg. *Protocol analysis: Verbal reports as data*. Cambridge, Mass: MIT Press, 1993.
- [257] J. Brooke, "SUS: A quick and dirty usability scale," *Usability Evaluation in Industry*, Jg. 189, 1995.
- [258] J.-Y. Jian, A. M. Bisantz und C. G. Drury, "Foundations for an Empirically Determined Scale of Trust in Automated Systems," *International Journal of Cognitive Ergonomics*, Jg. 4, Nr. 1, S. 53–71, 2000, doi: 10.1207/S15327566IJCE0401_04.
- [259] A. Bangor, P. T. Kortum und J. T. Miller, "An Empirical Evaluation of the System Usability Scale," *International Journal of Human–Computer Interaction*, Jg. 24, Nr. 6, S. 574–594, 2008, doi: 10.1080/10447310802205776.
- [260] K. F. van Orden, W. Limbert, S. Makeig und T. P. Jung, "Eye activity correlates of workload during a visuospatial memory task," *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Jg. 43, Nr. 1, S. 111–121, 2001, doi: 10.1518/001872001775992570.
- [261] H. T. Zwahlen, C. C. Adams und D. P. DeBals, "Safety Aspects of CRT Touch Panel Controls in Automobiles," in *Vision in Vehicles II*, 1988, S. 335–344.
- [262] G. Ho, C. T. Scialfa, J. K. Caird und T. Graw, "Visual search for traffic signs: the effects of clutter, luminance, and aging," *Hum Factors*, Jg. 43, Nr. 2, S. 194–207, 2001, doi: 10.1518/001872001775900922.
- [263] 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," *Multimodal Technologies and Interaction*, Jg. 5, Nr. 11, 2021, doi: 10.3390/mti5110069.
- [264] A. Neukum, T. Lübbecke, H.-P. Krüger, C. Mayser und J. Steinle, "ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen," in *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme, Proceedings of the FAS 2008*, Walting im Altmühltal, Deutschland, 2008.
- [265] J. Fank und F. Diermeyer, "“Look Me in the Eyes!” Analyzing the Effects of Embodiment in Humanized Human-Machine Interaction in Heavy Trucks," in *2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2021, S. 740–747, doi: 10.1109/IV48863.2021.9575548.

- [266] R. Araujo, E. Anjos und D. R. Silva, "Trends in the Use of Design Thinking for Embedded Systems," in *2015 15th International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA 2015)*, S. Misra, B. O. Apduhan, M. L. Gavrilova, D. Tanar, O. Gervasi und B. Murgante, Hg., 2015, S. 82–86, doi: 10.1109/ICCSA.2015.25.
- [267] M. G. Luchs, "A Brief Introduction to Design Thinking," in *Design thinking: New product development essentials from the PDMA*, A. Griffin, M. G. Luchs und S. K. Swan, Hg., Hoboken: Wiley, 2016, S. 1–12.
- [268] D. R. Schallmo, *Design Thinking erfolgreich anwenden: So entwickeln Sie in 7 Phasen kundenorientierte Produkte und Dienstleistungen* (SpringerLink Bücher). Wiesbaden: Springer Gabler, 2017.
- [269] C. M. Seifert, R. Gonzalez, S. Yilmaz und S. Daly, "Boosting Creativity in Idea Generation Using Design Heuristics," in *Design thinking: New product development essentials from the PDMA*, A. Griffin, M. G. Luchs und S. K. Swan, Hg., Hoboken: Wiley, 2016, S. 71–86.
- [270] Robot Operating System (ROS). <https://www.ros.org/>
- [271] CereProc. "Sprachsynthese." <https://www.cereproc.com/de/homede>
- [272] Interbotix. "Arbotix Robocontroller." <https://www.interbotix.com/arbotix-robocontroller>
- [273] Li Gong, "How social is social responses to computers? The function of the degree of anthropomorphism in computer representations," *Computers in Human Behavior*, Jg. 24, Nr. 4, S. 1494–1509, 2008, doi: 10.1016/j.chb.2007.05.007.
- [274] S. Noyan Tillman, "Entwicklung und Aufbau eines Wizard of Oz Set Up zur Evaluation von multimodalen Mensch-Roboter-Interaktionen im Lkw," Bachelor Thesis, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2018.
- [275] J. Lasseter, "Principles of traditional animation applied to 3D computer animation," *SIGGRAPH Comput. Graph.*, Jg. 21, Nr. 4, S. 35–44, 1987, doi: 10.1145/37402.37407.
- [276] A. Beck, L. Cañamero und K. A. Bard, "Towards an Affect Space for robots to display emotional body language," in *19th International Symposium in Robot and Human Interactive Communication*, 2010, S. 464–469, doi: 10.1109/ROMAN.2010.5598649.
- [277] J. F. Kelley, "An iterative design methodology for user-friendly natural language office information applications," *ACM Trans. Inf. Syst.*, Jg. 2, Nr. 1, S. 26–41, 1984, doi: 10.1145/357417.357420.
- [278] N. Dahlbäck, A. Jönsson und L. Ahrenberg, "Wizard of Oz studies," in *Proceedings of the 1993 International Workshop on Intelligent User Interfaces*, D. Murray, W. E. Hefley und W. D. Gray, Hg., 1993, S. 193–200, doi: 10.1145/169891.169968.
- [279] J. Fank, L. Santen, C. Knies und F. Diermeyer, "'Should We Allow Him to Pass?' Increasing Cooperation Between Truck Drivers Using Anthropomorphism," in *Advances in Human Factors of Transportation*, N. Stanton, Hg., 2020, S. 475–484.
- [280] R. Likert, "A technique for measurement of attitudes," *Archives of Psychology*, Nr. 140, S. 5–55, 1932.
- [281] M. Hassenzahl, M. Burmester und F. Koller, "AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität," in *Mensch & Computer 2003*:

