

Konzeption, Entwicklung und Evaluation einer multimodalen Mensch-Maschine-Schnittstelle zur proaktiven Fahrerwarnung zum Schutz schwächerer Verkehrsteilnehmer

Bericht zum Interdisziplinären Projekt
an der Munich School of Engineering
der Technischen Universität München.

Betreut von Dipl.-Wirtsch.-Ing. (Univ.) M.Sc. Christian Lehning
Lehrstuhl für Ergonomie

Eingereicht von Deike Albers, B.Sc | Matrikelnummer: 03686432
Lukas Flohr, B.A. | Matrikelnummer: 03686940
Dominik Janetzko, B.Sc. | Matrikelnummer: 03681744

Eingereicht München, den 20.04.2018

Danksagung und allgemeine Hinweise

Wir möchten uns auf diesem Wege bei allen Beteiligten an diesem Projekt bedanken.

Insbesondere gilt dieser Dank...

...Sebastian Krebs, Fabian Flohr, Ulrich Kreßel und Allen, die uns bei der Durchführung des Projekts unterstützt haben.

Für die Ermöglichung des Projekts und tatkräftige Unterstützung in allen Projektphasen.

...Christian Lehsing.

Für Deine schnellen Antworten (aus aller Welt), helfende Beratung und tolle Projektbetreuung.

...allen anderen IDP-Gruppen.

Für Eure hilfreichen Anmerkungen zu unseren Projektschritten.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im Text verallgemeinernd das generische Maskulinum verwendet. Diese Formulierungen umfassen gleichermaßen Personen jeglichen Geschlechts; alle sind damit selbstverständlich gleichberechtigt angesprochen.

Ebenfalls aus Gründen der Verständlichkeit werden im weiteren Verlauf die jeweiligen englischen Originalbegriffe verschiedener Modelle und Systeme verwendet, sofern diese im fachlichen Sprachgebrauch üblich sind.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen.....	2
2.1	Informationsverarbeitung	2
2.2	Mensch-Maschine-Interaktion im Automobil	7
2.3	Fahrerassistenzsysteme	13
3	Konzeption und Entwicklung.....	18
3.1	Motivation und Ziel.....	18
3.2	Warnkonzept.....	19
3.3	Prototyp.....	28
4	Evaluation.....	41
4.1	Methodik.....	41
4.2	Vorbereitungen	48
4.3	Durchführung	51
4.4	Ergebnisse	52
5	Diskussion	67
5.1	Interpretation.....	67
5.2	Verbesserungspotential	74
5.3	Limitierung.....	77
5.4	Ausblick	78
6	Fazit.....	80
A	Anhang	x

Abkürzungsverzeichnis

A	
ABS - Antiblockiersystem.....	14
ACC - Adaptive Cruise Control.....	13
ADAS - Advanced Driver Assistance Systems	12
C	
CC - Cruise Control.....	14
CoP - Code of Practice.....	14
D	
DALI - Driving Activity Load Index.....	47
DAS - Driver Assistance Systems.....	13
E	
ESP - Elektronisches Stabilitätsprogramm.....	14
F	
fps - frames per second.....	35
FVC - Forward Vehicle Collision.....	15
FVCA - Forward Vehicle Collision Avoidance	15
FVCC - Forward Vehicle Collision Conditioning.....	15
FVCM - Forward Vehicle Collision Mitigation.....	15
FVCW - Forward Vehicle Collision Warning.....	5
G	
GNSS - Globales Navigationssatellitensystem.....	14
H	
HMI - Human-Machine-Interface.....	1
HUD - Head-up Display.....	30
I	
IDP - Interdisziplinäre Projekt	82
L	
LKA - Lane Keeping Assist.....	14
P	
POC - Probability of Collision.....	23
R	
ROS - Robot Operating System.....	32

S	
SSD - Single Shot Detector	35
SUS - System Usability Scale.....	46
T	
TTC - Time to Collision.....	23
U	
UFOV - Useful Field of View.....	4
V	
VRU - Vulnerable Road User.....	1

1 Einleitung

Besonders gefährdete bzw. schwächere Verkehrsteilnehmer, im Englischen Vulnerable Road Users (VRUs), bilden einen großen Anteil der jährlichen Verkehrstoten. Im Jahr 2015 machten weltweit 22% der tödlich verunglückten Verkehrsteilnehmer Fußgänger und 4% Fahrradfahrer aus (World Health Organization, 2015). Bei einem weltweit steigenden Grad der Motorisierung ist es von besonderer Wichtigkeit, die Interaktion zwischen VRUs und motorisierten Fahrzeugen sicherer zu gestalten. Während aktuelle Assistenzsysteme in sicherheitskritischen Situationen bereits aktiv eingreifen (z.B. Bengler et al., 2014), beispielsweise bei einer automatischen Gefahrenbremsung und korrigierenden Lenkeingriffen zu Spurhaltung, kann diese Schutzwirkung durch ein effektives Fahrerwarnsystem potenziell noch weiter vergrößert werden. Durch eine frühzeitige Information des Menschen kann dieser in die Lage versetzt werden, auch komplexe Situationen bei der Bedienung von (automatisierten) Systemen zu beherrschen und komplexe Probleme zu lösen (z.B. Bainbridge, 1983). Im Automobil soll somit eine rechtzeitige und gezielte Warnung des Fahrers diesen auch in komplexen Situationen in die Lage versetzen, rechtzeitig entsprechende unfallvermeidende Eingriffe vorzunehmen. Viele der existierenden Fahrerwarnsysteme setzen bereits einfache visuelle (z.B. rotes Blinklicht) und akustische Merkmale (z.B. hohe kurze Sinustöne) ein. Die Informationsmenge sowie deren Darstellung ist dadurch aber noch nicht optimal ausgeschöpft. Durch eine intelligentere Aufbereitung der aus den heutigen umgebungserfassenden Sensorsystemen zur Verfügung stehenden Informationen kann die Fahrerwarnung potenziell verbessert und die Aufmerksamkeit des Fahrers frühzeitig besser gesteuert werden.

Um den Fahrer vor Gefahren durch bzw. für VRUs zu warnen, soll ein multimodales Warnkonzept erarbeitet werden. Als Ausgangsbasis dienen dafür Gestaltungsempfehlungen aus der Literatur oder vorhergehenden Projekten, wie insbesondere der im EU-Projekt UR:BAN (Bengler, Drüke, Hoffmann, Manstetten & Neukum, 2018) erarbeitete Warnbaukasten. Im Rahmen des Projekts ist die Konzeption eines Human-Machine-Interfaces (HMIs) zur Anzeige von drei Warnstufen (Frühwarnung, Warnung, Akutwarnung) mit einem Fokus auf die Nutzung visueller und akustischer Signale angedacht. Das erarbeitete Konzept wird prototypisch umgesetzt und in einem Realfahrzeug-Versuchsträger der Daimler AG implementiert, um das HMI auf Basis realistischer Daten des umgebungserfassenden Sensorsystems mittels Probandentests qualitativ zu evaluieren. Speziell besteht der Prototyp insbesondere aus der Kombination einer LED-Leiste im Fahrzeugcockpit mit Auditory Icons als akustischem Signal. Mit diesen Komponenten sollen dem Fahrer mehr Informationen über die Art der kritischen Situation gegeben werden, beispielsweise hinsichtlich Klassifikation des Objekts (z.B. VRU), die Position dessen oder die Kritikalität der Situation. Die Evaluation beschränkt sich dabei aus Zeit- und Sicherheitsgründen auf Fußgänger-Szenarien. Nebst einer objektiven Bewertung des Konzepts und des bis dato erstellten Prototyps werden aus der Evaluation Optimierungspotenziale und Verbesserungsmaßnahmen für die Weiterentwicklung von Konzept und Prototyp abgeleitet.

2 Grundlagen

2.1 Informationsverarbeitung

Um zu verstehen, welche Informationen einem Fahrer in einer möglichen Kollisionssituation helfen können, einen Aufprall mit einem VRU zu vermeiden, ist es sinnvoll, zunächst zu betrachten, wie die menschliche Informationsverarbeitung im Allgemeinen funktioniert. Dieses Verständnis unterstützt den Entwickler eines Systems darin, das System möglichst gut an die Gegebenheiten des Einsatzgebietes anzupassen (Wickens, Lee, Liu & Gordon-Becker, 2014). Systematische Modelle, die den Informationsverarbeitungsprozess in mehrere Unterschnitte gliedern, können dabei helfen, den gesamten Prozess nachzuvollziehen und gezielt zu analysieren. Ein solches Modell stellt beispielsweise das von Wickens et al. (2014) vorgestellte Modell der Informationsverarbeitung dar.

Das Modell legt nahe, dass sich der globale Informationsverarbeitungsprozess des Menschen in mehrere Teilschnitte zerlegen lässt, die miteinander verzahnt sind und teilweise nacheinander, teilweise gleichzeitig erfolgen. Ein Schema des Modells ist in Abbildung 1 dargestellt. Es zeigt, dass die menschliche Informationsverarbeitung von mehreren Systemen abhängt, welche im Gesamtkontext jeweils unterschiedliche Aufgaben übernehmen. Diese Systeme sind (anders als beispielsweise bei technischen Konzepten) keinen gänzlich genau definierten Komponenten des menschlichen Körpers zugeschrieben. Als grobes Konzept können sie aber dazu dienen, besser zu verstehen, wie die einzelnen Stufen des Prozesses durchlaufen werden.

Da es sich bei dem angedachten Warnsystem um ein Anzeigesystem ohne weitere nutzerseitige Eingabemöglichkeiten handelt, soll im weiteren Verlauf insbesondere der linke Teil des Schaubilds genauer betrachtet werden.

Im Folgenden wird dazu das Informationsverarbeitungsmodell nach Wickens et al. (2014) vorgestellt und die relevanten Prozessschritte genauer erläutert. In Kapitel 2.3 Warnkonzept sollen dann Ableitungen vorgestellt werden, die sich daraus jeweils für die weitere Konzeption ergeben. Da der deutsche Sprachgebrauch beispielsweise bei der Verwendung des Begriffs der „Wahrnehmung“ eine klare Trennung zwischen verschiedenen Schritten im Informationsverarbeitungsprozess erschwert, soll für die weitere Beschreibung auf die englischen Originalbegrifflichkeiten zurückgegriffen werden.

2.1.1 Sensory Register

Folgt man dem Wickens-Modell, so wäre hier zunächst der Schritt des Sensory Register zu nennen. Wie der Name bereits andeutet, beschreibt diese Stufe die basale sensorische Aufnahme der jeweiligen Reize. In der Wahrnehmungspsychologie wird dieser Schritt auch als

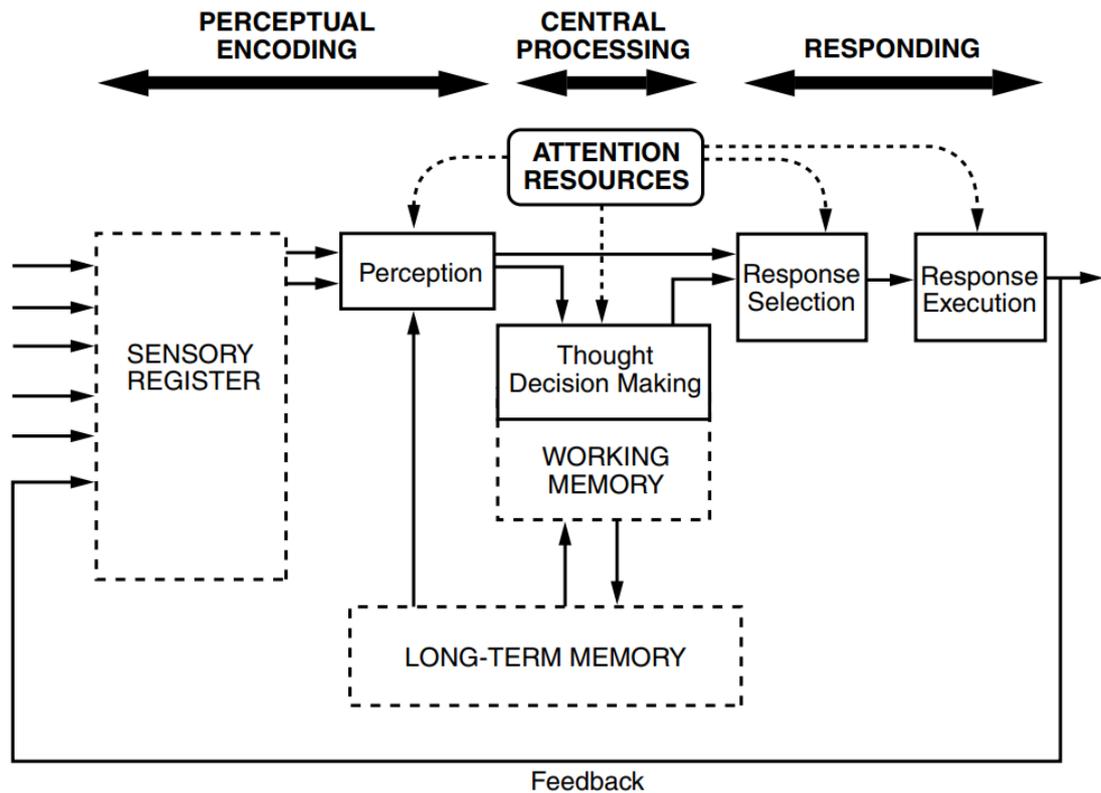


Abbildung 1 Modell der menschlichen Informationsverarbeitung nach Wickens, Lee, Liu und Gordon-Becker (2014, S. 102)

„Transduktion“ bezeichnet (Goldstein, 2008). Damit wird der Schritt der Umsetzung des sensorischen Stimulus in ein Erregungsmuster des Nervensystems bezeichnet. Es wird hierbei noch keine Wertung oder Auswertung des Stimulus vorgenommen.

Es sollte allerdings beachtet werden, dass die aufgenommenen Stimuli nicht per se frei von anderen kognitiven Beeinflussungen sind. Verschiedene Modelle zur menschlichen Informationsverarbeitung sagen nämlich sogenannte Top-down und Bottom-up-Prozesse voraus, die je nach Situation unterschiedliche Verarbeitungsweisen nach sich ziehen. So weist beispielsweise das SEEV-Modell nach Wickens und McCarley (2008) darauf hin, dass verschiedene Eigenschaften eines Stimulus und die Erwartungshaltung gegenüber diesem Stimulus einen Filtermechanismus in Gang setzen. Dieser übt wiederum Einfluss auf die Aufnahme und „Wahrnehmung“ (in dem Fall als Zusammenfassung der Schritte des Sensory Register und Perception zu verstehen) dieses oder eines anderen Stimulus aus.

Im Folgenden sollen zunächst kurz die Grundlagen zur sensorischen Aufnahme von Reizen vorgestellt werden. Da für das Warnkonzept, wie später genauer erläutert, eine visuelle und eine auditive Komponente vorgesehen ist, beschränkt sich diese Erklärung auch auf diese beiden Modalitäten. Die Ausführungen zu diesen sensorischen Grundlagen basieren auf Goldstein (2008).

Visuelle Reizaufnahme

Die visuelle Wahrnehmung des Menschen erfolgt mithilfe der Augen. In diesen fällt das einfallende Licht auf die an der Rückseite des Augapfels gelegene Netzhaut, welche unterschiedliche Sehzellen für das Farb- und Hell-Dunkel-Sehen enthält. Die für das Farbsehen relevanten Zapfen-Zellen konzentrieren sich an einem Punkt auf der Netzhaut, der als Fovea bezeichnet wird. Hier ist die Farbwahrnehmung und räumliche Auflösung des Sehapparats am größten. Zu den Rändern der Netzhaut hin überwiegen die sogenannten Stäbchen, die für das Hell-Dunkel-Sehen zuständig sind. Da diese untereinander stärker miteinander verschaltet sind, nimmt die räumliche Auflösung in diesen Bereichen immer weiter ab. Daraus ergibt sich das sogenannte Gesichtsfeld, also der Bereich, der mit beiden Augen ohne Bewegung der Augen oder des Kopfes visuell betrachtet werden kann (Eysel, 2011, S. 372). Kleiner als dieses Gesichtsfeld ist jedoch das sogenannte Useful Field of View (UFOV), welches den Bereich um den Fixationspunkt umfasst, innerhalb dessen Informationen gezielt aufgenommen werden (Mackworth, 1976). Obwohl die räumliche Auflösung für Reize also in den Außenbereichen des Gesichtsfeldes und außerhalb des UFOV herabgesetzt ist, besteht der Vorteil, dass in diesen Bereichen Bewegungserkennung weiterhin gut funktioniert und dadurch eine Orientierungsreaktion hin zu der Bewegung stattfindet (Lachenmayr, 2006). Warnungen, die in diesen Bereichen stattfinden, sollten sich daher, wenn möglich, Bewegung zunutze machen.

Auditive Reizaufnahme

Die auditive Wahrnehmung des Menschen erfolgt über die Ohren. Tritt ein Schallereignis in der Nähe auf, so werden von diesem Druckwellen an das umgebende Medium (z.B. Luft oder Wasser) übertragen. Diese breiten sich ähnlich Wasserwellen im Medium aus und können nun potenziell den Gehörgang des Menschen erreichen. Im Gehörgang befindet sich das Trommelfell, das über mechanische Übertragungswege die aufgefängenen Druckunterschiede an die Schnecke im Innenohr weitergibt, wo die Signale mithilfe sog. Haarzellen in elektrische Signale umgesetzt werden, die dann wiederum über weitere Nervenbahnen in das Gehirn weitergeleitet werden, wo die weitere Verarbeitung stattfindet. Wichtig zu erwähnen ist hierbei auch die Lokalisationsfähigkeit des Gehörs, das beispielsweise über Laufzeitunterschiede zwischen dem rechten und linken Ohr und frequenzabhängiger Wahrnehmung eine ungefähre räumliche Verortung des Schallereignisses vornehmen kann.

2.1.2 Perception

Folgt man dem Modell von Wickens et al. (2014) nun in die nächste Stufe, so bezieht sich die „Perception“ auf den Prozess, durch den bedeutungsvolle Informationen aus der bereits vorgestellten Stufe des Sensory Register gezogen werden. Dies geschieht meist in nachgelagerten Schritten des Informationsverarbeitungsapparats, also nicht mehr unbedingt im eigentlich sensorisch dafür „zuständigen“ Organ (z.B. Auge oder Ohr).

Visuelle Verarbeitung

Nach der Transduktion des visuellen Signals in der Netzhaut und einer ersten Verschaltung über Ganglienzellen im Auge, gelangt das Signal über den Sehnerv ins Gehirn und von dort insbesondere in den visuellen Kortex an der Rückseite des Gehirns. Hier erfolgt eine erste Verarbeitung, bei der beispielsweise basale Muster und Kontraste analysiert werden und Schritt für Schritt in einen Gesamtkontext zusammengesetzt werden. Danach erfolgt eine Weiterleitung dieser Informationen in andere Bereiche des Gehirns, wo dieser visuell gewonnene Gesamteindruck auf weitere, spezifischere Inhalte (z.B. Gesichter) analysiert wird (Goldstein, 2008). Wie an der Darstellung (siehe Abbildung 1) aus Wickens et al. (2014) zu erkennen, besteht bereits in der Stufe der Perception eine Verbindung aus dem Langzeitgedächtnis hin zur Perception. Dieser Zusammenhang beschreibt, dass Inhalte aus dem Langzeitgedächtnis durchaus Rückwirkungen auf den eigentlichen Wahrnehmungsprozess haben können. Das kann beispielsweise in der Form erfolgen, dass der Betrachter einer Szenerie in einem bestimmten Kontext nicht mit einem bestimmten Objekt rechnet, und dieses, trotz der Offensichtlichkeit des Reizes, nicht bewusst wahrnimmt (Simons & Chabris, 2000). Dieser Prozess hängt allerdings auch mit den Attention Resources zusammen, die im weiteren Verlauf näher vorgestellt werden. Wie Wickens et al. (2014) ausführen, kann diese enge Verknüpfung zwischen Vorwissen in einer Situation aus dem Langzeitgedächtnis und den neu hinzugewonnenen Informationen des Sensory Register einen positiven Effekt auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit und die Einfachheit der Interpretation einer Situation haben (so sind gewisse Farben wie gelb oder rot aufgrund von Vorerfahrungen bereits mit einem gewissen Warncharakter ausgestattet und daher in Kontexten, in denen eine Warnung vermittelt werden soll, besonders gut einzusetzen).