- Interaktion in Bewegung; Tagungsbeiträge der dritten Konferenz Mensch & Computer*, Bd. 57, G. Szwillus und J. Ziegler, Hg., 2003, S. 187–196.
- [282] M. M. Bradley und P. J. Lang, “Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential,” *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, Jg. 25, Nr. 1, S. 49–59, 1994, doi: 10.1016/0005-7916(94)90063-9.
- [283] C. Bartneck, D. Kulić, E. Croft und S. Zoghbi, “Measurement Instruments for the Anthropomorphism, Animacy, Likeability, Perceived Intelligence, and Perceived Safety of Robots,” *International Journal of Social Robotics*, Jg. 1, Nr. 1, S. 71–81, 2009, doi: 10.1007/s12369-008-0001-3.
- [284] L. Hoffmann, N. Bock und A. M. v.d. Rosenthal Pütten, “The Peculiarities of Robot Embodiment (EmCorp-Scale),” in *HRI’18: Proceedings of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human Robot Interaction*, T. Kanda, S. Šabanović, G. Hoffman und A. Tapus, Hg., 2018, S. 370–378, doi: 10.1145/3171221.3171242.
- [285] C. G. Kohler *et al.*, “Differences in facial expressions of four universal emotions,” *Psychiatry Research*, Jg. 128, Nr. 3, S. 235–244, 2004, doi: 10.1016/j.psychres.2004.07.003.
- [286] J. Sadr, I. Jarudi und P. Sinha, “The role of eyebrows in face recognition,” *Perception*, Jg. 32, Nr. 3, S. 285–293, 2003, doi: 10.1068/p5027.
- [287] N. Cohn, B. Murthy und T. Foulsham, “Meaning above the head: combinatorial constraints on the visual vocabulary of comics,” *Journal of Cognitive Psychology*, Jg. 28, Nr. 5, S. 559–574, 2016, doi: 10.1080/20445911.2016.1179314.
- [288] S. Smialy, “Entwicklung und Evaluation einer Mensch-Maschine Interaktion für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen,” Bachelor Thesis, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [289] N. Cohn, *The visual language of comics: Introduction to the structure and cognition of sequential images* (Bloomsbury advances in semiotics). London: Bloomsbury Academic, 2014.
- [290] F. Diermeyer, M. Wolf, J. Fank und C. Knies, “HMI Development for Cooperative Driver Assistance for Trucks on Highways: Final Event”
- [291] L. Steckhan *et al.*, “Partnerspezifischer Schlussbericht der Technischen Universität München zum Projekt IMAGinE,” Technische Universität München, Garching, Nov. 2022.
- [292] J. Bortz und N. Döring, *Forschungsmethoden und Evaluation: für Human- und Sozialwissenschaftler*, 4. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [293] L. Gliniorz, “Simulation kooperativer Fahrerassistenzsysteme zur Erprobung von Fahrer-Fahrzeug Interaktionskonzepten,” Bachelorthesis, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [294] B. Laugwitz, T. Held und M. Schrepp, “Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire,” in *HCI and Usability for Education and Work* (Lecture Notes in Computer Science 5298), A. Holzinger, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 63–76.
- [295] M. Schrepp, A. Hinderks und J. Thomaschewski, “Design and Evaluation of a Short Version of the User Experience Questionnaire (UEQ-S),” *International Journal of*

- Interactive Multimedia and Artificial Intelligence (IJIMAI)*, Jg. 4, Nr. 6, S. 103, 2017, doi: 10.9781/ijimai.2017.09.001.
- [296] F. Neyer, J. Felber und C. Gebhardt, "Entwicklung und Validierung einer Kurzsкала zur Erfassung von Technikbereitschaft," *Diagnostica*, Jg. 58, S. 87–99, 2012, doi: 10.1026/0012-1924/a000067.
- [297] J. Bortz und C. Schuster, *Statistik: für Human- und Sozialwissenschaftler*, 7. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [298] A. Field, J. Miles und Z. Field, *Discovering statistics using R*. Los Angeles, London, New Delhi, Singapore, Washington, DC: Sage, 2012.
- [299] S. S. Sawilowsky, "Wilcoxon Signed Ranks Test," in *Encyclopedia of Measurement and Statistics*, N. Salkind, Hg., 2455 Teller Road, Thousand Oaks California 91320 United States of America: Sage Publications, Inc, 2007, S. 1051–1053.
- [300] R. A. Fisher, "Theory of Statistical Estimation," *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Jg. 22, Nr. 5, S. 700–725, 1925, doi: 10.1017/S0305004100009580.
- [301] M. Schrepp. "Data Analysis Tool (UEQ-S)." https://www.ueq-online.org/Material/Short_UEQ_Data_Analysis_Tool.xlsx (Zugriff am: 7. Dez. 2021).
- [302] H.-P. Schöner und B. Morys, "Dynamische Fahrsimulatoren," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 139–154.
- [303] H. Esser, *Können Befragte lügen? Zum Konzept des "wahren Wertes" im Rahmen der handlungstheoretischen Erklärung von Situationseinflüssen bei der Befragung* (ZUMA-Arbeitsbericht 1986/02). Mannheim: Zentrum für Umfragen, Methoden und Analysen - ZUMA-, 1986.
- [304] D. M. Randall und M. F. Fernandes, "The social desirability response bias in ethics research," *Journal of Business Ethics*, Jg. 10, Nr. 11, S. 805–817, 1991, doi: 10.1007/BF00383696.
- [305] D. R. Large, K. Harrington, G. Burnett, J. Luton, P. Thomas und P. Bennett, "To Please in a Pod," in *Proceedings of 11th International ACM Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, Unknown, Hg., 2019, S. 49–59, doi: 10.1145/3342197.3344545.
- [306] D. A. Norman, *Emotional design: Why we love (or hate) everyday things*. New York: Basic Books, 2004.
- [307] A. Weiss und C. Bartneck, "Meta analysis of the usage of the Godspeed Questionnaire Series," in *2015 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2015)*, 2015, S. 381–388, doi: 10.1109/RO-MAN.2015.7333568.
- [308] M. Marquardt, "Anthropomorphisierung in der Mensch-Roboter Interaktionsforschung: theoretische Zugänge und soziologisches Anschlusspotential," *1866-3877*, Jg. 1/2017, 2017.

- [309] G. Skantze, "Error Handling in Spoken Dialogue Systems: Managing Uncertainty, Grounding and Miscommunication," Dissertation, KTH Computer Science and Communications, KTH, Stockholm, Sweden, 2007.
- [310] S. Loth, M. Giuliani und J. P. d. Ruiter, "Ghost-in-the-Machine: Initial Results," in *2014 9th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, 2014, S. 234–235, doi: 10.1145/2559636.2563696.
- [311] ITF Global. "Pandemie der Ausbeutung im Europäischen Güterkraftverkehr: Bericht von VNB, ITF und IUL über den europäischen Straßentransport." <https://bit.ly/3gnochf>
- [312] S. Fekete, M. Vollrath, A. K. Huemer und C. Salchow, "Interaktionen im Straßenverkehr: Kooperation und Konflikt," 8. *VDI-Tagung Der Fahrer im 21. Jahrhundert*, Nr. 2264, S. 325–338, 2015.
- [313] L. Prasz, F. Geßler, J. Reinhardt und K. Bengler, "You do the talking. Passengers are happy when the automation decides on cooperation," in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2018, S. 1611–1616, doi: 10.1109/ITSC.2018.8569287.
- [314] G. Meixner, Hg. *Automotive user interfaces: Creating interactive experiences in the car* (Human-computer interaction series). Cham: Springer, op. 2017.
- [315] J. Rolny, "Eine nutzerzentrierte Entwicklung einer Mensch-Maschine-Interaktion für ein kooperatives Fahrerassistenzsystem für Lkw-Fahrer," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2018.

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)

[22] J. Fank, P. Krebs, und F. Diermeyer, “Analyse von Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen für die Entwicklung kooperativer Fahrerassistenzsysteme,” *Forschung im Ingenieurwesen*, Bd. 83, Rn. 2, S. 305–316, 2019.

[110] J. Fank, N. T. Richardson, und F. Diermeyer, “Anthropomorphising driver-truck interaction: a study on the current state of research and the introduction of two innovative concepts,” *Journal on Multimodal User Interfaces*, Bd. 13, Rn. 2, S. 99–117, 2019.

[263] 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,” *Multimodal Technologies and Interaction*, Bd. 5, Rn. 11, 2021.

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

[249] J. Fank und M. Lienkamp, ““I’m Your Personal Co-Driver--How Can I Assist You?” Assessing the Potential of Personal Assistants for Truck Drivers,” in *Intelligent Human Systems Integration 2019*, Karwowski, Waldemar and Ahram, Tareq, Hg., 2019, S. 795–800, doi: 10.1007/978-3-030-11051-2_121.

[179] C. Knies, J. Fank und F. Diermeyer, “How to Measure Cooperation? Cost Functions for Cooperative Maneuver Planning on Highways*,” in *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2019, S. 2483–2489, doi: 10.1109/ITSC.2019.8917075.

[279] J. Fank, L. Santen, C. Knies und F. Diermeyer, ““Should We Allow Him to Pass?” Increasing Cooperation Between Truck Drivers Using Anthropomorphism,” in *Advances in Human Factors of Transportation*, N. Stanton, Hg., 2020, S. 475–484.

[251] J. Fank, C. Knies und F. Diermeyer, “After You! Design and Evaluation of a Human Machine Interface for Cooperative Truck Overtaking Maneuvers on Freeways,” in *13th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI’21)*, 2021, S. 90–98, doi: 10.1145/3409118.3475139.

[265] J. Fank und F. Diermeyer, ““Look Me in the Eyes!” Analyzing the Effects of Embodiment in Humanized Human-Machine Interaction in Heavy Trucks,” in *2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2021, S. 740–747, doi: 10.1109/IV48863.2021.9575548.