Auditive Verarbeitung

Auch für diese Modalität erfolgt nach der Transduktion eine Weiterleitung der aufgenommenen Signale an den auditiven Kortex des Gehirns, wo weitere Analysen der aufgenommenen Stimuli stattfinden (Goldstein, 2008). Da auch die auditive Modalität diesen Schritt der Perception durchlaufen wird, sollte beachtet werden, dass Vorerfahrungen die Top-Down-Verarbeitung (also die Beeinflussung der Wahrnehmung durch höhere kognitive Systeme, wie durch das Langzeitgedächtnis) der Reize beeinflussen können. Fricke (2009a) zeigt hierbei explizit auf, dass gewisse Warntöne, die bereits durch Vorerfahrungen eine Prägung mit Warncharakter erfahren haben (z.B. Fahrradklingeln oder Autohupen) möglicherweise als Warnungen im Automobilkontext gut geeignet sind. Allerdings merkt sie auch an, dass sehr genau abgewogen werden muss, in welchem Kontext die Verwendung dieser Warntöne stattfindet, da nicht per se von einer Warntoncharakteristik eines Geräuschs oder Tons auf die Eignung als tatsächlicher Warnton geschlossen werden kann. So weist sie beispielsweise darauf hin, dass eine Autohupe durchaus als Warnton verstanden wird, diese aber eher mit einem nachfolgenden Fahrzeug assoziiert wird und daher beispielsweise für eine Forward Ve-

hicle Collision Warning (FVCW) nicht unbedingt geeignet ist (zur Erläuterung einer solchen Warnung siehe Abschnitt 2.3 Fahrerassistenzsysteme).

Da im Rahmen verschiedener früherer Untersuchungen bereits Gestaltungsgrundlagen von der vorgelagerten Ebene des „Sensory Register“ (u.a. Bengler et al., 2018) auf den spezifischen Kontext der Fahrerwarnung übertragen wurden, werden weitere Ableitungen zu spezifischen Gestaltungsempfehlungen im Bereich der Perception genauer im Abschnitt 3.2 Warnkonzept vorgestellt.

2.1.3 Response Selection und Response Execution

Wenn durch die vorgelagerten Schritte in einer bestimmten Situation die erfolgreiche Reizaufnahme und Zwischenverarbeitung im Rahmen des Central Processing stattgefunden hat, erfolgt Wickens et al. zufolge nun die eigentlich sichtbare Reaktion auf diesen Reiz. Wie auch bereits im Bereich der Wahrnehmung gliedern die Autoren diese Reaktion in zwei getrennte Stufen: Response Selection und Response Execution. Da der Bereich der Response jedoch wie bereits angemerkt hier nur in Grundzügen betrachtet werden soll, erfolgt an dieser Stelle keine weitere Trennung zwischen den beiden Stufen. Ziel der erfolgreichen Response Selection und Response Execution ist in dem vorgesehenen Einsatzbereich des HMI die Verhinderung einer Kollision mit einem VRU (siehe hierzu Abschnitt 3.1 Motivation und Zielsetzung). Wie Wickens und Hollands (1999, Kapitel 9) ausführen, besteht bei diesem Fall die Möglichkeit für den Fahrer, in verschiedene Richtungen auszuweichen oder falls dies nicht mehr möglich ist, zumindest eine Bremsung einzuleiten. Im Allgemeinen hat der Fahrer hierbei die Wahl, welche Reaktion er zeigen möchte. Ein HMI, welches ihn in dieser Situation unterstützen soll, muss ihn daher in der Wahl des geeigneten Reaktionsmusters gezielt unterstützen, ohne beispielsweise einen weiteren Ablenkungsfaktor darzustellen. Wickens und Hollands zeigen außerdem auf, welche Möglichkeiten es von Seiten des Systems gibt, diesen Response Prozess schneller und auch präziser zu machen. Eine dieser Möglichkeiten ist die Verwendung der korrekten Stimulus-Modalität. So berichten Wickens und Hollands beispielsweise von einer schnelleren Verarbeitung und darauffolgender Reaktion bei Verwendung auditiver Stimuli gegenüber visuellen Stimuli. Als ebenfalls unterstützender Faktor wird dabei auf die örtliche Kompatibilität verwiesen. So wird die Reaktion auf einen Stimulus durch eine Hinwendungsreaktion zu diesem Stimulus vereinfacht. Wie später in Kapitel 3.2 aufgezeigt wird, werden in dem erarbeiteten Warnkonzept verschiedene dieser Gestaltungshinweise zur Verbesserung der Reaktion des Fahrers gezielt eingesetzt.

2.1.4 Attention Resources

Wie bereits angemerkt, besteht nach Wickens et al. (2014) zu den Stufen der Perception, Response selection und Response execution eine Verbindung zum übergeordneten Konzept der Attention Resources. Dieses übergeordnete „Metasystem“ der Aufmerksamkeitssteuerung beeinflusst durch seine Verknüpfung zu den anderen Stufen die jeweilige Verarbeitung in diesen Prozessschritten. Wie bereits angesprochen, kann ein Modell wie das SEEV-Modell (Wickens & McCarley, 2008) mithilfe von Top-Down- und Bottom-Up-Verarbeitung Hinweise

darauf liefern, dass gewisse Reize aufgrund gewisser Erwartungshaltungen schneller oder besser erkannt werden. Auf den praktischen Fall des Fahrens in einer urbanen Umgebung mit vielen ablenkenden Reizen (z.B. Straßenwerbung, Straßenschilder, andere Fahrzeuge etc.), aber eben auch VRUs, die potenziell im Konflikt mit dem eigenen Fahrweg stehen, bezogen, bedeutet das, dass eine gezielte Aufmerksamkeitslenkung Unterstützung dabei bieten kann, eine mögliche Konfliktsituation schneller und besser zu erkennen. Wickens (2000) führt diesen Prozess noch etwas spezifischer auf das Situationsbewusstsein in der Luftfahrt aus. Obwohl hier das Aufgabenspektrum natürlich ein anderes ist als im Straßenverkehr, können basale Bewusstseinsprozesse, die er dabei identifiziert, durchaus auch auf die Fahraufgabe übertragen werden. Diese sind

- Geographische Orientierung (im Luftraum): Wissen über die eigene Lage und Position als auch auf die Lage und Position umgebender Objekte im Raum
- Systemkenntnis: Wissen über eigene technische Systeme und Kenntnis über das Verhalten in bestimmten Situationen
- Aufgabenbewusstsein: Wissen über eigene Ziele und Aufgaben und in welcher Reihenfolge diese erreicht und abgearbeitet werden müssen

Überträgt man diese Konzepte auf die Fahraufgabe, so wird deutlich, dass auch der Fahrer eines Fahrzeugs über gewisse aktuelle und zukünftige Zustände seines Fahrzeugs Bescheid wissen sollte. Wie technische Systeme ihn dabei unterstützen können, wird in Abschnitt 2.3 Fahrerassistenzsysteme näher erläutert.

Ein verwandtes und ebenfalls viel zitiertes Konzept zur Betrachtung der Aufmerksamkeitssteuerung sowie auch der Vigilanz stellt das Situation Awareness Modell nach Endsley (1988) bereit. Auch dieses Modell geht von einem stufenweisen Prozess aus, bei dem sich durch die Schritte der „Perception“, „Comprehension“ und „Projection“ die sogenannte Situation Awareness ergibt, die nach Endsley dazu nötig ist, um erfolgreich in einer Situation zu agieren. Eine starke Situation Awareness ist also hilfreich dabei, die nachgelagerten Schritte des Verhaltens erfolgreich zu durchlaufen. Es sei jedoch kritisch angemerkt, dass das Modell nur begrenzte Aussagekraft zu den tatsächlichen Mechanismen hinter der Situation Awareness hat. Anders als das Modell nach Wickens et al. (2014) werden hier beispielsweise die einzelnen Prozessschritte nicht weiter aufgegliedert und so nur post-hoc-Erklärungen bei fehlender „Situation Awareness“ ermöglicht. Trotzdem zeigt das Modell auf, dass eine situationsangemessene Aufmerksamkeitssteuerung hilfreich für eine erfolgreiche Aufgabenbewältigung sein kann.

2.2 Mensch-Maschine-Interaktion im Automobil

Im Folgenden wird genauer auf die Anwendung der Informationsverarbeitungsprozesse im automobilen Kontext eingegangen. Dazu werden aus einer ergonomischer Perspektive insbe-

sondere die Aufgaben des Fahrers, die Komponenten von Mensch-Maschine-Schnittstellen und die Auswirkungen zunehmender Automatisierung betrachtet.

2.2.1 Aufgaben des Fahrers

Die Aufgaben des Fahrers lassen sich generell in

- primäre Aufgabe
(Fahrzeug auf Kurs halten, z.B. Längs- und Querführung)
- sekundäre Aufgaben
(Tätigkeiten, die aus Fahranforderungen resultierten, z.B. Blinker setzen)
- tertiäre Aufgaben
(fahrfremde Tätigkeiten, z.B. Telefonieren)

einteilen (Bubb, 2015).

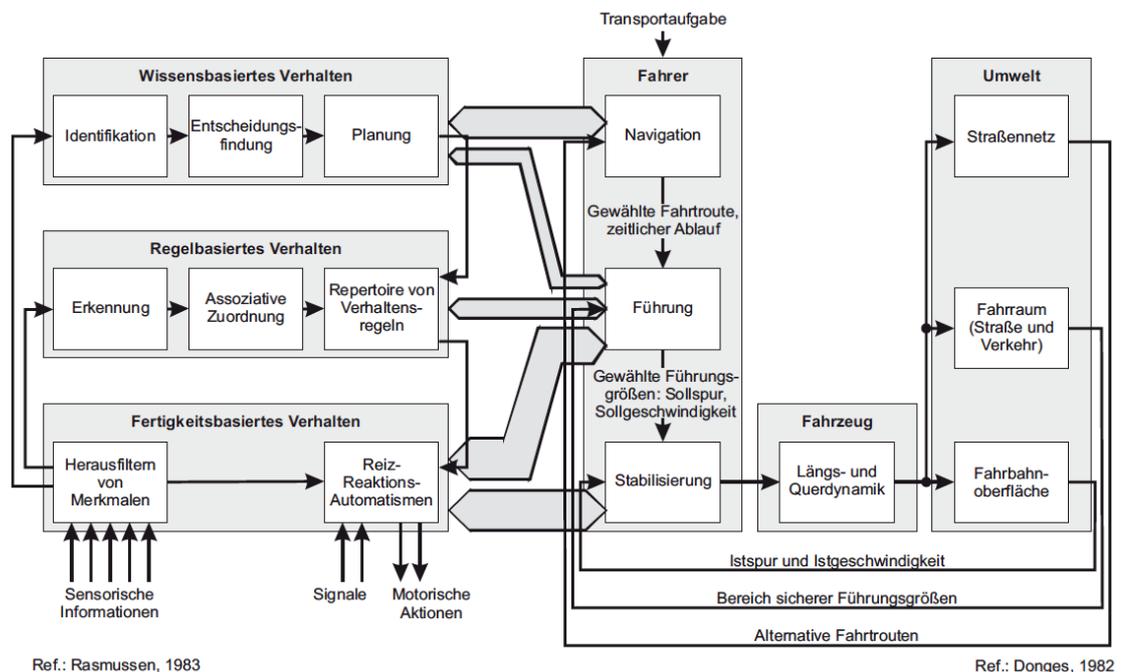


Abbildung 2 Arbeitsmodell nach Rasmussen (1983) in Bezug zu Fahrverhaltensmodell nach Donges (1982) (aus Donges, 2012, S. 15)

Die primäre Fahraufgabe kann ferner, nach einem Fahrerverhaltensmodell von Donges (1982) in die drei hierarchischen Ebenen Navigation, Führung und Stabilisierung differenziert werden. Das Modell beschreibt des Weiteren das Zusammenwirken von Fahrer, Fahrzeug und Umwelt. Donges (2012) setzt das Modell mit dem allgemeinen qualitativen Arbeitsmodell von Rasmussen (1983) in Beziehung (siehe Abbildung 2). Rasmussen unterscheidet bei der Ausführung menschlicher Arbeit drei Verhaltensweisen: Wissensbasiert, regelbasiert und fertigkeitsbasiert. Während bei fertigkeitsbasiertem Verhalten direkte, nahezu automatische Reaktionen auf Umgebungsreize mit geringer kognitiver Leistung stattfinden, werden bei regelbasiertem Verhalten entsprechend erkannter, bedeutungsvoller Merkmale anwendbare

Verhaltensregeln abgerufen (*wenn-dann*-Verhalten). Bei wissensbasiertem Verhalten wird auf Basis identifizierter Merkmale ein analytisches Verhalten angewendet, um eine Situation ohne bekannte anwendbare Regeln zu lösen, was auch Problemlösungsverhalten genannt wird (vgl. Rasmussen, 1983). In der Abbildung 2 aus Donges (2012, S. 15) wird dargestellt, wie die drei Verhaltensweisen entsprechend den drei hierarchischen Ebenen der Fahraufgabe (Navigation, Führung und Stabilisierung) zugeordnet werden können. Aus der Grafik wird deutlich, dass für eine Ebene der Fahraufgabe mehrere verschiedene Verhaltensweisen angewendet werden können. Je nach Erfahrung des Fahrers werden in manchen Situationen fertigkeitbasierte Verhaltensweisen zur Fahrzeugführung angewendet, während in ungewohnten Situationen gelernte Regeln abgerufen werden oder durch wissensbasiertes Vorgehen ein Lösungsweg gefunden werden muss.

2.2.2 Anzeige- und Bedienelemente

Die Elemente, mit denen Fahrer und Fahrzeug Informationen austauschen, werden als Schnittstellen bezeichnet, wobei bei deren Komponenten zwischen Anzeigen und Bedienelementen unterschieden wird (Bubb, Bengler, Breuninger, Gold & Helmbrecht, 2015). Anzeigen sind nach Bubb et al. (2015) technische Elemente, die eine bestimmte Information zum Fahrer transportieren und dafür prinzipiell jede Sinnesmodalität des Menschen ansprechen können, während jedoch überwiegend optische, akustische und haptische Anzeigen im Fahrzeug verwendet werden. Bedienelemente sind hingegen die Bestandteile des Systems, mit welchen der Mensch bzw. der Fahrer Informationen an die Maschine bzw. ans Fahrzeug übergeben kann (Bubb et al., 2015). Ebenso wie bei Anzeigen sind hierfür prinzipiell alle Modalitäten möglich, mit denen der Mensch kommunizieren kann. In heutigen Fahrzeugen finden sich überwiegend haptische bzw. mechanische Bedienelemente, die mit den Extremitäten (Hände, Finger, Füße, Beine) gesteuert werden, allerdings auch vermehrt Sensorsysteme wie Mikrofone oder Kameras, die beispielsweise Sprach- oder Gesteneingaben ermöglichen (Bubb et al., 2015). Nach Götz (2007) ist zudem eine formale Trennung von Anzeige und Bedienelement nicht immer zielführend. So finden sich beispielsweise auch vermehrt Touchscreens im Automobil wieder, die Ein- und Ausgabe in einem Element kombinieren. Im Arbeitsmodell der Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug werden (nach Winner, Hakuli & Wolf, 2012, S. 314, siehe Abbildung 3) Anzeige- und Bedienelemente eines Fahrerassistenzsystems im Fahrzeug in Beziehung zum Informationsverarbeitungs-Prozess des Menschen (Kapitel 2.1) und dessen Umgebung gesetzt. Dabei wird insbesondere der Informationsfluss zwischen Fahrer und Fahrzeug deutlich, wobei der Mensch durch die Anzeigen aber auch durch die Bedienelemente (z.B. durch deren Position oder Stellung) Informationen vom Fahrzeug erhält.

2.2.3 Automatisierung

Mit dem technischen Fortschritt werden im Fahrzeug mehr und mehr Funktionen automatisiert. Nach Parasuraman und Riley (1997) kann Automatisierung als die maschinelle Ausführung von Funktionen, die zuvor von einem Menschen ausgeführt wurden, definiert werden. Dabei lässt sich Automatisierung anhand ihrer Form und Komplexität differenzieren. Entspre-

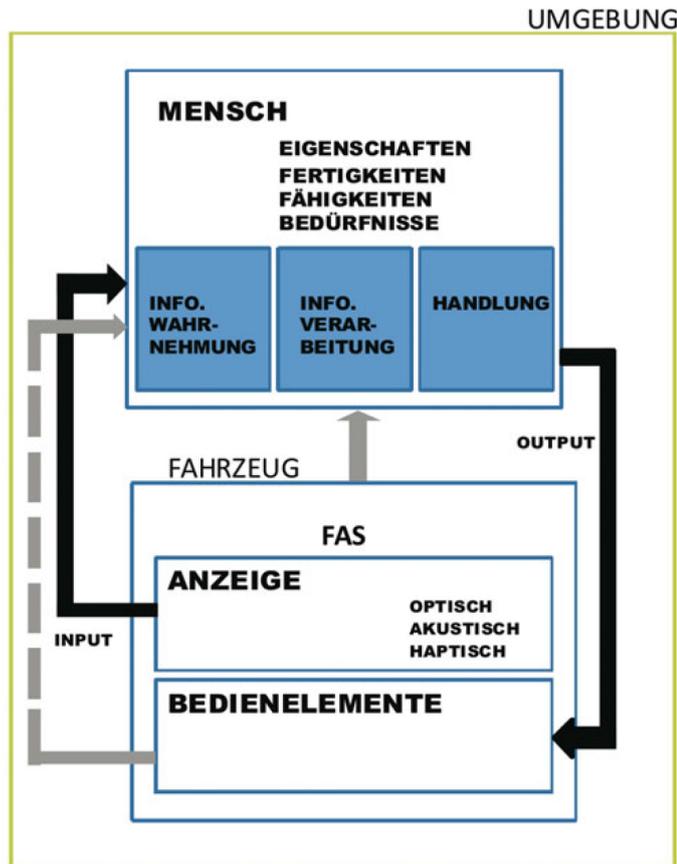


Abbildung 3 Arbeitsmodell der Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug aus Winner, Hakuli und Wolf (2012, S. 314)

chend der vier (vereinfachten) Stufen der Informationsverarbeitung klassifizieren Parasuraman, Sheridan und Wickens (2000) äquivalent vier Funktionsklassen, die in diversen Funktionstiefen automatisiert werden können: 1) Informationsaneignung (*information acquisition*), 2) Informationauswertung (*information analysis*), 3) Entscheidungs- und Aktionsselektion (*decision and action selection*) und 4) Aktionsausführung (*action implementation*). Interessant an dieser Betrachtungsweise ist, dass nicht nur Aspekte hinsichtlich Handlungsausführung als Automation bezeichnet werden, sondern insbesondere auch Funktionen auf der Ebene der Erfassung und Aufbereitung von Informationen. Parasuraman et al. (2000) fassen automatisierte Funktionen im Bereich der Informationsaneignung und -auswertung zudem unter dem Begriff der *Informationsautomatisierung* zusammen.