Patente

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

- [191] J. Fank, C. Knies, F. Diermeyer, L. Prasch, J. Reinhardt und K. Bengler, "Factors for User Acceptance of Cooperative Assistance Systems: A Two-Step Study Assessing Cooperative Driving," in *8. Tagung der Fahrerassistenz*, 2017.
- [24] J. Fank, P. Krebs und F. Diermeyer, "Analyse von Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen für die Entwicklung kooperativer Fahrerassistenzsysteme," Präsentation auf der VDI/VW Gemeinschaftstagung.
- [290] F. Diermeyer, M. Wolf, J. Fank und C. Knies, "HMI Development for Cooperative Driver Assistance for Trucks on Highways: Final Event"
- [291] L. Steckhan *et al.*, "Partnerspezifischer Schlussbericht der Technischen Universität München zum Projekt IMAGinE," Technische Universität München, Garching, Nov. 2022.

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

Dissertationsrelevante Open-Source Software

Betreute Studienarbeiten

- [315] J. Rolny, "Eine nutzerzentrierte Entwicklung einer Mensch-Maschine-Interaktion für ein kooperatives Fahrerassistenzsystem für Lkw-Fahrer," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2018
- [274] S. Noyan Tillman, "Entwicklung und Aufbau eines Wizard of Oz Set Up zur Evaluation von multimodalen Mensch-Roboter-Interaktionen im Lkw," Bachelor Thesis, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching, 2018.
- [293] L. Gliniorz, "Simulation kooperativer Fahrerassistenzsysteme zur Erprobung von Fahrer-Fahrzeug Interaktionskonzepten," Bachelorthesis, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [288] S. Smialy, "Entwicklung und Evaluation einer Mensch-Maschine Interaktion für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen," Bachelor Thesis, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.

Anhang

Anhang A	HMI-Konzepte	xxxiv
Anhang B	HMI-Skizze	xxxvi
Anhang C	Zustände des Prototyp 3.0	xxxvii
Anhang D	Wizard of Oz Framework	xli
Anhang E	Zustände der vermenschlichten HMI	xlii
Anhang F	Einfluss der Kontrollvariablen.....	xliii

Anhang A HMI-Konzepte



Abbildung A.1: HMI-Konzept des Spurwechsellassistent von BMW [288, S. 17]

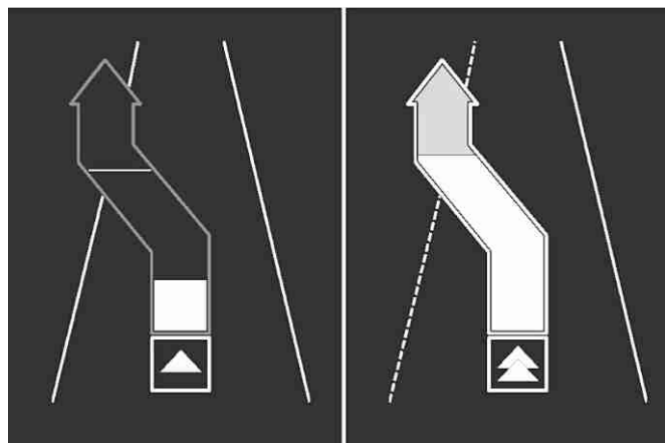


Abbildung A.2: Darstellung des zeitlichen Horizonts bis zum Spurwechsel im HMI-Konzept des Fahrstreifenwechsellassistent von Habenicht [166, S. 63]

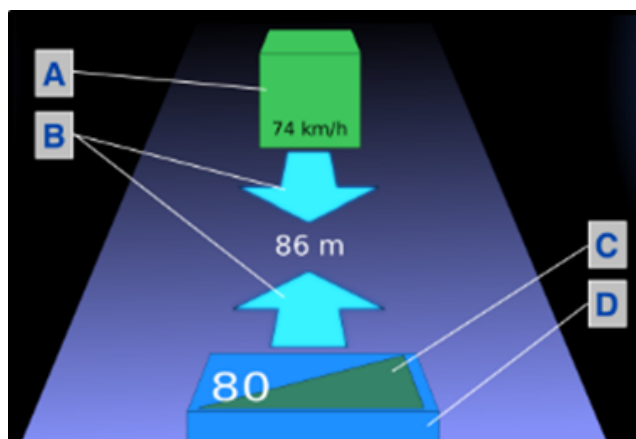


Abbildung A.3: Darstellung der Kopplung im HMI-Konzept des Projekts COMPANION [226, S. 272]



Abbildung A.4: Darstellung der Hysterese im HMI-Konzept des ECO-Tempomat von Mercedes Benz Trucks – Predictive Powertrain Control im Actros [231]

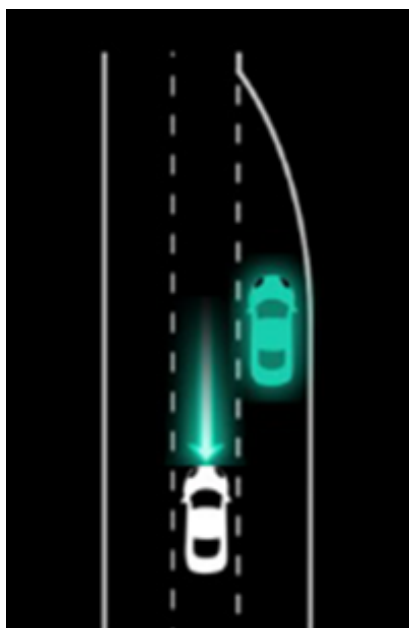


Abbildung A.5: Darstellung der offenen Lücke im HMI-Konzept des CoDAS für das Einfädeln an Anschlussstellen auf Autobahnen [209, S. 192]

Anhang B HMI-Skizze

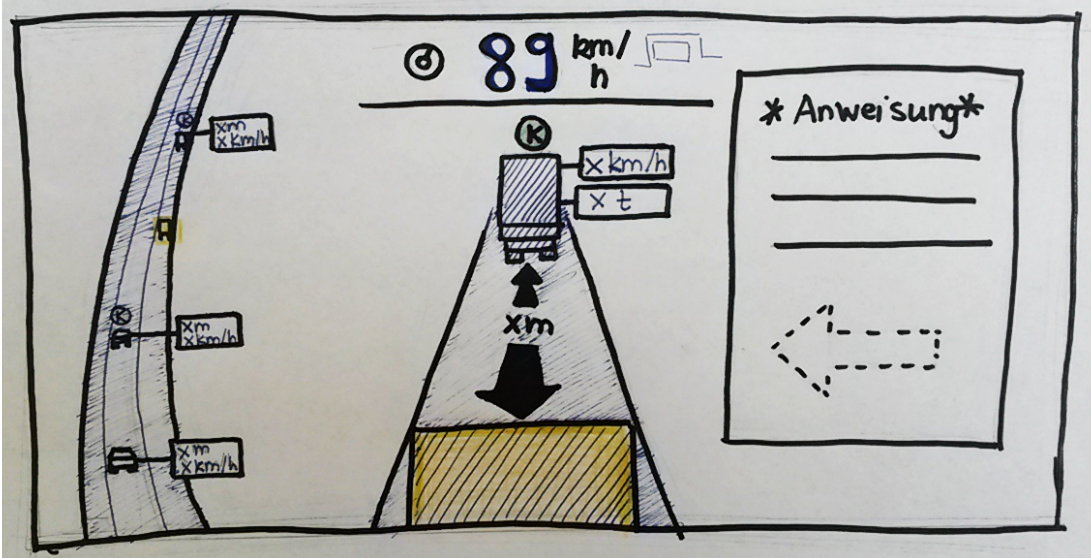
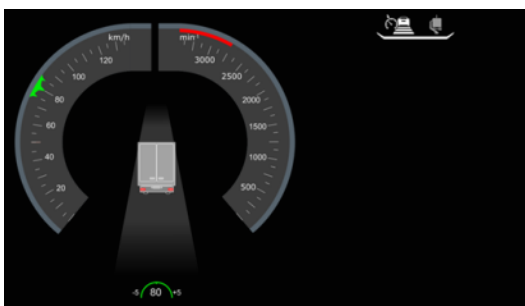


Abbildung B.1: Skizze eines HMI-Zustands [315, S. 64]