Stufen der Automatisierung

Flemisch, Kelsch, Löper, Schieben und Schindler (2008) differenzieren in einem Spektrum der Systemkontrolle zwischen Mensch und Maschine fünf Stufen der Automatisierung: Manuell, Assiiert, Teilautomatisiert, Hochautomatisiert und Vollautomatisiert. Die Einteilung von Flemisch et al. (2008) findet sich bei der Beschreibung der Automatisierungsstufen im Automobil von der Bundesanstalt für Straßenwesen (Gasser et al., 2012) und in ähnlicher Form beim Verband der Automobilindustrie e.V. (2015) und bei der Society of Automotive Engi-

neers (SAE International, 2016) wieder. Letztere differenziert jedoch, wie auch der Verband der Automobilindustrie e.V. (2015) 6 Stufen, wobei die manuelle Fahrt (Driver Only) als Stufe 0 bezeichnet wird und ferner zwischen vollautomatisierter Fahrt (Stufe 4) begrenzt auf spezifische Anwendungsfällen und fahrerloser Fahrt (Stufe 5) in allen möglichen Situationen differenziert wird. Abbildung 4 veranschaulicht den Übergang der Kontrolle zwischen Mensch und System zwischen den Stufen: Bis Stufe 2 muss der Fahrer, auch wenn das System die Längs- und Querführung regelt, dauerhaft überwachen, wohingegen diese Überwachungsfunktion ab Stufe 3 nicht mehr dauerhaft benötigt wird (Verband der Automobilindustrie e.V., 2015).

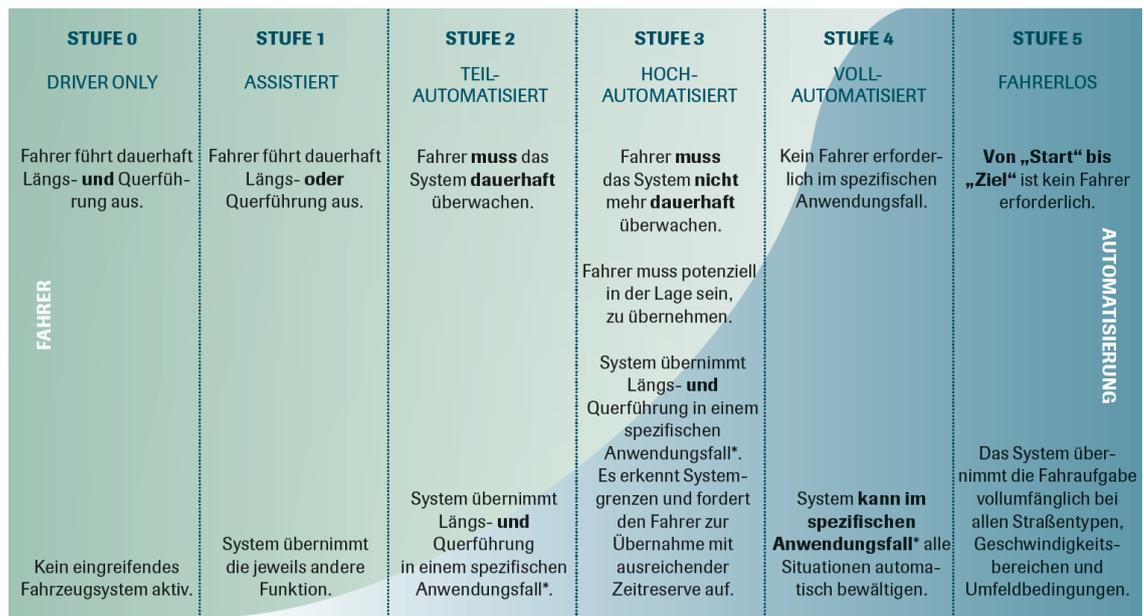


Abbildung 4 Stufen der Automatisierung im Automobil (Verband der Automobilindustrie e.V., 2015, S. 15)

2.2.4 Folgen zunehmender Automatisierung

Der Mensch wird in der Ausführung einzelner Funktionen zunehmend durch Automatisierung abgelöst, mit dem langfristigen Ziel ihn letztlich ganz zu ersetzen (z.B. Bainbridge, 1983). Bibby, Margulies, Rijnsdorp, Withers und Makarow (1975) betrachten vollautomatisierte Systeme jedoch als eine Utopie und folgern stattdessen, dass auch automatisierte Systeme noch immer Mensch-Maschine-Systeme sind und bleiben, wofür sowohl technische als auch menschliche Aspekte relevant sind. Ausgehend davon spricht Bainbridge (1983) von der Ironie der Automatisierung, dass die Rolle des Menschen in einem System umso kritischer ist, je fortschrittlicher das technische System ist.

Überwachung statt Ausführung

Durch die zunehmende Automatisierung entwickelt sich die Rolle des menschlichen Bedieners mehr und mehr zu einer überwachenden, statt ausführenden Instanz. Diese Entwicklung ist nicht nur im Automobil, sondern auch in vielen anderen Bereichen, beispielsweise bei industriellen Fertigungsanlagen oder in der Luftfahrt, zu beobachten. Während der Komfort für

den Bediener bzw. Fahrer dadurch erhöht wird, resultieren durch die Überwachungstätigkeit gleichzeitig Probleme hinsichtlich der Vigilanz (Daueraufmerksamkeit) sowie der Bereitschaft zur Übernahme in einem Fehlerfall (u.a. Buld, Tietze & Krüger, 2005, Bainbridge, 1983). Die Voraussetzung für eine gute Leistung (in einem Fehlerfall) ist nach dem Yerkes-Dodson-Gesetz (Yerkes & Dodson, 1908) abhängig von einem mittleren, also weder zu hohen noch zu niedrigen, Erregungsniveau (des Fahrers). Dieses trotz der zunehmenden Automatisierung zu erhalten, um den Fahrer bzw. den Operateur so „in the loop“ zu halten bzw. zurückzubringen (z.B. Gold, Damböck, Lorenz & Bengler, 2013) ist, nebst Optimierung von Aktorik, Sensorik und Algorithmik, eine elementare Herausforderung bei der Entwicklung teil- und hochautomatisierter Systeme.

Vertrauensproblematik

Die Debatte um Vor- und Nachteile einer zunehmende Automatisierung im Automobil kommt mit der wachsenden Verbreitung von teilautomatisierten Systemen auch in den öffentlichen Raum. So beispielsweise durch den tödlichen Unfall am 18. März 2018 in Arizona, bei welchem ein Volvo-SUV des Fahrdienstleisters Uber eine Fußgängerin erfasste (z.B. Harloff, 2018). Öffentlich diskutiert wird nun, ob menschliches oder technisches Versagen Schuld an dem Unfall sei. Automatisierungskritische Aussagen stehen Erklärungen von Experten wie Klaus Dietmayer mit „Man hätte als Fahrer keine Chance gehabt“ gegenüber (Harloff, 2018). Das eigentliche Problem liegt jedoch in der unzureichenden Aufklärung der Öffentlichkeit in Bezug auf Begrifflichkeiten im Bereich Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) und Automatisierung. So werden auch in renommierten Zeitungen mit großer Leserschaft, wie z.B. in dem von der Süddeutschen Zeitung veröffentlichten Artikel von Harloff (2018), Begrifflichkeiten wie *autonom* oder *hochautomatisiert* synonym oder schlicht fälschlicherweise zur Beschreibung des eigentlich *teilautomatisierten* Systems verwendet. Ein möglicher Grund sind die verschiedenen geltenden Nomenklaturen. Ein solches teilautomatisiertes System nach Verband der Automobilindustrie e.V. (2015) (siehe Abbildung 4) muss ständig durch einen menschlichen Fahrer überwacht werden, was jedoch dem Leser nicht ausreichend kommuniziert wird. Durch die unklare Begriffsabgrenzung in der öffentlichen Berichterstattung wird eine objektive Debatte allerdings extrem erschwert und das Vertrauen in ADAS in der Gesellschaft negativ beeinflusst. Ein möglicher Grund für den fatalen Unfallausgang könnte auch nicht angebrachtes, übermäßiges Vertrauen des Fahrers in das System gewesen sein. Ein solch blindes Vertrauen in die Automation wird von Lee und See (2004) als „Overtrust“ benannt, also ein Fall in dem das Vertrauen die Systemgrenzen überschreitet und so zu dem nach Parasuraman und Riley (1997) als „Misuse“ bezeichneten Zustand führt, was nach diesen wiederum oftmals in nachlässiger Überwachungstätigkeit resultiert. Weiterhin differenzieren Parasuraman und Riley (1997) nebst Misuse drei weitere Formen der Nutzung von Automation: „Use“ – die bewusste und freiwillige (De-)Aktivierung der Automation durch den Mensch, „Disuse“ – die Weigerung bzw. Nichtnutzung der Automation (oft aufgrund von unangebrachtem Systemverhalten (z.B. Falschalarme), welche nach Lee und See (2004, S. 55) zu Misstrauen („Distrust“) führen), und „Abuse“ – die Automatisierung von Funktionen durch

Entwickler, ohne deren Folgen hinsichtlich menschlicher Leistung zu berücksichtigen. Bei der Funktionsautomatisierung ist folglich adäquates Systemdesign essentiell, das Systemgrenzen klar definiert und kommuniziert, um ein der Leistungsfähigkeit des Systems angemessenes Vertrauen zu schaffen (Lee & See, 2004).

2.3 Fahrerassistenzsysteme

2.3.1 Definition

Fahrerassistenzsysteme (en. Driver Assistance Systems (DAS)) unterstützen den Fahrer bei der primären Fahraufgabe mittels Bereitstellung von Informationen, Warnungen und Feedback zum Fahrverhalten sowie durch Erhöhung von Komfortempfinden und Reduzierung des Workloads durch aktive Unterstützung bei Stabilisierung und Bahnführung (RESPONSE 3, 2006, A66). Maurer (2012) leitet zur detaillierteren Klärung des Begriffs zunächst die Bedeutung der Bestandteile her, wonach DAS technische Systeme sind, die dem Fahrer Beistand bzw. Mithilfe leisten. Nach dieser Definition können allerdings auch schon Hilfsmittel wie Tachometer, automatische Blinker-Rückstellung oder reine Informationssysteme gefasst werden. Daher beschreibt Maurer (2012) DAS genauer mit der parallelen Arbeitsteilung nach Kraiss (1998), wobei Fahrer und System redundant-parallel die gleichen Aufgaben bearbeiten, miteinander kommunizieren – um die durch Sinne und/oder Sensoren erfassten Informationen aus der Umgebung auszutauschen – und entsprechend auf das Fahrzeug einwirken.

2.3.2 Klassifikationsansätze

Abgesehen davon gibt es zur Klassifikation von Fahrerassistenzsystemen diverse Ansätze. Golias, Yannis und Antoniou (2002) unterscheiden vorrangig zwischen 1) Unterstützung des Fahrers hinsichtlich Informationsbereitstellung (z.B. Navigation, Echtzeitinformationen), Wahrnehmung (Sicht, Einpark- und Rückfahrlilfe), Annehmlichkeiten (Freihändige Fahrt, Fernsteuerung, Automatisierte Funktionen) und Fahrerüberwachung (Vigilanz, Gesundheit) sowie zwischen 2) Unterstützung des Fahrzeugs hinsichtlich allgemeiner Fahrzeugkontrolle (z.B. Platooning), Längs-/Querführung (Geschwindigkeitskontrolle, Adaptive Cruise Control (ACC), Spurhalte-, Spurwechselassistenten), Kollisionsvermeidung und Fahrzeugüberwachung (Tacho, Diagnose, Alarmsysteme). Die Autoren bemerken dabei, dass viele der Systeme miteinander zu komplexen Systemen kombiniert werden. Zudem klassifizieren Golias et al. (2002) die untersuchten Systeme hinsichtlich ihren Auswirkungen auf Sicherheit und Verkehrseffizienz. Bengler et al. (2014) ordnen die Systeme hingegen parallel zu ihrer zeitlichen Entwicklung in die Bereiche 1) Fahrzeugdynamik und Stabilisierung, 2) Information, Warnung und Komfort sowie in 3) Automatisierte und Kooperative Systeme ein. Ähnlich dazu klassifizieren Gasser, Seeck und Smith (2015) Fahrerassistenzsysteme in der Ebene der Fahrzeugführung in drei Kategorien:

- Kategorie A – Informierende und warnende Funktionen:
Entfalten ihre Wirkung auf die Fahrzeugführung „mittelbar“ über den Fahrer.
Beispiel: Verkehrszeichenassistent
- Kategorie B – Kontinuierlich automatisierende Funktionen:
Greifen unmittelbar in die Fahrzeugführung ein, sind jedoch stets durch den Fahrer übersteuerbar. (siehe hierzu Kapitel 2.2.3)
Beispiel: ACC
- Kategorie C – Eingreifende Notfallfunktionen:
Greifen in kritischen bzw. unfallgeneigten Situationen, die vom gemeinen Fahrer nicht mehr kontrollierbar sind, aktiv in die Fahrzeugführung ein.
Beispiel: Automatischer Notbremsassistent

Ferner werden in der Literatur sogenannte Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), also „fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme“ differenziert. Diese assistieren nach dem Code of Practice (CoP) bei der primären Fahraufgabe mit aktiver Unterstützung bei Längs- und/oder Querführung mit oder ohne Warnungen, wobei sie die Fahrzeugumgebung erfassen und evaluieren sowie komplexe Signalverarbeitung nutzen und eine direkte Interaktion von Fahrer und System besteht (RESPONSE 3, 2006). Als Beispiele für ADAS können demnach etwa ACC oder Lane Keeping Assist (LKA) betrachtet werden, nicht aber Systeme wie Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP), Antiblockiersystem (ABS) oder Cruise Control (CC), da diese nicht alle der genannten Eigenschaften von ADAS erfüllen. Ebenso sind Systeme zum Schutz von Vulnerable Road Users (VRUs) durch Detektion und Warnung des Fahrers nach RESPONSE 3 (2006, A66) nicht als ADAS zu bezeichnen. Hierbei erfolgt etwa kein aktiver Eingriff in die Längs-/Querführung.

2.3.3 Stand von Technik und Forschung

Fahrerassistenzsysteme ermöglichen eine Steigerung von Effizienz und Komfort sowie insbesondere eine Erhöhung der Sicherheit, wobei zur Ausschöpfung des vollen Potenzials jedoch eine tiefere Marktdurchdringung erforderlich sei (Bengler et al., 2014). Erste Seriensysteme, wie ABS oder ESP zur Assistenz auf der Bahnführungsebene wurden bereits in den 80er und 90er Jahren entwickelt und ermöglichen durch die Nutzung Inertialsensoren und Propriozeption vor allem durch Optimierung der Fahrzeugdynamik eine Steigerung der Sicherheit (u.a. Bengler et al., 2014). Die zunehmende Integration von umgebungserfassender Sensorik (z.B. Radar, Lidar, Infrarot oder Kamera) in das Fahrzeug sowie die Nutzung externer Informationen, etwa vom Globales Navigationssatellitensystem (GNSS) ermöglichen des Weiteren eine zunehmende Unterstützung des Fahrers auf Bahnführungs- und Navigationsebene (vgl. u.a. Bengler et al., 2014; Akamatsu, Green & Bengler, 2013). Die Fortschritte in Aktor- und Sensorsystemen sowie insbesondere in deren präzisen Zusammenspiel ebnen den Weg zum hoch- und vollautomatisierten Fahren. Im Rahmen dieser Arbeit sind insbesondere Fahrerassistenzsysteme interessant, die die Sicherheit von VRUs erhöhen. Auf Grundlage der Untersuchungen von Unfällen mit VRUs (z.B. PROSPECT, 2016) wird im Rahmen dieser Arbeit insbesondere der aktuelle Stand von Technik und Forschung im Bereich Frontkollision sowie

im Bereich Umgebungserfassung und Objekterkennung interessant bzw. im Speziellen im Bereich Fußgängererkennung. Dieser wird im Folgenden genauer betrachtet.

Frontkollisionen

Im Bereich Frontkollisionen (en. Forward Vehicle Collision (FVC)) gibt es diverse sog. FVCX-Systeme zur Erhöhung der Sicherheit für Fahrer, Insassen und andere Verkehrsteilnehmer. Entsprechend ihrer Funktionalität können diese nach Reschka, Rieken und Maurer (2015, S. 915) wie folgt kategorisiert werden.

- Frontkollisionsvorbereitung (en. Forward Vehicle Collision Conditioning (FVCC)): Vorbereitung des Egofahrzeugs und dessen Teilsysteme auf eine bevorstehende Kollision. Beispiel: Prefill der Bremsen, Vorkonditionierung der Airbags oder Dämpferverstellung des Fahrzeugs.
- Frontkollisionswarnung (en. Forward Vehicle Collision Warning (FVCW)): Systeme, die den Fahrer und/oder die Insassen vor einer bevorstehenden Kollision warnen. Nach der in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Einteilung nach Gasser et al. (2015) handelt es sich bei diesen Systemen um Kategorie A – informierend und warnend.
- Frontkollisionsschwereminderung (en. Forward Vehicle Collision Mitigation (FVCM)): Minderung der Unfallschwere durch geeignete Maßnahmen bei einer Frontalkollision. Beispiele: Airbag, Gurtstraffer, Schließen von Fenstern.
- Frontkollisionsverhinderung (en. Forward Vehicle Collision Avoidance (FVCA)): Systeme, die aktiv in die Längs- und Querverführung des Fahrzeugs eingreifen, um eine Frontkollision zu verhindern. Beispiele: Automatische Notbremsung, Automatisches Ausweichen. Nach Gasser et al. (2015) handelt es sich bei diesen Systemen um Kategorie C – Eingreifende Notfallfunktionen.

Fußgängererkennung

Zur Umgebungserfassung und Objekterkennung können diverse Sensoren angewendet werden, wobei aktuell insbesondere Radar, Lidar, Ultraschall und Kamera- bzw. Bildbasierte Systeme (Maschinelles Sehen) Anwendung finden. Zur Fußgängererkennung im Straßenverkehr, einem äußerst wichtigen aber auch sehr schwierigen Aspekt der Umgebungserfassung, werden aktuell insbesondere bildbasierte (genauer videobildbasierte und infrarotkamerabasierte) Verfahren eingesetzt (Schiele & Wojek, 2015). Aus externen Einflüssen wie Witterungs-, Sicht- und Beleuchtungsbedingungen, individueller Kleidung und möglichen Verdeckungen (z.B. durch andere Verkehrsteilnehmer) sowie wechselnden Straßenverhältnissen resultieren eine Vielzahl an kritischen Anforderungen an das Umgebungserfassungssystem, wie etwa ausreichende Auflösung der Fußgänger, Robustheit der Verfahren oder hinsichtlich der Blickwinkelinvarianz des Systems (Schiele & Wojek, 2015). Der technologische Fortschritt und der Preisverfall von kamerabasierten Systemen begünstigen dabei in besonderer Weise die

Möglichkeit diesen Anforderungen gerecht zu werden. Bildbasierte Verfahren zeichnen sich nicht zuletzt auch dadurch aus, dass sich die maschinelle Wahrnehmung sehr am menschlichen Sehen mit den Augen orientiert. Insbesondere bei der Nutzung von Stereokameras ist es über die Disparität der beiden Kamerabilder mit nur einer Messung möglich, dreidimensionale Tiefeninformationen zu erhalten und gleichzeitig musterbasiert Objekte erkennen und klassifizieren zu können. Zur Objektklassifizierung werden seit einigen Jahren insbesondere sogenannte Neuronale Netze eingesetzt (z.B. Zhao & Thorpe, 2000; Szarvas, Yoshizawa, Yamamoto & Ogata, 2005). Dabei handelt es sich um eine Technologie aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz, mit der auf Basis von großen Mengen an Trainingsdaten die Maschine Muster erlernen kann, welche wiederum dazu genutzt werden können Objekte in Sensordaten zu erkennen und zu klassifizieren. Mittels neuronaler Netze können in diesem Fall Fußgänger in diversen Formen, Posen, Größen, Kleidungen oder Verdeckungen robust und in Echtzeit detektiert werden (Zhao & Thorpe, 2000). Sie ermöglichen dadurch eine außerordentliche Möglichkeit den oben beschriebenen Anforderungen gerecht zu werden. Neben der reinen Objekterkennung können auf Basis von Mustererkennung und Trackingalgorithmen (z.B. Kalman-Filter) weitere Parameter geschätzt werden. So kann beispielsweise die Bewegungsrichtung und das Situationsbewusstsein eines Fußgängers (z.B. ob dieser das Egofahrzeug gesehen hat) über dessen Kopf- und Körperorientierung (Flohr, Dumitru-guzu, Kooij & Gavrilă, 2014) und die Kritikalität der Situation über die Distanz des Egofahrzeugs zum Fußgänger geschätzt werden Kooij, Schneider, Flohr und Gavrilă (2014). Das Tracking dieser Parameter über die Zeit ermöglicht wiederum eine Absichtserkennung bzw. die Vorhersage der Verhaltensweise von Fußgängern.