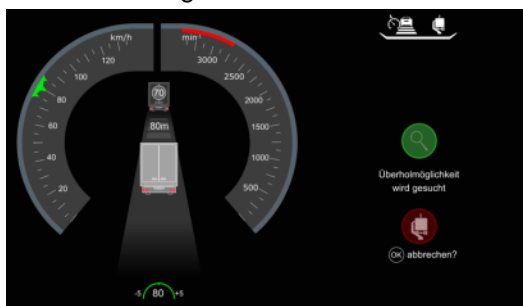
Anhang C Zustände des Prototyp 3.0

HMI-Zustände 1-8 in der Perspektive des Überholenden

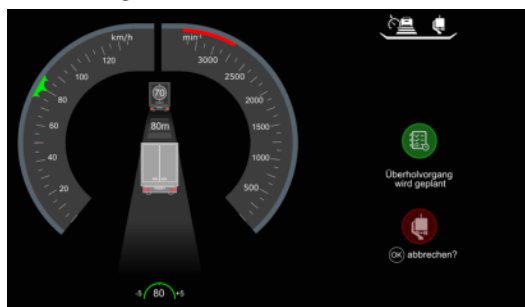
1. Solo



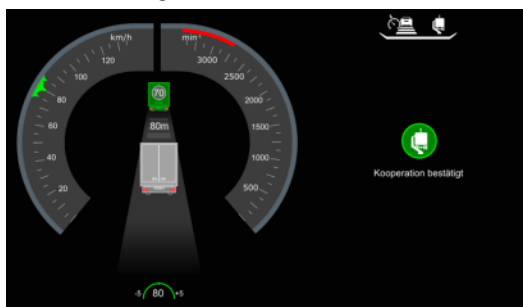
2. Initialisierung



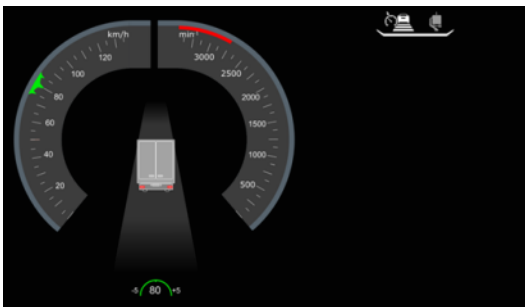
3. Planung



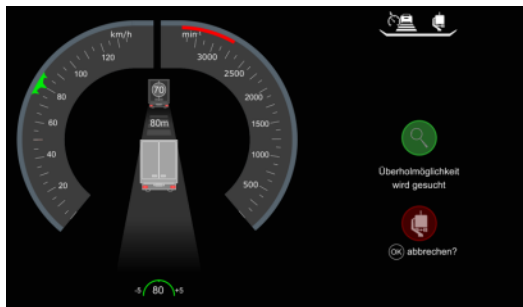
4. Annäherung



5. Abstand absichern (pre)



6. Spurwechsel nach links



7. Vorbeifahren



8. Spurwechsel nach rechts

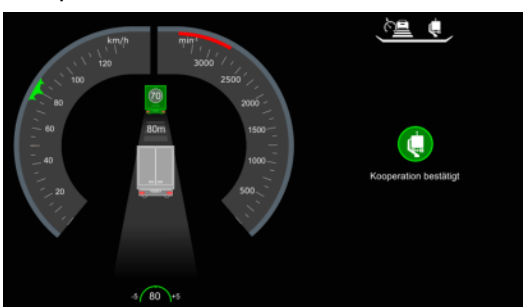
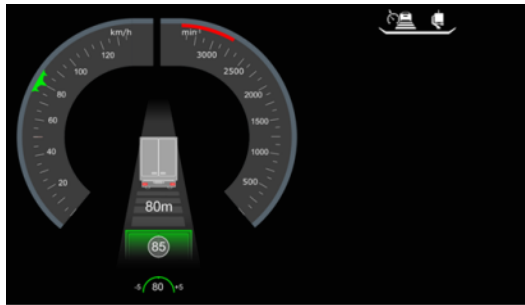


Abbildung C.1: Zustände 1-8 des HMI-Prototyp 3.0 in der Perspektive des Überholenden [288]

HMI-Zustände 9 & 10 in der Perspektive des Überholenden

9. Abstand absichern (post)



10. Ende

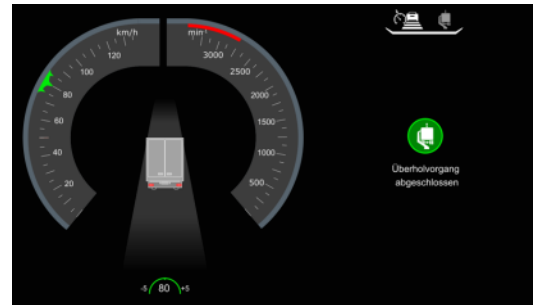
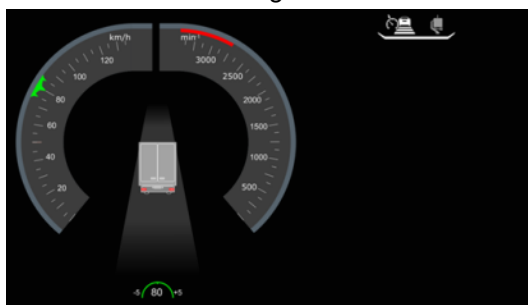


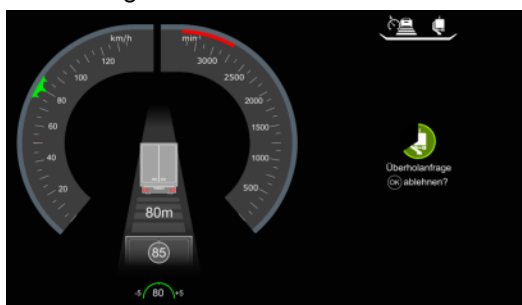
Abbildung C.2: Zustände 9 und 10 des HMI-Prototyp 3.0 in der Perspektive des Überholenden [288]

HMI-Zustände 1-10 in der Perspektive des Überholten

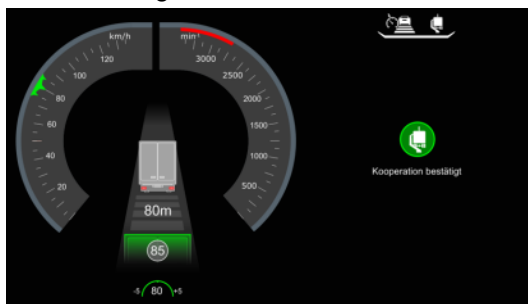
1. Solo/2. Initialisierung



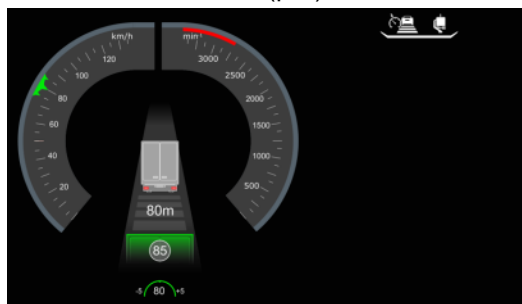
3. Planung



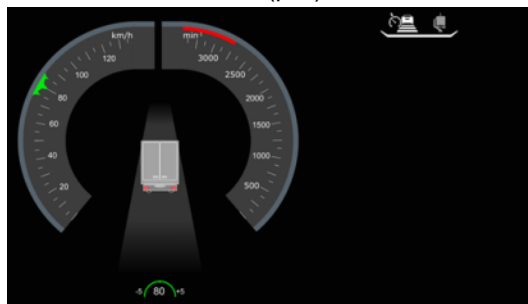
4. Annäherung



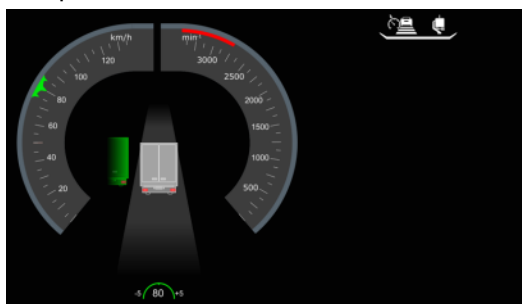
5. Abstand absichern (pre)



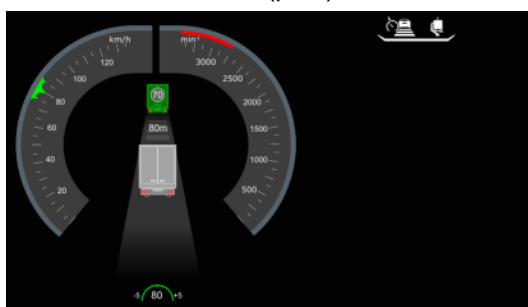
5. Abstand absichern (pre)



6. Spurwechsel nach links/7./8.



9. Abstand absichern (post)



10. Ende

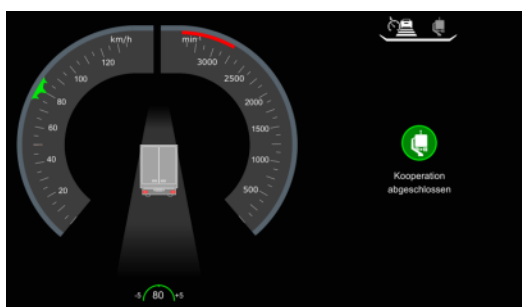
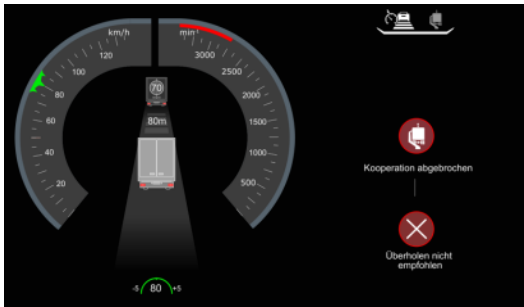


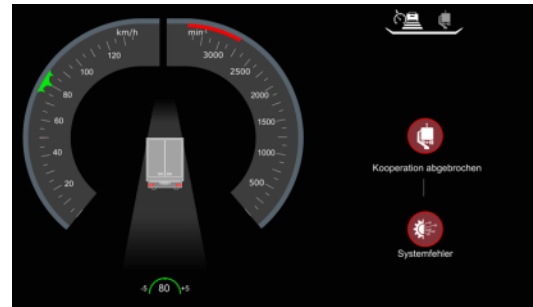
Abbildung C.3: Zustände 1-10 des HMI-Prototyp 3.0 in der Perspektive des Überholten [288]

HMI-Abbruchzustände

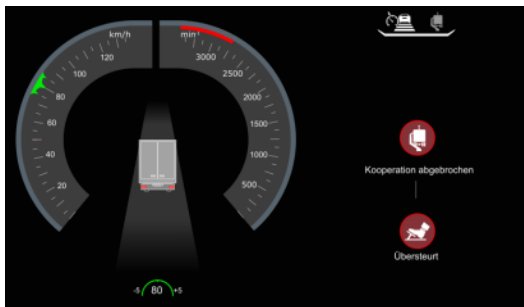
Zustand: Überholen nicht empfohlen



Zustand: Systemfehler



Zustand: Übersteuert



Zustand: Rückfallebene

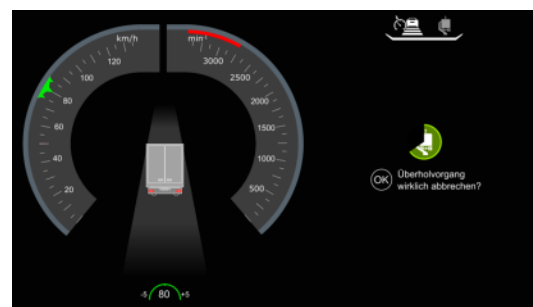


Abbildung C.4: Abbruchzustände des HMI-Prototyp 3.0 [288]