2.3.4 Sicherheit und Beherrschbarkeit

Fahrerassistenzsysteme mit der Nutzung von Umgebungserfassung bieten ein großes Potenzial im Bereich Sicherheit (Bengler et al., 2014). Mit der Zunahme an Funktionalitäten steigt auch die Zahl elektronischer und elektrischer Komponenten im Fahrzeug. Nebst der Steigerung der Sicherheit resultieren daraus gleichzeitig aber auch erhöhte Anforderungen an die Beherrschbarkeit (engl. Controllability) der Systeme, insbesondere an deren Systemgrenzen oder darüber hinaus. Ein Sicherheitssystem wird letztlich nur dann als solches akzeptiert, wenn es nicht mehr Gefahren (z.B. durch Fehlfunktionen) als es Nutzen mit sich bringt. Im Folgenden werden zunächst knapp die wichtigsten Begriffe im Bereich Sicherheit und Beherrschbarkeit abgesteckt und miteinander in Beziehung gesetzt.

Passive und aktive Sicherheit

Im Automobil können sicherheitssteigernde Systeme prinzipiell anhand ihrer Funktion zwischen passiven und aktiven Systemen unterschieden werden. Passive Sicherheit beschreibt die Verringerung von Unfallfolgen, Aktive Sicherheit hingegen die Vermeidung bzw. Prävention von Unfällen (Fricke, Glaser & De Filippis, 2006, S. 43). Aktive Sicherheitssysteme versuchen dabei mitunter das Fehlverhalten von Menschen zu kompensieren, welches in Unfallstatistiken wie in Statistisches Bundesamt (2018) noch immer als eine der Hauptursachen

von Verkehrsunfällen identifiziert werden kann. Dies kann einerseits durch Unterstützung des Fahrers in allen Stufen des Informationsverarbeitungsprozesses erfolgen (siehe Abschnitt 2.1), andererseits durch direkte Einwirkung auf die Fahrzeugdynamik. Prinzipiell können die oben genannten FVCX-Systeme zur Frontkollisionsvorbereitung und -schwereminderung als Systeme zur Erhöhung der passiven Sicherheit bezeichnet werden. Systeme zur Frontkollisionswarnung und -verhinderung hingegen als Systeme zur Steigerung der aktiven Sicherheit.

Beherrschbarkeit

Die Beherrschbarkeit (en. Controllability) beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrer mit einer Fahrsituation umgehen kann, in welcher er durch ein Fahrerassistenzsystem assistiert wird, was die Nutzung im Normalbetrieb sowie an den Systemgrenzen oder bei Fehlfunktionen umfasst (RESPONSE 3, 2006). Im Rahmen des RESPONSE 3 Projekts wurde dazu der Code of Practice (CoP) vorgestellt. Dieser beabsichtigt die Etablierung eines gemeinsamen Verständnisses und stellt Richtlinien und Methoden für die Entwicklung und Evaluation von Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) bereit. Ziel des CoP ist es zudem Risiken zu erkennen und abzuschätzen sowie ein Methodenset zur Evaluation der Beherrschbarkeit bereitzustellen (RESPONSE 3, 2006).

3 Konzeption und Entwicklung

3.1 Motivation und Ziel

3.1.1 Vulnerable Road Users

Vulnerable Road Users – im Deutschen „besonders gefährdete Verkehrsteilnehmer“, oft auch „schwächere Verkehrsteilnehmer“ oder „verletzliche Verkehrsteilnehmer“ – können als „nicht motorisierte Verkehrsteilnehmer wie z. B. Fußgänger und Fahrradfahrer sowie Motorradfahrer und Personen mit Behinderungen oder eingeschränkter Mobilität und eingeschränktem Orientierungssinn“ (Europäische Union, 2010, S. 4) definiert werden. Im Gegensatz zu Fahrern und Insassen in Personen- oder Lastkraftwagen, die von einer schützenden Karosserie umgeben sind, haben VRUs selbst, abgesehen von persönlicher passiver Schutzausrüstung wie z.B. Fahrradhelmen, keine weiteren Schutzmöglichkeiten bei Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern (Otte, Jänsch & Haasper, 2012).

3.1.2 Unfallgeschehen

Weltweit sterben jedes Jahr mehr als 1,2 Millionen Menschen im Straßenverkehr, wobei die Zahl trotz zunehmender Motorisierung und Bevölkerungswachstum seit 2007 nahezu stagniert, was mitunter auf aktive Maßnahmen zur Erhöhung der Straßensicherheit zurückgeführt wird (World Health Organization, 2015). Nahezu die Hälfte (49 %) der weltweiten Verkehrstoten sind VRUs, genauer 23 % Krafttradfahrer, 22 % Fußgänger und 4 % Fahrradfahrer, wobei sich je nach Region große Unterschiede ergeben – in Europa etwa ist der relative Anteil getöteter VRUs mit 39 % deutlich geringer als in Afrika mit 50 % oder im Westpazifik mit 64 % (World Health Organization, 2015).

In Deutschland gab es 2017 etwa 2,6 Millionen polizeilich erfasste Unfälle, wovon 0,3 Millionen mit Personenschaden waren (Statistisches Bundesamt, 2018). Dabei wurden insgesamt 583.000 Personen verletzt, wobei etwa 43.000 Motorradfahrer, 86.000 Fahrradfahrer und 33.000 Fußgänger beteiligt waren (Statistisches Bundesamt, 2018). Das Fehlverhalten von Fahrzeugführern kann dabei als eine der Hauptursachen identifiziert werden, wobei, nebst unangebrachter Geschwindigkeit oder falschem Abstand, insbesondere beispielsweise auch „Fehlverhalten gegenüber Fußgänger“ und Situationen beim „Abbiegen, Wenden, Rückwärtsfahren, Ein- und Anfahren“ große Anteile einnehmen.

Die hohen Unfallzahlen haben auch aus volkswirtschaftlicher Sicht enorme ökonomische Auswirkungen. Abgesehen von Sachschäden, können einzelne Personenschäden in Deutschland je nach Verletzungsschwere von einigen Tausend Euro bis über eine Million Euro reichen (Baum, Kranz & Westerkamp, 2010).

3.1.3 Zielsetzung

Motiviert durch die noch immer erschreckend hohen Zahlen an verletzten und getöteten Vulnerable Road Users (VRUs) soll ein Mensch-Maschine-System entwickelt werden, das die Sicherheit von VRUs im Straßenverkehr erhöht. Als Anknüpfungspunkt wird hierbei eine aktive Unterstützung des Fahrers beim Ausführen der Fahraufgabe gewählt, um einerseits Fehlverhalten zu minimieren und andererseits ein der Situation angemessenes Verhalten zu bestärken. Die Idee ist es, die Aufmerksamkeit des Fahrers über mehrere Modalitäten bei manueller oder teilautomatisierter Fahrt, gezielt so zu lenken, dass dieser Gefahren von, durch und für VRUs frühzeitig erkennen kann und so eine geeignete Reaktion ausführen kann. Das System soll durch die Aufmerksamkeitslenkung dabei auch dem Vigilanz-Problem entgegenwirken. Das Ziel des Projekts ist daher die Konzeption, Entwicklung und Evaluation einer Mensch-Maschine-Schnittstelle zur multimodalen proaktiven Fahrerwarnung zum Schutz schwächerer Verkehrsteilnehmer.

3.2 Warnkonzept

3.2.1 Einordnung

Grundsätzlich gesehen handelt es sich bei dem entwickelten System entsprechend der Einteilung von Gasser et al. (2015) um ein DAS der Kategorie A (informierende und warnende Funktion) bzw. genauer, nach Reschka et al. (2015) um ein FVCW-System, das einen Fahrer also vor einer drohenden Frontkollision warnen soll. Generell wäre natürlich auch darüber nachzudenken, das System in andere Richtungen zu erweitern (um beispielsweise auf drohende Kollisionen beim Rückwärtsfahren hinzuweisen). Nach den Ergebnissen und Vorschlägen des PROSPECT-Projekts (Stoll, Schneider, Wisch, Seiniger & Schaller, 2016) sind Szenarien mit rückwärtigen Kollisionen weniger oft anzutreffen als Kollisionen im Frontbereich, weshalb im Rahmen dieses Projekts zunächst der Frontbereich fokussiert wird. Insgesamt basiert das Konzept dabei auf dem Prinzip, dem Fahrer möglichst schnell dynamische Informationen über eine drohende Gefahr bereitzustellen, ohne eine direkte Handlungsanweisung auszusprechen. Nach Parasuraman et al. (2000) handelt es sich hierbei somit um eine Informationsautomatisierung. Ziel des Systems ist es, dass diese Informationen in ihrer Darbietung eine möglichst schnelle Einschätzung des Fahrers über die drohende Gefahr in Dringlichkeit und Richtung ermöglichen. Die vorgestellten Konzept-Elemente sollen diese Informationen daher möglichst kongruent und schnell erfassbar zur Verfügung stellen. Dieses Grundkonzept ergibt es aus den in den Abschnitten 2.1. Informationsverarbeitung und 2.2. Mensch-Maschine-Interaktion vorgestellten Erkenntnissen.

3.2.2 Modalitäten

Für die Warnung stehen generell diverse Maßnahmen bzw. auch diverse ansprechbare Modalitäten zur Verfügung: Optisch (z.B. Anzeige im Kombidisplay oder in einer LED-Leiste, z.B. Winkler et al., 2018) Akustisch (Warntöne über das Fahrzeug-Soundsystem, z.B. Fricke, 2009b), Haptisch (Haptisches Brems- oder Gaspedal, Force Feedback, Warnbremsruck, z.B.

de Rosario et al., 2010; Winkler et al., 2018) Folgt man den Modellannahmen von Wickens et al. (2014), so ist es für die menschliche Informationsverarbeitung sinnvoll, Redundanz in der Codierung von Hinweisreizen zu nutzen. Dies verbessert die Erkennungsleistung des Reizes. Wickens et al. zufolge kann eine solche Redundanz insbesondere durch die gezielte Wiedergabe der Reize auf unterschiedlichen Modalitäten erzeugt werden. Es bietet sich daher an, einen wichtigen Warnhinweis, multimodal (d.h. über mehrere Sinneskanäle) zu codieren. Basierend auf den Gestaltungshinweisen von Petermann-Stock (2013) zur Gestaltung von Warnungen und auf den Ableitungen des Multiple Resource Model nach Wickens und Hollands (1999) sollte insbesondere die Verknüpfung visueller und akustischer Modalitäten in einem Warnkonzept favorisiert werden. In diesem Projekt wird daher das Warnkonzept auf diese Modalitäten fokussiert. Allerdings bietet sich für zukünftige Weiterentwicklungen auch eine Erweiterung um eine haptische Komponente (z.B. ein Bremsruck oder Force Feedback im Lenkrad an; siehe z.B. Drüke, Semmler & Bendewald, 2018).

Allgemein orientiert sich die Wahl und Abstimmung der einzelnen Komponenten an einer als Konzept B bezeichneten Zusammenstellung des UR:BAN-Projekts (Petermann-Stock, 2013) sowie an der HMI-Strategie „Warnings & interventions“ (Drüke et al., 2018; siehe zu beiden Modellen Anhang A.1). Aus den Konzepten wird für das geplante System folgende Modalitäten bzw. Komponenten übernommen:

- Visuell: LED-Leiste, Display im Kombiinstrument
- Akustisch: Warntöne im Fahrzeugsoundsystem

Die zugrundeliegenden Konzepte wird für die geplante Umsetzung im aktuellen Projekt leicht angepasst bzw. aktualisiert. Im Folgenden werden konkrete Gestaltungsempfehlungen für die Komponenten beschrieben, die bei der Umsetzung angewendet werden.

Visuell

Im folgenden Abschnitt sollen die relevanten Gestaltungsempfehlungen der beiden visuellen Komponenten des Warnsystems (LED-Leiste und Kombiinstrument) vorgestellt werden.

a) LED-Leiste

Frühere Untersuchungen, wie die von Utesch (2014) zeigen, dass LED-Leisten im Blickfeld des Fahrers dazu geeignet sind, gezielt Warnungen und andere Arten von Informationen an den Fahrer weiterzugeben. Im Rahmen des vorliegenden Konzeptes soll daher genauer betrachtet werden, wie eine solche LED-Leiste vor herannahenden VRUs warnen kann.

In Studien der Firma Bosch (Winkler et al., 2018) konnten LED-Leisten bereits gezielt zur Aufmerksamkeitslenkung eingesetzt werden. So konnte beispielsweise eine gezielte Orien-

tierungsreaktion hin zu kritischen Bereichen einer Fahrszenerie erzeugt werden. Im Rahmen dieser Studien konnten außerdem folgende Gestaltungsempfehlungen abgeleitet werden:

- Breite der LED-Leiste über die gesamte Cockpit-Breite
- Möglichst strikte Vermeidung von Fehlwarnungen
- Aufleuchten der gesamten LED-Breite in rot wird als Eskalation verstanden

Zum weiteren Design können ebenfalls Schlüsse aus den Gestaltungsempfehlungen von UR:BAN (2016) gezogen werden. Relevant wären hierbei:

- Eskalation über Breite des erleuchteten LED-Bereichs codierbar
- Maximal 3 Eskalationsstufen

Greift man außerdem auf die Hinweise von Wickens et al. (2014) zurück, so sollte auch die Vorprägung verschiedener Farben in Warnszenarios eine Möglichkeit zur Differenzierbarkeit der Eskalationsstufen bieten.

In dem im vorliegenden Bericht vorgestellten Warnkonzept ist die Grundidee mit der LED-Leiste einen erkannten VRU vor dem Fahrzeug zu erkennen. Aus konstruktionstechnischen Gründen wird für den Prototypen daher ein Augfixpunkt angenommen, also ein Punkt, bei dem bei allen anthropometrisch unterschiedlichen Fahrertypologien die Augen an der gleichen Stelle liegen sollten. Von diesem Augfixpunkt aus wird eine Sichtachse gerade aus nach außen definiert. Nähert sich nun ein VRU in die weitere Fahrzeugtrajektorie (z.B. von der Seite aber auch von direkt geradeaus), so wird anhand der aktuellen Position des Fahrzeugs und der Position des VRU der Winkel zwischen der Sichtachse nach vorne und der Position des VRU bestimmt. Auf der LED-Leiste wird daraufhin der Bereich erleuchtet, der vom Fahrer aus gesehen dem gleichen Winkel nach rechts oder links entspricht. Wendet der Fahrer daraufhin seinen Blick auf diesen erleuchteten Bereich, so kann er in Verlängerung der neuen Sichtachse den VRU erkennen. Eine bildliche Darstellung dieser Zusammenhänge ist in Abbildung 12 in Abschnitt 3.3.2 Entwicklung zu finden.

b) Display im Kombiinstrument

Wie Knoll (2015) beschreibt, kann das Display im Kombiinstrument grundsätzlich dazu genutzt werden, fahrrelevante Inhalte (z.B. auch Warnungen und Frühwarnungen) wiederzugeben. Daher wäre es auch in dem vorliegenden Warnsystem sinnvoll, Symbole zur Unterstützung der multimodalen Warnung und der Anzeige des Systemstatus im Kombiinstrument anzuzeigen. Da zu solchen Warnungen bereits eine Vielzahl an Studien und Literatur vorliegt (z.B. Winkler et al., 2018), sei an dieser Stelle an diese weiterführende Literatur verwiesen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die LED-Leiste daher weder im Konzept noch in der prototypischen Umsetzung weiter behandelt.

Akustisch

Da auch im Bereich der auditiven Fahrerwarnung bereits ein breites Spektrum an Untersuchungen besteht, sollen spezifischere Ableitungen für die Gestaltungsempfehlungen für das geplante HMI getroffen werden. Fricke (2009b) legte dabei folgende Kriterien und Empfehlungen für die Verwendung von Warnsounds im Automobil nahe:

- Grundfrequenz zwischen 500Hz und 2000Hz
- Verwendung von Auditory Icons anstelle von Auditory Earcons zur besseren Einordnung der Gefahr
- Warnton mindestens 15dB über den Hintergrundgeräuschen im Fahrzeug

Weitere Ergebnisse der Untersuchungen von Campbell, Richard, Brown und McCallum (2007) geben weitere Hinweise darauf, wie eine geeignete auditorische Warnung zu gestalten ist. Ihre Aufgabe ist es dabei:

- Die Aufmerksamkeit eines abgelenkten Fahrers wieder zurückzuholen
- Zeitkritische Informationen wiederzugeben
- Kurze und nicht zu häufige Rückmeldungen zu geben

Auch schlagen die Autoren vor, dass Auditory Icons in Situationen, die eine sofortige Warnung erfordern neben einfachen Tönen gut geeignet sind. In anderen, weniger kritischen Situationen sollten sie aufgrund der Gefahr von Fehlwarnungen nicht eingesetzt werden.

Weitere Hinweise zur Gestaltung der Warntöne nach Campbell et al. (2007) sind:

- Einfache Unterscheidbarkeit unterschiedlicher Warntöne unterschiedlicher Warnsysteme
- Einsatz von zeitlicher Codierung (z.B. Wiederholfrequenz) zur Verbesserung der Diskriminierbarkeit und Dringlichkeitswahrnehmung
- Einsatz lokalisierter Schallquellen zur besseren Diskriminierbarkeit der Gefahrenquelle

In dem vorliegenden Warnkonzept soll die Warnung vor dem VRU anhand eines Auditory Icons stattfinden, mit dem dem Fahrer sofort die Charakteristik des zu warnenden Objekts deutlich wird. Ein computergeneriertes Earcon wird daher als nicht geeignet betrachtet (Fricke, 2009b). Die Wahl fällt daraufhin auf eine Fahrradklingel, die per se bereits einen Warncharakter mit Hinweis auf einen verletzlichen Verkehrsteilnehmer enthält. Aufgrund der vorliegenden Literatur (Fricke, 2009a; UR:BAN, 2016) sollte dem Warnton bereits eine örtliche Komponente gegeben werden. Dies wird erreicht, indem der Ton je nach Position des VRU leicht nach links oder rechts versetzt abgespielt wird. Eine genauere Charakterisierung des Warntons erfolgt in Abschnitt 3.3.1 Komponenten.

3.2.3 Warnkaskade

Im Wesentlichen besteht das Warnkonzept, entsprechend der als Basis verwendeten „HMI-Strategie Warnings and interventions“ (Drücke et al., 2018) aus einer dreistufigen Warnkaskade mit den Stufen Frühwarnung, Warnung und Akutwarnung. In Abbildung 5 sind die jeweiligen Stufen der Warnkaskade dargestellt. Diese basieren zu einem Großteil auf verschiedenen Untersuchungen, die bereits im Rahmen des UR:BAN-Projekts durchgeführt wurden, wobei hier der Fokus der Untersuchungen meist nicht auf dem direkten Einsatz zur Warnung vor VRUs lag.