Anhang D Wizard of Oz Framework

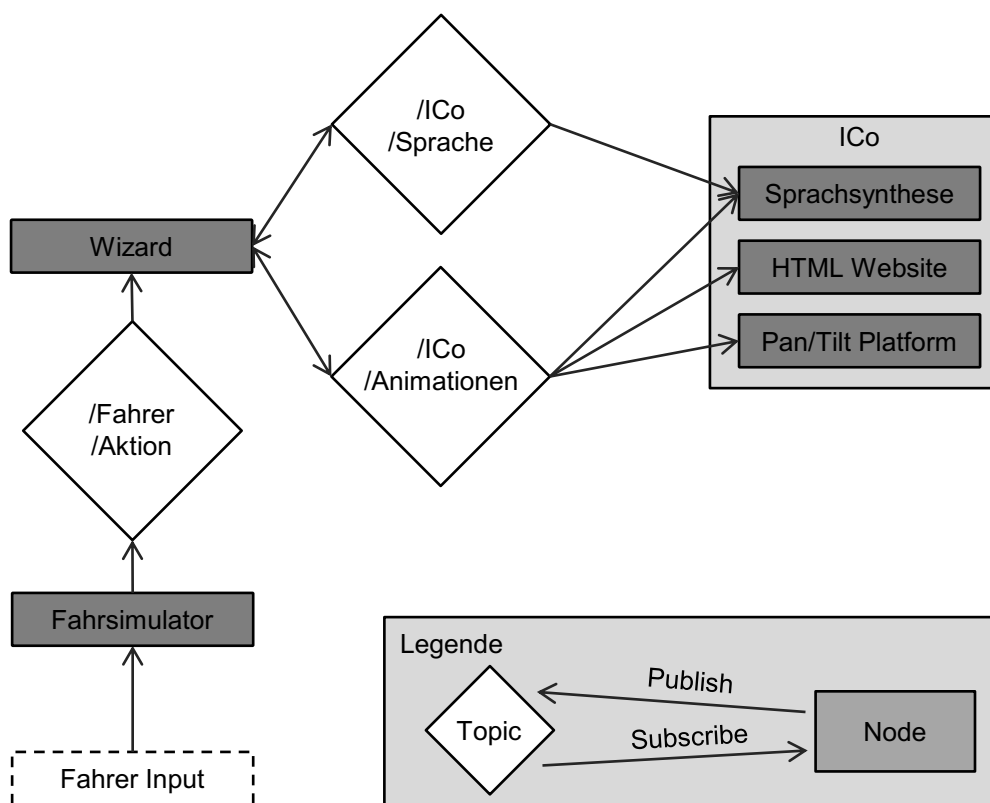
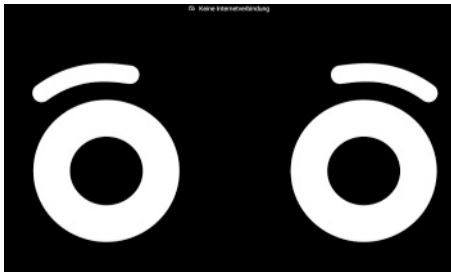


Abbildung D.1: Wizard of Oz Framework in ROS

Anhang E Zustände der vermenschlichten HMI

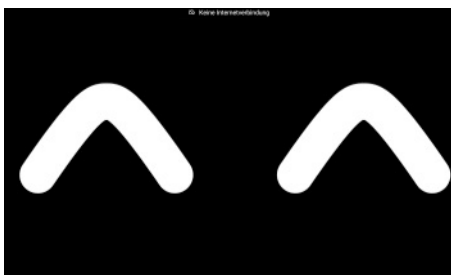
Zustand: Default



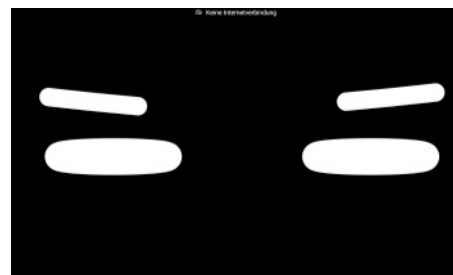
Zustand: Schlafend



Zustand: Glücklich



Zustand: Wütend



Zustand: Traurig



Zustand: Zwinkernd

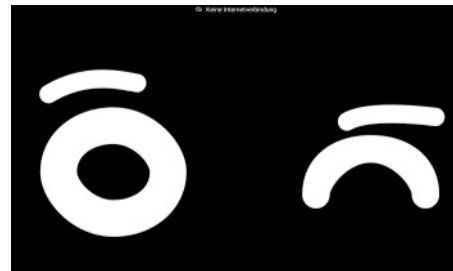


Abbildung E.1: Zustände der vermenschlichten HMI [288]

Anhang F Einfluss der Kontrollvariablen

Tabelle F.1 Einfluss der Technikbereitschaft auf die abhängigen Variablen

Variable	HMI	HMI + ICo
Nützlichkeit	$r_s = 0,39; p < ,05$	$r_s = 0,42; p < ,05$
Zufriedenheit	$r_s = 0,40; p < ,05$	$r_s = 0,18; p = ,35$
Vertrauen	$r_s = 0,20; p = ,30$	$r_s = 0,13; p = ,48$
Usability	$r_s = 0,06; p = ,77$	$r_s = 0,11; p = ,57$
Hedonische Qualität	$r_s = 0,01; p = ,96$	$r_s = 0,24; p = ,21$
Pragmatische Qualität	$r_s = 0,14; p = ,45$	$r_s = -0,10; p = ,96$

Tabelle F.2 Einfluss der Tendenz zum Anthropomorphisieren auf die abhängigen Variablen und den situativen Anthropomorphismus

Variable	HMI	HMI + ICo
Nützlichkeit	$r_s = 0,15; p = ,42$	$r_s = 0,06; p = ,77$
Zufriedenheit	$r_s = 0,14; p = ,45$	$r_s = 0,03; p = ,88$
Vertrauen	$r_s = 0,07; p = ,74$	$r_s = -0,04; p = ,83$
Usability	$r_s = 0,12; p = ,52$	$r_s = -0,174; p = ,36$
Hedonische Qualität	$r_s = -0,15; p = ,43$	$r_s = -0,15; p = ,94$
Pragmatische Qualität	$r_s = 0,01; p = ,94$	$r_s = -0,10; p = ,96$
Situativer Anthropomorphismus	$r_s = 0,25; p = ,19$	$r_s = 0,24; p = ,20$