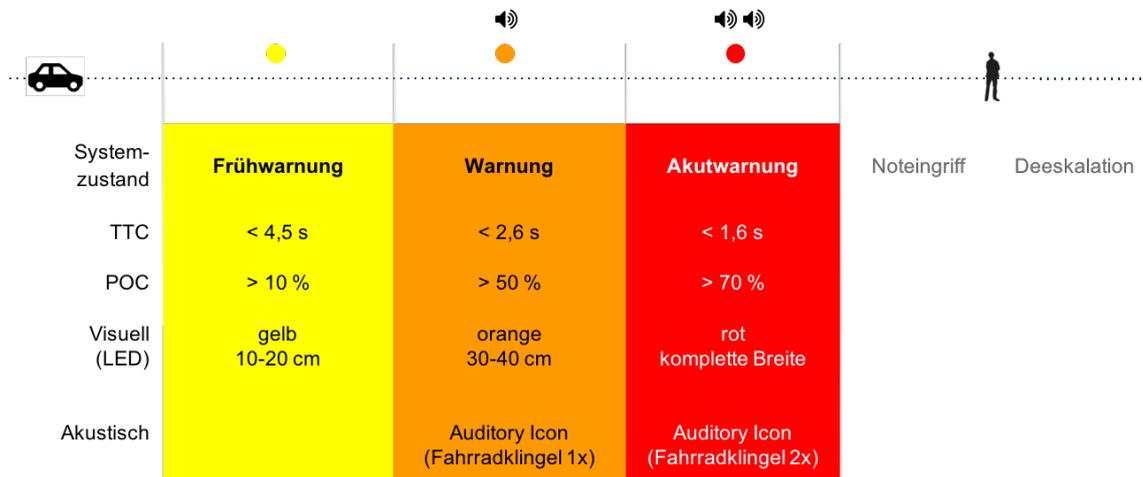


Abbildung 5 Darstellung der einzelnen Warnstufen mit den jeweiligen Kriterien der Time to Collision (TTC) und Probability of Collision (POC), der Darstellung auf der LED-Leiste und ggf. der Art des Warntons

Die jeweilige Einstufung auf der Kaskade erfolgt anhand der Variable der Kritikalität. Diese wird durch die Algorithmen des Umgebungserfassungssystems ermittelt und setzt sich aus den beiden Parametern TTC und POC zusammen. Das Bilderkennungssystem errechnet hierbei für jeden erfassten VRU beide Werte anhand der in Abschnitt 2.3.3 Stand der Technik beschriebenen Algorithmen. Werden beide Werte für die jeweils nächsthöhere Stufe der Kritikalität erreicht, wechselt die Anzeige in diese Stufe. Umgekehrt wechselt das System bei Nichterfüllung einer der beiden Kriterien in eine niedrigere Stufe. Es wird also jeweils immer die höchste Warnung angezeigt, für die beide Kriterien erfüllt sind. Wird kein oder nur ein Kriterium der niedrigsten Stufe erfüllt, so bleibt die Leiste komplett dunkel. Die für jede Stufe festgelegte POC basiert dabei auf Erfahrungswerten zur Erkennungsleistung des in diesem Fahrzeug eingesetzten Systems. Sie ist daher nur als Anhaltswert zu verstehen und muss bei zukünftiger Umsetzung für ein anderes System neu bestimmt werden.

Im weiteren Verlauf werden die einzelnen Stufen des Systems und die daraus resultierenden Anzeigen genauer vorgestellt.

Frühwarnung

Wie von den HMI-Konzepten zur HMI-Strategie „Warnings and interventions“ (Drüke et al., 2018) vorgesehen, stellt die erste Stufe der Warnkaskade eine „early warning“ oder „Frühwarnung“ dar. Diese soll den Fahrer darauf hinweisen, dass es ein Objekt gibt, das seine Aufmerksamkeit benötigt, allerdings noch nicht kritisch ist.

Für das von uns vorgesehene Konzept wird ein solcher Hinweis an den Fahrer durch eine möglichst frühe Objekterkennung der Sensorsysteme ermöglicht, die anhand von Vorhersagealgorithmen versucht, dem Fahrer einen möglichst frühen Hinweis auf ein möglicherweise problematisches Szenario zu geben. Da sich der Fahrer zu diesem Zeitpunkt allerdings noch nicht in der kritischen Situation selbst befindet, sollte die Kommunikation über die Erkennung des Objekts noch keinen Warn- oder zu starken Aufforderungscharakter haben (Drüke et al., 2018). Für das von uns entwickelte Warnsystem wird wie auch bei Drüke et al. daraufhin entschieden, zu diesem Zeitpunkt auf eine akustische Warnung zu verzichten. Anders als von Drüke et al. vorgeschlagen, wird in dem aktuellen Warnsystem-Prototypen die LED-Leiste bereits in dieser Stufe eingesetzt, um den Fahrer möglichst früh auf den VRU und seine Position hinzuweisen. Diese Entscheidung liegt vor allem darin begründet, da überprüft werden soll, ob so eine möglichst gute Aufmerksamkeitslenkung des Fahrers hin zum VRU erfolgen kann.

Die für diese Warnstufe zu erreichende TTC liegt bei 4,5 Sekunden. Dieser Wert basiert auf der Empfehlung von Drüke et al., einen Mindestwert von 2,5 Sekunden für diese Warnstufe zu erreichen. Wie Götze, Bißbort, Petermann-Stock und Bengler (2014) jedoch anmerken, sollte ein möglichst noch früherer Hinweis in dieser Stufe angestrebt werden. Auf Basis der vorliegenden Bilderkennungsalgorithmen wird daher ein Wert von 4,5 Sekunden festgelegt. Die POC für diese Stufe wird auf 10 % festgelegt. Ein solch niedriger Wert ermöglicht den angestrebten möglichst frühen Hinweis. Durch die Kombination mit dem zweiten Kriterium der TTC wird gleichzeitig eine möglicherweise störende zu frühe Fehlwarnung vermieden.

Die Anzeige erfolgt, wie bereits angesprochen, in dieser Stufe nur auf der LED-Leiste. Der erkannte VRU wird nach dem oben beschriebenen Schema in Versatz zu der normalen Sichtachse nach vorne angezeigt. Die LED leuchtet dazu gelb in einem Bereich von ca. 10-20 cm Breite (wie auch bei der Stufe Warnung lässt sich eine genaue Breitenbestimmung nur schwer vornehmen, da die Abstrahlcharakteristik der reflektierten Fläche keine genauen Grenzen des beleuchteten Bereichs ergibt). Die Gestalt der Frühwarnung in der LED-Leiste ist in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6 LED-Anzeige auf der Warnstufe „Frühwarnung“

Warnung

Verringert sich die TTC für den annähernden VRU auf 2,6 Sekunden und steigt die POC auf 50 %, so wird die nächste Stufe der Warnkaskade erreicht: die eigentliche Warnung. Der Wert der TTC basiert dabei als ein Mittelwert aus den Empfehlungen von Drüke et al. (2018) und Diederichs, Brouwer, Klöden, Zahn und Schmitz (2018). Der Wert der POC wird gewählt, da so erwartungsgemäß eine Warnung erfolgen sollte, wenn sich die POC noch minimal erhöht und gleichzeitig der Grenzwert der entsprechenden TTC erreicht ist.

Insgesamt soll diese Warnstufe dem Fahrer den Hinweis vermitteln, dass eine Handlung erfolgen sollte, um eine drohende Kollision zu verhindern. Die verwendeten Warnelemente sollten daher an dieser Stelle bereits durchaus Aufforderungs- und starken Hinweischarakter haben. Erreicht wird dies mithilfe des Einsatzes sowohl der LED-Leiste als auch eines Warntons in Form eines Auditory Icons. Auch hier erfolgt der Hinweis auf die Position des VRU in Relation zum Fahrzeug mithilfe des oben beschriebenen Schemas. Zur Darstellung der erhöhten Kritikalität wächst die Breite des erleuchteten Bereichs nun auf ca. 30-40 cm. Ebenfalls wird diese Steigerung durch einen Farbwechsel auf die Farbe Orange dargestellt. Des Weiteren wird diese Warnstufe auch von einem Warnton begleitet. Im Rahmen der Stufe Warnung handelt es sich hierbei um eine einmal abgespielte Fahrradklingel. Abbildung 7 zeigt die visuelle Komponente der LED-Leiste im Fahrzeug in dieser Stufe.



Abbildung 7 LED-Anzeige auf der Warnstufe „Warnung“

Akutwarnung

Die höchste Warnstufe, in der der Fahrer nun eine Handlung einleiten muss, stellt die Akutwarnung dar. Diese wird im aktuellen Warnkonzept bei gleichzeitigem Vorliegen einer TTC von 1,6 Sekunden und einer POC von 70 % eingeleitet. Der Wert für die TTC basiert ebenfalls auf den Empfehlungen von Drüke et al. (2018) und Götze et al. (2014). Der Wert der POC wird auf Basis von Erfahrungswerten zur gezielten Auslösung einer Akutwarnung bei gleichzeitiger Vermeidung zu häufiger Fehlwarnungen ermittelt.

Die in dieser Stufe eingesetzten Warnelemente haben nun höchste Dringlichkeit zur Handlungsaufforderung. Es werden daher sowohl die LED-Leiste als auch ein Warnton eingesetzt. Um bei den Fahrern eine sofortige Bremswirkung zu erzielen, leuchtet die LED-Leiste auf gesamter Breite rot auf. Dies wird vom Fahrer beispielsweise ähnlich zu aufleuchtenden Bremslichtern eines vorausfahrenden Fahrzeugs interpretiert (Fricke, 2009a). Durch die Anzeige auf der gesamten Breite des Fahrzeugcockpits soll eine definitive Aufmerksamkeitslenkung zur Szenerie vor dem Fahrzeug erreicht werden. Der Warnton wird ebenfalls in der Dringlichkeit erhöht, indem die Fahrradklingel nun nicht nur einmalig erklingt, sondern zweimal in kurzer Folge. Die visuelle Komponente dieser Warnstufe ist in Abbildung 8 zu sehen.



Abbildung 8 LED-Anzeige auf der Warnstufe „Akutwarnung“

Weitere Stufen

Reagiert der Fahrer auch in der Akutwarnung nicht auf die drohende Kollision, so ist nach dem Konzept von Drücke et al. in weiterer Stufe ein Systemeingriff vorgesehen, bei dem das Fahrzeug selbst versucht die Kollision zu verhindern. Meist wäre dies dann mindestens mit einer automatisch eingeleiteten Notbremsung des Fahrzeugs verbunden. So sollen selbst bei einer unvermeidbaren Kollision die Unfallfolgen abgemildert werden. Insgesamt könnte das im Testfahrzeug vorhandene Umgebungserfassungssystem eine Notbremsung auch mithilfe von Bremskraftverstärkern unterstützen, wenn der Fahrer diese zwar einleitet, dabei aber nicht das volle Potenzial des Bremssystems ausnutzt. Nach Ende der kritischen Situation soll das Fahrzeug Drücke et al. zufolge dann in eine Deeskalationsstufe übergehen, bei dem das System dem Fahrer rückmeldet, dass die Situation aufgelöst ist. Wie eine solche Deeskalationsstufe für den vorliegenden Prototypen genau zu gestalten ist, steht hierbei noch aus.

Die Multimodalität der Warnkaskade wird erreicht durch die Größe und Farbe der Balken (visuell) sowie durch die Warntöne (akustisch).

3.3 Prototyp

3.3.1 Komponenten

Für die prototypische Umsetzung des oben beschriebenen Warnkonzepts sind zunächst drei Hauptkomponenten zur Wiedergabe der multimodalen Warnung angedacht:

- LED-Leiste zur visuellen Anzeige der Objektposition
- Warnsound (Auditory Icon) zur akustischen Anzeige der Warnung mit Richtungsinformation (links, Mitte, rechts)
- Symbolbasierte Anzeige im Kombidisplay (nicht prototypisch umgesetzt)

Die Ausführung der Komponenten entsprechend den Gestaltungsempfehlungen (Kapitel 3.2) sei im Folgenden ausführlich beschrieben.

LED-Leiste

Bei der LED-Leiste handelte es sich um einen RGB-LED-Strip des Typs Adafruit NeoPixel des Herstellers Shenzhen BTF-Lighting. Bei dieser Bauweise sind jeweils 3 Komponenten-LEDs in den Farben rot, grün und blau in einer LED zusammengefasst. Durch jeweilig anteilige Mischung der einzelnen Farbkomponenten können mit jeder LED die jeweiligen Farben des RGB-Farbraums dargestellt werden. Bei dem vorliegenden LED-Strip ist es durch Ausstattung des Strips mit einem WS2812B-Microcontroller-Chip möglich, jede einzelne LED einzeln anzusteuern und sie somit ein- oder auszuschalten bzw. ihr eine eigene Farbe zuzuweisen. Die einzelnen LEDs sind dabei auf einem Band befestigt, das bereits eine durchgehende Datenweiterleitung und Spannungsversorgung sicherstellt, sofern es an die entsprechende Daten- und Stromquelle angeschlossen ist. Nach verschiedenen Tests mit unterschiedlichen Anzahlen von LEDs pro Meter wurde schließlich eine LED-Dichte von 60 LEDs/m als am besten geeignet betrachtet. Diese Dichte bot sowohl den Vorteil einer guten lokalisierbaren Auflösung zur Darstellung des VRUs als auch gleichzeitig der technischen Umsetzbarkeit im Versuchsträger, bei der eine größere Zahl an LEDs vermutlich zu Problemen mit der Stromversorgung geführt hätten.

Ausgiebige Tests mit verschiedenen Positionierungsvarianten im Fahrzeug zeigen folgende Aspekte als kritisch für die spätere Anbringung auf:

- Spiegelungen in der Windschutzscheibe
- Spiegelungen auf dem Armaturenbrett
- Blendungen des Fahrers
- Sichtbarkeit bzw. Ablesbarkeit bei ungünstigen Lichtverhältnissen (z.B. tiefstehende Sonne)

- Sichtbarkeit bzw. Ablesbarkeit aufgrund unterschiedlicher Neigungen der Windschutzscheibe und des Armaturenbretts

Um all diesen Aspekten gerecht zu werden, muss daher eine Anbringungsvariante gefunden werden, bei der die LEDs zum einen den Fahrer nicht direkt anleuchten und möglichst wenig Spiegelung auf den verschiedenen Oberflächen im Cockpit erzeugen, zum andern aber noch genug Ablesbarkeit auch bei nicht ganz optimalen Lichtverhältnissen bieten. Es wird daher eine indirekte Positionierung gewählt, bei der die LEDs in einer Halterung angebracht sind, durch die sie parallel zum Armaturenbrett gehalten werden und möglichst senkrecht darauf scheinen. Die Halterung selbst ist an der Rückseite und einem Teil der beschienenen Unterseite mit weißem Karton ausgekleidet, sodass hier eine möglichst starker Reflexionsgrad besteht und im Falle einer Beleuchtung diese gut vom Fahrer erkannt werden kann. Eine schematische Darstellung dieser Anbringung ist in Abbildung 9 zu sehen. Diese Positionierungsvariante ist in verschiedenen Tests als optimale Variante gewählt worden.

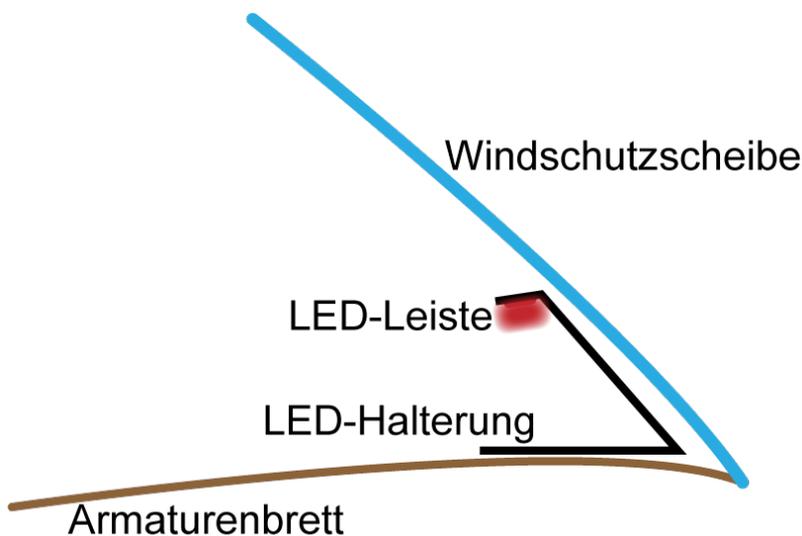


Abbildung 9 Schematische Darstellung der Anbringung der LED-Leiste im Fahrzeug

Warnton

Wie bereits aufgezeigt, eignet sich Fricke (2009b) zufolge insbesondere ein Auditory Icon mit direkt verknüpfter inhärenter Warnkomponente als Warnton im Automobil. Um an dieser Stelle bereits Informationen darüber bereitstellen zu können, dass es sich bei dem Objekt, vor dem gewarnt wird um einen VRU handelt und gleichzeitig einen Warncharakter des Tons beizubehalten, wird die Aufnahme einer Fahrradklingel gewählt. Diese ist vom Projektteam am heimischen Fahrrad aufgenommen und digital analysiert und nachbearbeitet worden. So wird beispielsweise sichergestellt, das geforderte Frequenzspektrum der Grundfrequenz des Tons und die benötigte Lautstärke erreicht wird. Wie an Abbildung 10 zu erkennen, wird durch die Aufnahme eine Grundfrequenz von ca. 1500 Hz erreicht, was im geforderten Spektrum liegt. Des Weiteren sind in der digitalen Nachbearbeitung die beiden Warntonvarianten für die unterschiedlichen Warnstufen erstellt worden. Dies geschieht durch Zusammenschneidung zweier

einzelner Klingeltöne, sodass diese kurz hintereinander folgen. Um dem Ton eine räumliche Komponente zu geben und damit eine bessere räumliche Lokalisierbarkeit des gefährdeten VRUs sicherzustellen, werden außerdem drei Varianten des Tons erstellt, bei dem dessen Stereosound entweder zentriert bleibt oder mithilfe des Balance-Faders entweder zu 90 % rechts bzw. links abgespielt wird.

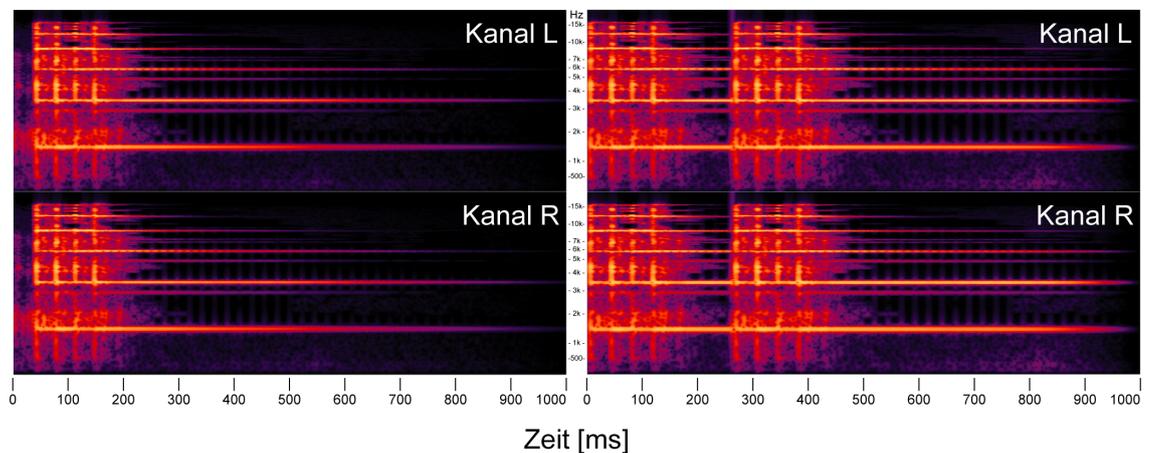


Abbildung 10 Spektralanalyse der Warntöne in der Stufe Warnung (links) und Akutwarnung (rechts). Dargestellt ist das Frequenzspektrum (in Hz) in Abhängigkeit der Zeit (in ms) für die beiden Stereokanäle bei einem Warnton ohne räumliche Lokalisierung

Der Warnton selbst wird im Anschluss als wav-Datei exportiert und mithilfe des Python-Plugins „playsound“ vom Python-Script, das zur Steuerung der Warnung verwendet wird, im jeweiligen Warnfall ausgespielt. Die Wiedergabe erfolgt dann über die bereits im Fahrzeug verbauten Lautsprecher.

Anzeige im Kombiinstrument

Da verschiedene Studien (z.B. Götze, Ruff & Bengler, 2015 und Götze & Bengler, 2015) sowie das „HMI toolkit“ von UR:BAN (Drüke et al., 2018) aufzeigen, dass die Verwendung von Symbolen im Kombiinstrument oder auch in anderen Systemen wie Head-up Displays (HUDs) eine sinnvolle Komponente zur Anzeige von Warnungen bieten, ist angedacht eine solche Anzeige ebenfalls in das Warnkonzept mit aufzunehmen. Aufgrund von technischen Einschränkungen, ist es jedoch nicht möglich, solche Anzeigen tatsächlich prototypisch in den Versuchsträger zu integrieren und zu testen, weshalb auch auf eine letztliche Ausgestaltung der Anzeige im Kombidisplay verzichtet wird. Die Evaluation (Kapitel 4) soll daher insbesondere dazu dienen, die anderen, bisher noch weniger erforschten Komponenten des Warnkonzepts (LED-Leiste und Auditory Icon als Warnton) zu evaluieren.

Verschaltung der Komponenten

Technisch gesehen erfolgt die Ausgabe der Fahrerwarnung nebst dem Umgebungserfassungssystem mittels 4 Hauptkomponenten:

- Generischer Computer zur Verwendung des Python-Skripts (zum Python-Skript siehe Abschnitt 3.3.2. Entwicklung) und Abspielen des Sounds
- Arduino Uno als Microcontroller zur Ansteuerung der LED-Leiste
- LED-Leiste zur visuellen Ausgabe der Warnung (siehe hierzu Abschnitt LED-Leiste oben)
- Soundsystem des Versuchsträgers

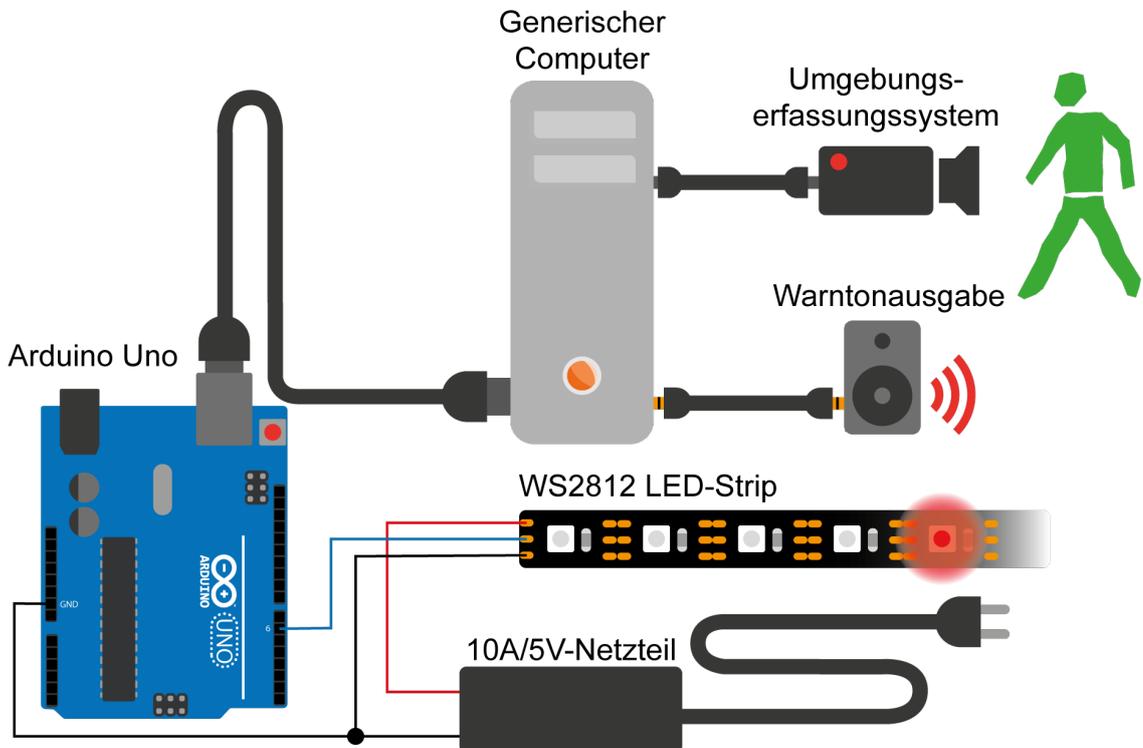


Abbildung 11 Schematische Darstellung der Verschaltung des Prototyp

In Abbildung 11 ist schematisch dargestellt, wie die einzelnen Komponenten miteinander verschaltet sind. Der „generische Computer“ kann dabei entweder ein bereits in das Erfassungssystem integrierter Fahrzeugcomputer oder ein externer Rechner (z.B. Fahrzeugrechner, Notebook oder ein Kleinstrechner wie ein Raspberry Pi) sein. Aufgrund von Kompatibilitätsproblemen mit der USB-Schnittstelle wird bei den im diesem Bericht beschriebenen Experimenten ein Apple MacBook Air (13 Zoll, Mitte 2012 mit 1,8 GHz Intel Core i5, 8 GB 1600 MHz DDR3, Intel HD Graphics 4000 1536 MB) als Rechner verwendet.

Die Stromversorgung der LED-Leiste erfolgt über ein 5V-10A-Netzteil, die des Arduino Uno direkt über den USB-Port und die Verbindung zum generischen Computer. Da die LED-Leiste mögliche Spannungsschwankungen durch Flackern oder fehlerhafte Farbdarstellungen darstellen würde, ist es notwendig, sowohl dem Arduino als auch dem GND-Pol der LED-Leiste eine gemeinsame Erdung über das Netzteil zu geben. Die Datenübertragung vom Arduino an die LED-Leiste erfolgt über einen dedizierten Daten-Pin (dieser ist im Python-Code frei bestimmbar) des Arduino an den DIN-Pol der LED-Leiste.

3.3.2 Entwicklung

Neben der Planung des prinzipiellen Prototypaufbaus und der Komponentenwahl ist ein Kernbestandteil die softwareseitige Entwicklung. Im Rahmen dieses Projekts wird dabei die Mensch-Maschine-Schnittstelle sowohl hardware- als auch softwareseitig entwickelt. Andere Systemkomponenten wie etwa die Umgebungserfassung und Objekterkennung des Versuchsträgers sind bereits bestehende bzw. von der Daimler AG entwickelte Systeme. Die letztlich verwendeten Technologien zur Entwicklung der Schnittstelle werden hier nun mit der prinzipiellen Funktionsweise des Prototyps anhand grob abgrenzbarer Phasen beschrieben. Der vollständige Code befindet sich auf der beigefügten Daten-CD.

```
def callback(self, input_objs):
    print 'Got new list with' + str(input_objs.num_objs) + ' objects.'
    json_list = list()
    for obj in input_objs.objs:
        # calculate new position
        # coordinates from obj in camera system
        # (camera position, X->, Z^)
        obj_x = obj.pose.position.x
        obj_y = obj.pose.position.z
        new_obj_json = {
            'id': obj.id, # uint64, global unique id
            'object_id': obj.object_id, # string, same for all
                instances of the same real world object
            'class_id': 'person',
            'pose': [obj_x, obj_y], # geometry_msgs/Pose
            'angle': 0, # angleToCar (calculated)
            'ledPos': 0,
            'ttc': obj.ttc, # float32, time to collision [s]
            'poc': obj.poc, # float32, probability of collision
            'criticality': 0,
        }
        json_list.append(new_obj_json)
    self.data = json.dumps(json_list)
    self.handleData()
    self.handleWarnings()
```

Listing 3.1 Die Callback-Funktion im Python-Script erhält über eine WLAN-Verbindung die vom Umgebungserfassungssystem des Versuchsträgers erkannten Objekte und legt diese in einem JSON-Objekt ab. Anschließend werden die Daten mittels handleData() verarbeitet und in handleWarnings() entsprechend Warnparameter berechnet und ggf. ausgeführt.

1. Bildbasierte Erfassung der VRUs über das bestehende Umgebungserfassungssystem des Fahrzeugs.
2. Verarbeitung der erfassten Objekte im Robot Operating System (ROS) (Quigley et al., 2009) auf den Fahrzeugrechnern des Versuchsträgers.
3. Übergabe der Objektparameter wie Objektklasse (z.B. Fußgänger), Position (relativ zum Fahrzeug), POC und TTC per WLAN an den generischen Computer, welcher das Datenpaket über die darauf installierte ROS Node erhält.

4. Auf dem generischen Computer wird das Datenpaket mit der callback()-Funktion empfangen. Im Python-Script wird für jedes erkannte Objekt ein JSON-Objekt angelegt (siehe Listing 3.1). Ferner werden die Objektparameter verarbeitet: Die in der callback()-Funktion dabei aufgerufene handleData()-Funktion bestimmt auf Basis der Informationen aus dem Umgebungserfassungssystem weitere anzeigerelevante Parameter, wie z.B. den Winkel des Objekts zum Fahrzeug sowie die daraus resultierenden anzusteuern den LEDs. Die Berechnung dieser Informationen erfolgt mittels trigonometrischer Funktionen und dem Strahlensatz und ist in Abbildung 12 veranschaulicht.
5. Entsprechend der verarbeiteten Informationen werden anschließend in der Funktion handleWarnings() die Warnparameter für jedes erkannte Objekt bestimmt. Dabei wird zunächst die Kritikalität eines Objekts resultierend aus der TTC und der POC berechnet (siehe Listing 3.2), womit das Objekt einer Warnstufe zugeordnet wird. Ferner werden Parameter zur Ansteuerung der LEDs (Bestimmung der anzusteuern den Einzel-LEDs und der Farbe entsprechend Kritikalität) und des Sounds (Wahl des abzuspielenden Warntons – Links, Mitte, Rechts) berechnet.
6. Die Anzeigeparameter der visuellen Warnung werden (im Falle kritischer Objekte) per USB-Verbindung vom generischen Rechner an den Arduino Uno gesendet, welcher die LED-Leiste entsprechend ansteuert. Obwohl die WS2812-LEDs einzeln ansteuerbar sind, werden sie mit der Adafruits Library erst über die „globale Zeichenfunktion“ strip.show() tatsächlich mit den zuvor für jede einzelne LED gesetzten Wert aktualisiert. Die loop()-Funktion, also die Hauptfunktion des Arduinos (Listing 3.3) setzt daher, wenn Daten über den seriellen USB-Port verfügbar sind, bei jedem Durchgang die Werte der LED-Leiste über resetLEDStrip() und die aus dem Arduino gespeicherten Daten mit resetData() zurück, bevor die neuen Daten mit getDataFromSerial() und processData() verarbeitet werden. Abschließend werden die neuen Werte auf dem LED-Streifen mit strip.show() angezeigt.
7. Ausgabe der akustischen Warnung über das Soundsystem des Fahrzeugs (Verbindung zwischen generischem Computer und Soundsystem über einen 3,5 mm Klinkestecker) und der visuellen Warnkomponente durch Ansteuerung der WS2812-LED-Leiste über den Arduino Uno. Für letzteres wird auf dem Arduino die Adafruit Neopixels Library verwendet.

3.3.3 Integration

Die oben vorgestellten Komponenten des Prototyps werden in der vierten Phase des Projekts schließlich in das Fahrzeug eingebaut um im späteren Verlauf des Projekts eine Evaluation des Konzepts durchführen zu können. Im Zuge der Integration der Mensch-Maschine-Schnittstelle in das Gesamtsystem wurde hierbei insbesondere auf die Kompetenzen von Sebastian Krebs und Fabian Flohr zurückgegriffen. Sebastian Krebs entwickelte federführend die im Versuchsträger laufende Fußgängererkennung und konfigurierte die Kommunikation zwischen dem ROS-basierten System und der Mensch-Maschine-Schnittstelle.

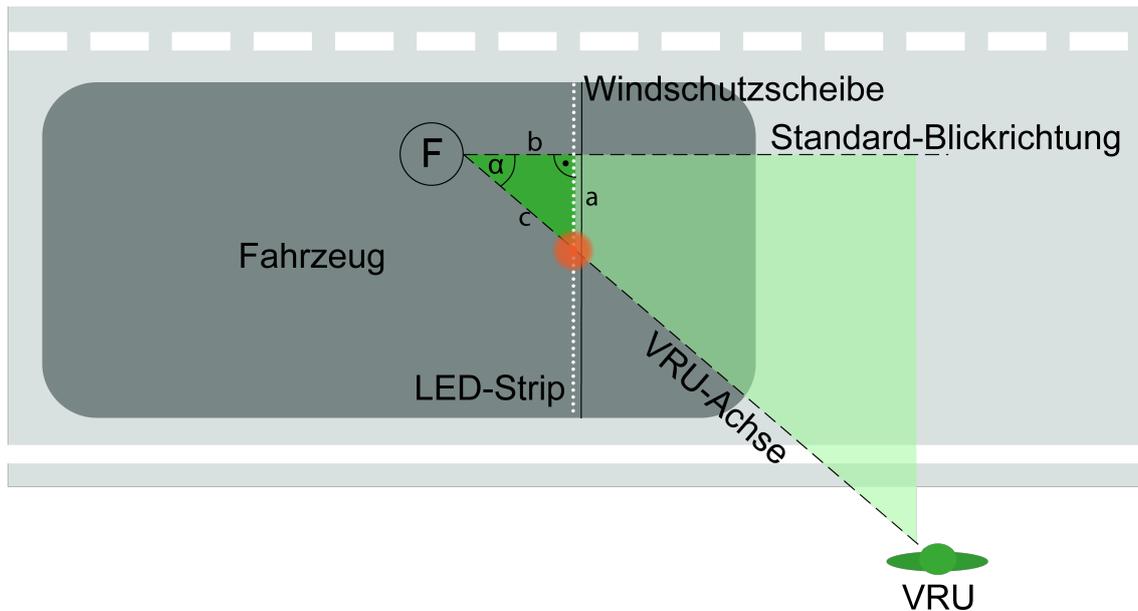


Abbildung 12 Grundkonzept der Berechnung der LED-Position mittels trigonometrischer Funktionen und Strahlensatz

```
def setCriticality(self, warnObject):
    if warnObject['ttc'] <= 1.6 and warnObject['poc'] > 0.7:
        criticality = 3 #Akutwarnung
    elif warnObject['ttc'] <= 2.6 and warnObject['poc'] > 0.5:
        criticality = 2 #Warnung
    elif warnObject['ttc'] <= 4.5 and warnObject['poc'] > 0.1:
        criticality = 1 #Fruehwarnung
    else:
        criticality = 0 #keine Warnung
    return criticality
```

Listing 3.2 Funktion aus dem Python Script zur Bestimmung der Kritikalität bzw. Warnstufe für ein erfasstes Objekt auf Basis der Time to Collision (TTC) und der Propability of Collision (POC)

```
void loop(){
    if(Serial.available() > 0){
        resetLEDStrip();
        resetData();
        getDataFromSerial();
        processData();
    }
    else{
        processData(); //process "old" already received data to keep going
    }
    strip.show();
}
```

Listing 3.3 Haupt-Schleife auf dem Arduino zur Verarbeitung der über die USB-Schnittstelle erhaltenen Daten und entsprechender Ansteuerung der LED-Leiste.

Für den Versuchsaufbau wird ein Wagen des Modells Mercedes Benz S 500 Limousine langversion, V-222 von 2014 genutzt. Das Fahrzeug selbst ist von den Fahreigenschaften und einem Großteil der Elektronik als Serienfahrzeug belassen. Als Forschungsfahrzeug besitzt es jedoch mehrere Einbauten, mit deren Hilfe verschiedene Sensorkonzepte zur Umgebungserfassung getestet werden können.

Der für das vorliegende HMI relevanteste Aufbau stellt dabei ein Stereo-Kamera-System dar. Die 2 MegaPixel Farbkameras mit einer Farbtiefe von 12 Bit und einem Öffnungswinkel von 65°. Die Kameras werden als Stereokamera (baseline 20 cm) betrieben, indem beide simultan mit einer Laufzeit von 20 frames per second (fps) laufen. Dies ermöglicht die Berechnung der Tiefe bzw. des Abstands eines erfassten Objekts. Fußgänger werden durch einen Machine Learning bzw. Deep Learning Ansatz – Single Shot Detector (SSD) in Form einer Bounding Box erkannt. Deren 3D-Positionen werden durch die Stereokameras berechnet und mit einem Kalman Filter über die Zeit getrackt. Aus diesen Berechnungen können die Geschwindigkeit, Bewegungsrichtung und daraus wiederum die TTC sowie die POC errechnet und stetig aktualisiert werden. An dem Versuchsträger befinden sich des Weiteren auch zwei Seitenkameras, die an den äußeren Seitenspiegeln des Fahrzeugs angebracht sind und für die Erfassung der seitlichen Szenerie gedacht sind. Diese sind jedoch im Rahmen der Entwicklung nicht verfügbar gewesen. Erfasste Bildabschnitte werden an einen im Versuchsträger verbauten Computer gesendet, der mithilfe von Bilderkennungsalgorithmen eine Klassifizierung der Szenerie durchführt. Diese Bilderkennungsalgorithmen basieren auf neuronalen Netzen, die spezifisch auf die Erkennung von VRUs im urbanen Kontext trainiert sind. Zur verbesserten Verarbeitung der erkannten Objekte wird auf dem Fahrzeugcomputer Linux mit dem Softwareframework ROS (Quigley et al., 2009) verwendet. Mithilfe dieses Frameworks ist es möglich, vereinfacht Datenpakete zwischen verschiedenen Komponenten eines digitalen Systems auszutauschen, da das Framework bereits für die zeitliche Koordination und angepasste Protokolle zwischen den verschiedenen Komponentenschnittstellen sorgt. Wie in Abschnitt 3.3.2. Entwicklung dargelegt, werden die so erfassten Objekte dann im Rahmen des selbst entwickelten Python-Codes weiterverarbeitet und gegebenenfalls eine Warnkaskade eingeleitet.

Einbau der Komponenten

In den oben beschriebenen Versuchsträger sind auf Hardware-Seite die in Abschnitt 3.3.1. Konzeption vorgestellten Komponenten in Form eines Lo-Fi-Prototyps eingebaut worden. Der Entwicklungsprozess dieses Prototyps ist in Abschnitt 3.3.2. Entwicklung vorgestellt. Letztendlich besteht dieser dann auf Seiten der Hardware aus zwei Hauptkomponenten:

- Die LED-Leiste in Papierhalterung
- Die Box mit den übrigen Komponenten

Verbunden werden diese beiden Komponenten über einen selbst-gefertigten Kabelstrang mit den zwei Kabeln zur Stromversorgung und dem einen Kabel zur Datenübertragung. Die Konfektionierung des Kabelstrangs mit einfachen JST-Steckverbindungen ermöglicht den schnellen und einfachen Ein- und Ausbau der verschiedenen Komponenten, sollten diese einmal nicht benötigt werden.

Da die LED-Leiste für verschiedene Demonstrationzwecke ohnehin im Fahrzeug verbleiben soll, wird sie an der sichtbaren Außenseite mit Kunstleder verkleidet und an die Scheibenwurzel der Windschutzscheibe angelegt. Die angesprochene Kabelverbindung befindet sich dabei an der rechten Seite der Leiste (also auf der Beifahrerseite), sodass der Kabelstrang den Fußraum des Fahrers nicht behindert. Da das Case, welches für den Arduino und die übrige Verkabelung gefertigt wurde, bereits sehr platzsparend ist und eine geordnete Unterbringung im Fahrzeug ermöglicht, wird dieses mit Klettverschluss im Fußraum des Beifahrers angebracht. Auch dies ermöglicht einen schnellen und unkomplizierten Ein- und Ausbau. Zu beachten ist dabei, dass dieser Aufbau die prototypische Konstruktion für das Testsystem darstellt. Wie bereits angesprochen, soll ein mögliches späteres Seriensystem möglichst unscheinbar und in das eigentliche Fahrzeugsystem integriert eingebaut werden. Von Seiten der Elektronikbauteile sollte dies in Form von integrierten Schaltkreisen und Komponenten kein Problem sein. Für den eigentlichen Aufbau der LED-Komponente an der Windschutzscheibe muss ein für das Fahrzeug angepasstes Halterungssystem und eine möglichst nahtlose Integration in das Cockpitdesign geschaffen werden. Dies ist jedoch nicht im Rahmen des aktuellen Projekts vorgesehen, sondern stellt eine zukünftige Entwicklung von Seiten des Fahrzeugbauers dar. In den Abbildungen 13 und 14 sind jeweils die hardwareseitig verbaute LED-Leiste und das Case mit der Elektronik dargestellt.



Abbildung 13 Die eingebaute LED-Halterung im Fahrzeug

Auf Software-Seite gibt es zwei unterschiedliche Verfahren, die bei der Integration beachtet werden müssen: Je nach genutztem generischen Computer ist es entweder notwendig, den externen Computer (wenn ein Laptop oder z.B. ein Raspberry Pi genutzt werden soll) mit dem Python-Skript als ROS Node in das bestehende Sensorsystem einzugliedern oder (wenn der bereits vorhandene ROS Computer genutzt wird), das Skript auf diesem zu starten. In beiden Fällen wird außerdem der Arduino Uno per USB an diese ROS Node angeschlossen und die Stromversorgung der LED-Leiste per Netzteil sichergestellt. In der folgenden Abbildung 15 ist die Erkennung eines VRU auf dem Fahrzeugrechner beispielhaft dargestellt.

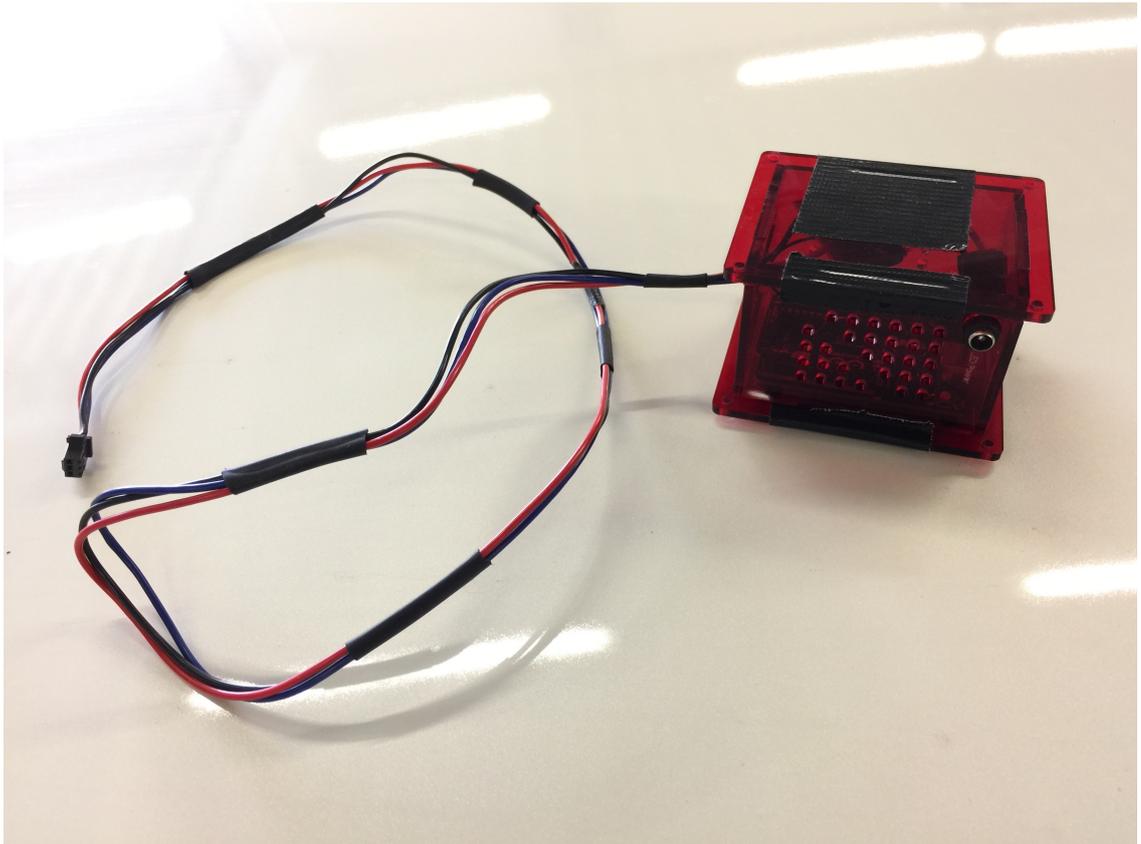


Abbildung 14 Das Case mit den elektronischen Komponenten und Anschlüssen



Abbildung 15 Darstellung eines über das Umgebungserfassungssystem erkannten VRU mit Bounding Box im Kamerabild (links) und als Repräsentation im dreidimensionalen Raum (rechts)

Überprüfung der Reizstärken

Um zu überprüfen, ob überhaupt von psychophysikalischer Seite die Erkennung des Einschaltens der LED erkennbar ist bzw. die Helligkeit der LED nach dem Einbau ausreichend ist, wird eine Helligkeitsmessung mithilfe des Ergonomie-Koffers des Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München durchgeführt (Prenzel & Rausch, 2013). Der Messkoffer enthält ein Multifunktionsmessgerät der Marke Bappu-evo (ELK, 2017). Die so ermittelten Messwerte sollen daraufhin mit der für Helligkeitsunterschiede bestimmte Unterschiedsschwellen nach dem Weber'schen Gesetz verglichen werden. Diese liegt für bei einem Wert von 0,08 (Goldstein, 2008).

Die Messung der Beleuchtungsstärke im Fahrzeugcockpit (gerichtet auf die LED-Leiste) ergibt bei bewölkter Witterung mit leichtem Regen die folgenden Werte:

- Ohne Anzeige einer Warnung: 1582 Lux
- Anzeige der Frühwarnung (gelb, 10-20 cm): 1915 Lux
- Anzeige der Warnung (orange, 30-40 cm): 2037 Lux
- Anzeige der Akutwarnung (rot, komplette Breite): 1879 Lux

Für die nach der Formel $\Delta S/S = k$ (Goldstein, 2008) (wobei S die absolute Reizschwelle, ΔS den relativen Reizunterschied und k den Weber-Bruch der Unterschiedsschwelle bezeichnet) bestimmten Werte ergeben sich dabei folgende Werte für k :

- Sprung von fehlender Warnung zu Frühwarnung: $k \sim 0.17$
- Sprung von Frühwarnung zu Warnung: $k \sim 0.05$
- Sprung von Warnung auf Akutwarnung wurde nicht bestimmt, da hier ein Messfehler vorliegt (siehe unten)

Es zeigt sich, dass der Sprung von einer Frühwarnung zu einer Warnung nicht den erforderlichen Mindestwert von 0.08 erreicht hat. Dieser Helligkeitsunterschied ist nach dem vorgesehenen Warnkonzept aber auch nicht unbedingt notwendig, da die Zunahme der Kritikalität ja auch über die Farbe und Zunahme der Breite des erleuchteten LED-Bereichs codiert ist und nicht nur über eine Zunahme der Helligkeit kommuniziert wird.

Auffallend an der Messung ist, dass die Akutwarnung, trotz der Anzeige über die gesamte Breite, eine geringer Beleuchtungsstärke aufweist. Dies ist mit den gewählten Farben und dem Aufbau der LED zu erklären: So zeigt die LED die jeweiligen Farben mit einer Kombination der Spektralfarben Rot, Grün und Blau an. Während zur Anzeige von Gelb und Orange beispielsweise sowohl rote, als auch grüne Anteile genutzt werden, wird bei Rot nur der rote Teil angezeigt. Des Weiteren weist das verwendete Messgerät bei solch monochromatischen LEDs signifikante Messfehler auf, weshalb so gewonnene Messwerte für den Fall der monochromatischen Messung nicht interpretiert werden sollten (ELK, o.D.).

Eine ähnliche Messung soll daneben auch für den verwendeten Warnton erfolgen, wobei hier nicht auf grundsätzliche psychophysikalische Reizschwellen zurückgegriffen werden muss, sondern bereits Schwellenwerte für den Einsatz von Warnungen im Fahrzeug angegeben sind.

Die Messung der Lautstärke ergab im Fahrzeug die folgenden Werte:

- Ohne Warnton: 45-47 dB
- Mit Warnton (Warnung, Akutwarnung): 70 dB

Der so gemessene Lautstärkeunterschied von ca. 25 dB liegt über dem Unterschiedswert von 15 dB nach Fricke (2009a) und kann somit als ausreichend laut erachtet werden.

4 Evaluation

Nach Konzeption, Entwicklung und Integration des Warnsystemprototyps soll nun in der Evaluation folgende Frage beantwortet werden:

Welche zukünftigen Gestaltungsempfehlungen lassen sich aus der Evaluation eines HMIs zur multimodalen proaktiven Fahrerwarnung zum Schutz schwächerer Verkehrsteilnehmer in einem Versuch mit Realfahrzeug ableiten?

Die Methode der Evaluation in Form eines Versuchs mit Realfahrzeug wird nachfolgend vorgestellt. Die Gestaltungsempfehlungen richten sich sowohl an die praktische Umsetzung des Warnkonzeptes als auch an aus der Evaluation ableitbare Optimierungsmöglichkeiten für das Warnsystem. Zur praktischen Umsetzung des Warnkonzeptes zählen verwendete Materialien, örtliche und zeitliche Positionierung der Warninformationen sowie die Integration des Warnkonzeptes in das Fahrzeug. Zur Bestimmung der Gestaltungsempfehlungen werden zum einen Ergebnisse aus der Evaluation genutzt. Zum anderen werden auch die praktischen Erkenntnisse der Arbeitsgruppe im Prozess der Prototypenentwicklung miteinbezogen. Diese sollen in Kapitel 5 vorgestellt werden. Die Optimierungsmöglichkeiten eröffnen den Rahmen für weitere Studien und Forschungsvorhaben. Hier sollen die Ergebnisse der Evaluation dazu verwendet werden, das entwickelte HMI-Warnkonzept zu verbessern und den Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen zu geben.

Es ist nicht das Ziel dieser Evaluation, eine vergleichende oder quantitative Schätzung des Werts des Warnsystems zu erreichen. Vielmehr liegt in diesem Prototypstatus der Fokus auf qualitative Inputs vonseiten der Versuchsfahrer. Auf Hypothesen wird daher ebenfalls verzichtet. Dokumente der Evaluation sind im Anhang A.2 gesammelt.

4.1 Methodik

4.1.1 Wahl der Untersuchungsmethode

Für die Auswahl einer geeigneten Untersuchungsmethode wird der „Code of Practice for Design and Evaluation of ADAS“ (RESPONSE 3, 2006) herangezogen. Der CoP stellt ein breites Methodenset für die Entwicklung und Evaluation von ADAS bereit, mit welchen insbesondere auch Sicherheitsanforderungen, Aspekte zur Beherrschbarkeit (Controllability) und Haftungsfragen geklärt werden sollen (RESPONSE 3, 2006). Dazu beinhaltet er eine ausführliche Wissens- und Diskussionsgrundlage sowie detaillierte Checklisten und Definition von Methoden, die über den gesamten Entwicklungsprozess angewendet werden können. Warnsysteme ohne Eingriff in die Fahrdynamik gehören per Definition nicht zur Gruppe der ADAS und fallen somit auch nicht in den generellen Anwendungsbereich des CoP. Die Me-

thoden und Checklisten können allerdings dennoch einen Mehrwert für die Entwicklung und Evaluation solcher „non advanced“ DAS bereitstellen (RESPONSE 3, 2006, S. 2).

4.1.2 Testung mit professionellen Fahrern

Für die Evaluation des in dieser Arbeit entwickelten Warnkonzepts und -prototypen stellt sich insbesondere das im CoP beschriebene Verfahren „Driving tests with professional test drivers“ als äußerst interessant heraus. Dabei werden die Testfahrer als eine Art „Goldstandard“ gesehen, mit deren qualitativem Feedback das Systemverhalten beurteilt wird (RESPONSE 3, 2006). Die Methode eignet sich insbesondere, da der Prototyp im Rahmen dieses Projektes in ein Realfahrzeug implementiert wird, um die in Echtzeit vom Umgebungserfassungssystem erhaltenen Informationen zu verwenden. Der Versuchsträger darf in seinem prototypischen Zustand nur von Fahrern mit „erweiterter“ Fahrerlaubnis bewegt werden, welche bei der Daimler AG als „F2“ klassifiziert wurde. Diese Fahrerlaubnis bestätigt die erfolgreiche Teilnahme an einem Erste-Hilfe Kurs, einem Fahrsicherheits-Training sowie einem Gruppen-Fahr-Training (S. Krebs, persönliche Kommunikation, 04. April, 2018).

Professionelle Fahrer gelten als geeignet, um tatsächliche sowie potentielle Schwachstellen und Unzulänglichkeiten eines Systems festzustellen und diese auch zu kommunizieren. Ebenfalls wird bei dieser Methode der Vorteil gesehen, dass eine Evaluation auch mit unvollständigen Prototypen durch den hohen Erfahrungsgrad der Testfahrer möglich ist (RESPONSE 3, 2006). Der in diesem Projekt entwickelte Prototyp ist ein unvollständiger Prototyp, da mindestens die Implementierung einer visuellen Warnkomponente im Kombiinstrument fehlt. Ein Nachteil dieser Methode ist natürlich die begrenzte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die intendierte Nutzergruppe, also der allgemeinen, fahrbefähigten Bevölkerung.

4.1.3 Der Versuchsträger

Das Realfahrzeug, in welches der Prototyp integriert wird, wird bereits in Kapitel 3.3 kurz beschrieben. Es handelt sich dabei um eine Mercedes Benz S 500 Limousine lang-version, V-222 von 2014. Seit 2015 gehört der Wagen zu den Forschungsfahrzeugen der Abteilung „Umgebungserfassung“. Im Rahmen des Einbaus des Umgebungserfassungssystems ist das Fahrzeug soweit verändert worden, dass neben einem normalen Führerschein zusätzlich die Fahrerlaubnis „F2“ notwendig ist.

4.1.4 Das Umgebungserfassungssystem

Das Umgebungserfassungssystem basiert auf den Daten eines Stereo-Kamera-Systems, welches mittig hinter der Windschutzscheibe angebracht ist und von dort aus einen Winkel von ca. 65° frontal vor dem Fahrzeug erfasst. An dem Versuchsträger befinden sich des Weiteren auch zwei Seitenkameras, die an den äußeren Seitenspiegeln des Fahrzeugs angebracht sind und für die Erfassung der seitlichen Szenerie gedacht sind. Diese waren jedoch im Rahmen der Entwicklung nicht verfügbar, wodurch die Erfassung seitlich auftretender VRUs (beispielsweise in Abbiegeszenarien) stark eingeschränkt war. Die erfassten Bildabschnitte werden im Versuchsträger an einen dort verbauten Computer gesendet, der mithilfe von

Bilderkennungsalgorithmen eine Klassifizierung der Szenerie durchführt. Diese Algorithmen basieren auf neuronalen Netzen, die spezifisch auf die Erkennung von VRUs im urbanen Kontext trainiert sind. Da das System mit Realdaten in der Fußgängererkennung trainiert wurde, ist die Erkennungsleistung bei realen Fußgängern am höchsten. Zwar sind alternative Versuchsansätze, z.B. mit Dummies, in Betracht gezogen worden, jedoch sind diese aus organisatorischen Gründen, aber vor allem aus Gründen der Maximierung der Erkennungsleistung ausgeschlossen worden.

4.1.5 Wahl der Szenarien

Um das Warnsystem in verschiedenen Situationen zu erproben, sollen in dem Versuch mehrere Szenarien getestet werden. Damit der Aufwand der Versuchsdurchführung dem zeitlichen Rahmen des IDPs gerecht wird, ist die Zahl der Szenarien auf vier beschränkt. Weitere Einschränkungen entstehen durch das im Versuchsträger implementierte Umgebungserfassungssystem, welches ausschließlich für Fußgänger ausgelegt ist. Zudem sind die Use Cases auf Ein-Personen-Szenarios beschränkt, um sowohl die Leistung des Umgebungserfassungssystems als auch die Eindeutigkeit der damit einhergehenden Warnanzeigen zu maximieren. Auch zum Zwecke der Standardisierung und der Gewährleistung der Sicherheit ist die Testung mit einer Person als Erkennungsobjekt – und somit im Gefahrenbereich – die beste Option.

Im Rahmen des PROSPECT-Projektes sind acht Szenarien für Auto-Fußgänger-Unfälle mit je einem Auto und einem Fußgänger identifiziert worden, welche die höchsten Unfallzahlen in Deutschland aufweisen. Ein weiteres Szenario beinhaltet lediglich die Kategorie: „Anderer“ (PROSPECT, 2016, 78 f.). Da ein Szenario aus einem rückwärtsfahrenden Auto besteht und das Umgebungserfassungssystem lediglich eine Frontkamera besitzt, fällt dieses aus der Auswahl aus. Zwei weitere Szenarios können aus Sicherheitsgründen nicht berücksichtigt werden, da hier der Fußgänger durch ein Hindernis verdeckt würde. Aus den übrigen fünf Szenarios und deren Varianten sind die vier Use Cases ausgewählt worden, die sich möglichst stark voneinander unterscheiden. So ist zudem das Szenario ausgeschlossen worden, welches sich von einem anderen Szenario lediglich in der Laufrichtung des Fußgängers unterscheidet. Die vier Szenarios sind in Abbildungen 16 und 17 zu sehen.

Um Reihenfolgeeffekte auszuschließen, fahren die verschiedenen Probanden die vier Szenarien in randomisierter Reihenfolge.

4.1.6 Datenerhebung

Da eine vergleichende Analyse – z.B. mit bestehenden Systemen – im Rahmen dieses Projektes nicht möglich ist, liegt der Fokus der Datenerhebung auf qualitativen Daten. Diese qualitativen Daten sollen mithilfe eines halbstandardisierten Interviews erhoben werden. Weiterhin werden die soziodemographischen Daten in einem Vorfragebogen abgefragt. Dieser Fragebogen wird vor Versuchsbeginn vorgelegt werden. Um zusätzlich zu den qualitativen Daten auch quantitative Bewertungen des Systems zu erhalten, wird es neben dem Vorfra-

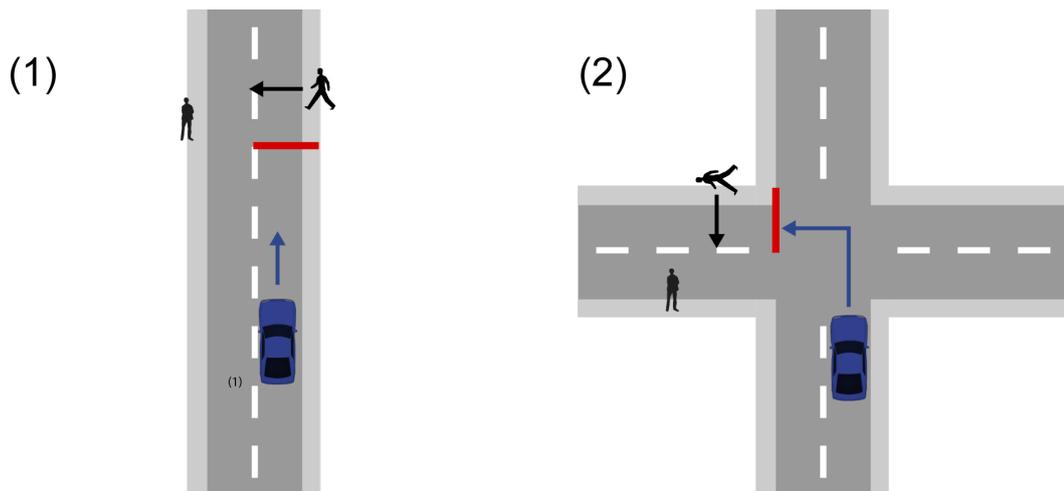


Abbildung 16 Darstellung der Szenarien 1 und 2

Szenario (1): Das Auto fährt gerade aus, der Fußgänger kreuzt die Straße von der rechten Seite kommend.

Szenario (2): Das Auto biegt links ab, der Fußgänger kreuzt die Straße, in die das Auto einbiegt. Der Fußgänger geht dabei in Richtung Startpunkt des Autos.

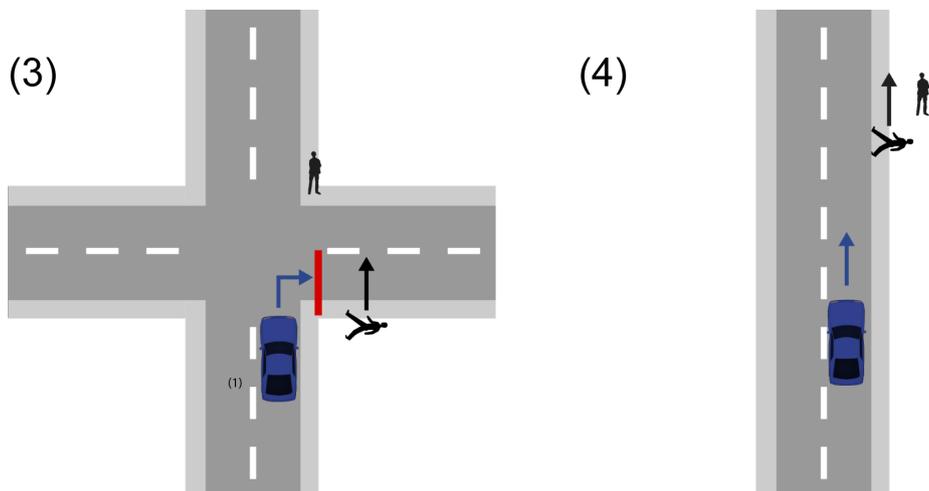


Abbildung 17 Darstellung der Szenarien 3 und 4

Szenario (3): Das Auto biegt rechts ab, der Fußgänger kreuzt die Straße, in die das Auto einbiegt. Der Fußgänger kommt dabei aus derselben Richtung wie das Auto.

Szenario (4): Sowohl Fußgänger als auch Auto bewegen sich auf der Straße in die gleiche Richtung. Das Auto passiert den Fußgänger.

gebogen zwei weitere Fragebögen geben, den Zwischen- und den Abschlussfragebogen. Der Zwischenfragebogen wird jeweils nach einem gefahrenen Szenario vorgelegt werden, insgesamt also vier Male. Der Abschlussfragebogen wird nach Versuchsende, aber noch vor dem Interview vorgelegt. Zusätzlich werden alle durch den Probanden geäußerten Kommentare sowie auffälligen Verhaltensweisen durch den Versuchsleiter notiert. Um Auffälligkeiten in den Ergebnissen auf Zusammenhänge mit den Fahrten zu prüfen, werden zudem während der Versuchsfahrten Videodaten des Umgebungserfassungssystems und des Fahrzeuginnenraums im Bereich der Windschutzscheibe aufgezeichnet.

Im Folgenden werden die Fragebögen kurz beschrieben. Alle Fragebögen sind im Anhang A.2 abgebildet.

Vorfragebogen

Der Vorfragebogen wird zu Anfang des Versuches vorgelegt. Er dient der Erfassung soziodemographischer Daten wie Alter oder Geschlecht. Ebenfalls werden potentielle Einflussfaktoren erhoben wie z.B. Seh- oder Hörschwächen, welche die Wahrnehmung der multimodalen Warnung beeinflussen könnten. Weiterhin werden Daten zur Fahrerfahrung, zur subjektiven Einschätzung des Fahrertyps (Assmann, 1985) sowie zur Erfahrung mit und das Vertrauen in Fahrerassistenzsysteme erhoben. Diese Daten dienen ebenfalls der Aufdeckung potentieller Einflussfaktoren oder extremer Probanden bzw. Probandengruppen. Auch mit Ausblick auf zukünftige Studien können diese Daten helfen, eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu beurteilen. Das Ausfüllen des Vorfragebogens dauert ca. fünf Minuten.

Bewertungskriterien

Um die Aufdeckung von Schwachstellen und Optimierungsmöglichkeiten zu erleichtern soll das Warnsystem in Hinblick auf sechs verschiedene Kriterien bewertet werden. Diese Kriterien werden im Zwischenfragebogen jeweils mit einem Item und im Abschlussfragebogen ausführlich erhoben. Es handelt sich um eine Bewertung folgender sechs Kriterien:

1. Akzeptanz und allgemeine Einstellung
2. Vertrauen
3. Nützlichkeit bzw. die Einschätzung zu Sicherheitsgewinn und Ablenkung
4. Usability und Verständlichkeit
5. Gestaltung
6. Angemessenheit in den jeweiligen Situationen

Auf diese Weise sollen alle wichtigen Aspekte des Warnsystems in diesem Prototypenstatus abgedeckt werden und eine grobe Einschätzung durch deskriptive Ergebnisse ermöglicht werden. Die jeweils genaue Erhebungsmethode soll in den nächsten beiden Abschnitten erläutert werden.

Zwischenfragebogen

Jedes der vier Szenarien wird zweimal von jedem Probanden gefahren. Jeweils nach der zweiten Fahrt wird dem Probanden der Zwischenfragebogen zur Beantwortung gereicht. Der Zwischenfragebogen bezieht sich immer auf das jeweils gerade gefahrene Szenario, wird also insgesamt viermal pro Proband beantwortet. Dies soll einen späteren Vergleich der Bewertungen für die jeweiligen Szenarien ermöglichen. Der Zwischenfragebogen besteht aus sechs Fragen, welche sich jeweils auf eines der oben genannten Kriterien beziehen. Die Antworten können auf einer sechsstufigen Skala angegeben werden, wobei auf der rechten Seite

stets die angestrebte Bewertung positioniert ist. Die sechsstufige Skala ist gewählt worden, um Antworttendenzen aufgrund des Fehlens einer Mitte zu erzielen. Die Probanden werden zusätzlich ermuntert, Kommentare und Gedanken zu den Szenarien, dem Warnsystem oder den Fragen zu kommunizieren. Die Beantwortung des Zwischenfragebogens dauert ca. zwei Minuten.

Abschlussfragebogen

Der Abschlussfragebogen dient dazu, einige Kriterien detaillierter zu evaluieren. Ein Rückschluss auf einzelne Szenarien ist dabei im Gegensatz zum Zwischenfragebogen nicht mehr möglich. Die Kriterien Vertrauen sowie Gestaltung werden mit denselben Fragen wie im Zwischenfragebogen erhoben. Diese Fragen sind frei zusammengestellt.

Auch die Erfassung der Angemessenheit in den jeweiligen Situationen beruht auf frei zusammengestellten Items. Im Gegensatz zum Zwischenfragebogen wird dieses Kriterium im Abschlussfragebogen differenzierter erhoben und erfordert eine Bewertung der Angemessenheit mit Blick auf den Zeitpunkt, den Informationsgehalt sowie auf die Kritikalität der Warnung in der jeweiligen Situation. Im Gegensatz zum Zwischenfragebogen entspricht die Mitte der angestrebten Bewertung des Systems, während die Pole mit jeweils gegenteiligen, negativen Bewertungen beschriftet sind. Auch hier wird eine Antworttendenz des Probanden durch eine gerade Anzahl an Antwortmöglichkeiten erzielt.

Die Akzeptanz bzw. auch die allgemeine Einstellung zum System wird durch die Akzeptanzskala von Van Der Laan, Heino und De Waard (1997) erhoben. Die Skala besteht aus neun Items, die auf einer fünfstufigen Likert-Skala beantwortet werden können. Die Pole sind jeweils mit gegenteiligen Bewertungen beschriftet, wobei die angestrebten Bewertungen teilweise auf der linken und teilweise auf der rechten Seite stehen. Fünf Items (1, 3, 5, 7, 9) der Skala bilden die Subskala „Usefulness“ und die vier anderen Items bilden die Subskala „Satisfying“. Der Fragebogen wird in der von Michael Kondzior der Universität Stuttgart übersetzten deutschen Version dargeboten (Kondzior, 2018).

Zur Erfassung der Usability und Verständlichkeit des Systems sind sechs Items in Anlehnung an die deutsche Version der System Usability Scale (SUS) (Brooke, 1996) zusammengestellt worden. Diese Modifizierung und Kürzung dient der zielgerichteten Bewertung des Warnsystems, bei dem in der Benutzung kein Schwerpunkt auf die Interaktion, sondern auch auf der Verständlichkeit der Warnungen liegt. Wie im SUS ist die Antwortskala fünfstufig.

Für die Erfassung der Nützlichkeit und der Einschätzung des Sicherheitsgewinns gegenüber der Ablenkung durch das System werden zwei Fragebögen genutzt. Der Sicherheitsgewinn wird auf einer fünfstufigen Skala aus fünf Items erhoben. Diese Items sind durch das Projektteam aus Items zweier Fragebögen zum Sicherheitsgewinn zusammengestellt und angepasst worden (Petermann-Stock & Werneke, 2014; Arndt, 2011).

Der Workload wird mithilfe des Fragebogens Driving Activity Load Index (DALI) (Pauzie, 2008) erfasst, welcher auf dem NASA-TLX basiert (Hart & Lowell, 1988). Dieser wird in seiner validierten Version in englischer Sprache vorgelegt. Ein entsprechender Hinweis auf dem Fragebogen weist den Probanden darauf hin und fordert den Probanden auf, Fragen zum Vokabular an den Versuchsleiter zu richten. Die Aufforderung erfolgt auch mündlich durch den Versuchsleiter bei Aushändigung des Abschlussfragebogens. Sechs Items erheben je eine Facette des Workloads, wie z.B. des visuellen oder zeitlichen Workloads auf einer sechsstufigen Antwortskala von „low“ (niedrig) zu „high“ (hoch). Diese sechs Faktoren wurden aus einer Auswahl von sieben Faktoren zum Zwecke der Passung an das Warnsystem ausgewählt. Bereits zu Anfang des Kapitels wird beschrieben, dass keine Kontroll- oder andere Vergleichsgruppe vorliegt. Daher können auch die Ergebnisse des DALI nur als Tendenz und für Vergleiche einzelner Faktoren genutzt werden.

Für eine übersichtliche Gestaltung des Abschlussfragebogens sind die Items zu den Kriterien so angeordnet, dass zunächst die Items mit fünfstufiger Skala und daran anschließend die Items mit sechsstufiger Skala abgefragt werden. Die Beantwortung des Zwischenfragebogens dauert ca. zehn Minuten.

Interview

Der Versuch wird abgeschlossen mit einem halbstandardisierten Interview. Dieses hat eine Dauer von ca. 10-15 Minuten. Die vorbereiteten Fragen sind in folgende sieben Blöcke eingeteilt:

1. Beschreibung der Warnung
2. Abstufungen in der Warnung und deren Bedeutung sowie Angemessenheit der Dringlichkeit
3. Bewertung der visuellen Warnkomponente
4. Bewertung der akustischen Warnkomponente
5. Bewertung der Warnung als Kombination akustischer und visueller Warnkomponente
6. Nutzungsbereitschaft
7. Weitere Kommentare und offene Fragen

Im ersten Fragenblock wird der Proband aufgefordert, die Warnung kurz zu beschreiben, wobei dieser gegebenenfalls aufgefordert wird, die Modalitäten zu nennen. Darauf folgt der Fragenblock über die Abstufungen, in dem zunächst die Anzahl der Abstufungen und deren Natur abgefragt werden. Weiterhin wird der Proband aufgefordert zu wiederzugeben, was diese Abstufungen kommunizieren würden und als wie dringlich die verschiedenen Stufen wahrgenommen wurden. Der dritte Fragenblock behandelt die Bewertung der visuellen Warnkomponente, hier wird gesondert nach positiven und negativen Bewertungen, aber auch nach

Verbesserungsvorschlägen gefragt. Die Unterfragen für positive und negative Bewertungen sowie für Verbesserungsvorschläge werden im vierten und fünften Fragenblock für die akustische und anschließend für die Kombination aus visueller und akustischer Warnkomponente wiederholt. Der sechste Fragenblock fragt die Nutzungsbereitschaft des Warnsystems sowie die Gründe dafür ab. Zuletzt werden die Probanden aufgefordert, Kommentare und Gedanken zu äußern, die sie in Bezug auf das Warnsystem oder den Versuch gehabt hätten, welche bisher jedoch noch nicht abgefragt worden seien.

Das Interview dient dazu, qualitative Daten zur Bewertung des Warnsystems zu erhalten. Da die Stichprobe aus Daimlermitarbeitern mit spezieller Fahrerlaubnis akquiriert wird, ist zu erwarten, dass die Stichprobe aus professionellen oder mindestens erfahrenen Fahrern besteht. Deren Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge sind für die Weiterentwicklung des Warnsystems von hoher Wichtigkeit und sollten daher in Ausführlichkeit erfasst werden. Da das Interview halbstandardisiert ist, werden von allen Probanden Aussagen und Meinungen zu den oben genannten Fragenblöcken erfasst. Zusätzlich können aber freie Unter- und Zusatzfragen dazu dienen, detailliertere Informationen zu erhalten und Unklarheiten aufzulösen.

4.2 Vorbereitungen

4.2.1 Sicherheitsanforderungen

Für die Durchführung des Versuches mit dem Realfahrzeug gelten strenge Sicherheitsanforderungen. Sicherheit für die Testfahrer, Statisten sowie weitere Personen/Passanten haben bei der Durchführung höchste Priorität. Aus diesem Grund sind Sicherheitsrichtlinien angefertigt worden, welche im Folgenden vorgestellt werden. Der Testfahrer wird dabei als Fahrer bezeichnet, während der Versuchsleiter, als Co-Fahrer auf dem Beifahrersitz die Versuche begleitet. Der Fußgänger wird im Folgenden als Statist bezeichnet. Die Aufsichtsperson auf dem Gelände heißt im Folgenden Co-Statist.

- Es werden ausschließlich geplante Szenarien getestet, über die sowohl die (Co-)Statisten als auch die (Co-)Fahrer und Versuchsdurchführenden vollständig informiert sind, um deren Sicherheit zu gewährleisten.
- Unter Einhaltung der Sicherheitsrichtlinien werden die Szenarien so durchgeführt, dass die Statisten bzw. deren Bewegungspfade in Reichweite der Sensoren sind.
- Die Testroute liegt auf dem Gelände des Forschungszentrums der Daimler AG in Ulm und ist so gewählt, dass der Statist mehrere Szenarien durchführen kann. Zwischen den Szenarien werden die Fahrer über das direkt nachfolgende Szenario instruiert während der Statist eine dafür definierte Startposition einnimmt.
- Zeitabläufe, Geschwindigkeiten und Abstände werden für alle Szenarien so konservativ gewählt, dass Fehler vonseiten des Fahrers oder des Statisten noch toleriert werden können. Falls beispielsweise ein Statist statt anzuhalten die Straße überquert, kann eine

Kollision durch das Abbremsen des Fahrers vermieden werden. Die Reaktionszeiten des Fahrers haben durch die eingehaltenen Mindestabstände und Maximalgeschwindigkeiten dafür ausreichend große Sicherheitspuffer.

- Um weitere Instruktionen zu geben, werden die Versuche durch zwei entsprechend vorbereitete Personen – den Co-Fahrer und den Co-Statisten – begleitet. Der Co-Fahrer befindet sich während des Versuchs auf dem Beifahrersitz, der Co-Statist in Sicht- und Hörweite des Statisten. Diese Personen stehen in dauerhafter Funkverbindung zueinander. Die Versuche finden in einem abgesperrten Bereich auf dem Forschungsgelände in Ulm statt.
- Während der Mittagszeit, zu der ein erhöhtes Fußgängeraufkommen erwartet wird, finden keine Testungen statt. Die Geschwindigkeit des Testautos wird auf eine Maximalgeschwindigkeit von 30 km/h limitiert.
- Falls die Sicherheit für den Fahrer oder den Statisten es verlangt, können die vordefinierten Szenarioparameter (Zeitabläufe, Geschwindigkeiten, Abstände) variiert werden.
- Vor der Testung jedes Szenarios werden die Fahrer durch den Co-Fahrer vollständig über den genauen Ablauf und die Bewegungspfade des eigenen Autos sowie des Statisten informiert. Dem Fahrer wird daraufhin eine genaue Handlungsabfolge vorgegeben. Der Statist wird durch den Co-Statisten ebenfalls vor jedem Szenario genau instruiert. Sowohl Fahrer als auch Statist müssten das Szenario bestätigen, bevor Co-Fahrer und Co-Statist die Testfahrt starten lassen.
- Es werden ausschließlich erfahrene Fahrer mit speziellem Führerschein (F2) herangezogen. Diese werden instruiert, sich während der Versuche ausschließlich auf das Fahren zu konzentrieren (keine Bedienung der Navigation, des Telefons etc.). Der Co-Fahrer stellt sicher, dass der Fahrer den Instruktionen folgt.

4.2.2 Wahl und Präparierung des Testgeländes

Wie bereits aus den Sicherheitsrichtlinien hervorgeht, liegt die Testroute für die Szenarien auf dem Daimler-Forschungsgelände. Die Wege gehören zu den weniger frequentierten Wegen auf dem Gelände, bei denen zudem die Frontkameras während der Testfahrten keiner direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, um die Erkennungsleistung zu erhöhen. Die Auswahl der Teststrecken wird mithilfe von Vorversuchen optimiert.

Die Versuchsstrecke wird mit Pylonen abgesperrt, zudem ordert der Co-Statist eine Unterbrechung an, sobald sich externe Personen im Testgelände befinden. Damit der Co-Statist in unmittelbarer Nähe zu Versuchsträger und Statist sein kann ohne dabei vom Umgebungserfassungssystem erkannt zu werden, ist dieser durch eine bauchhohe Spanplatte verdeckt. Diese Platte kann mobil bewegt werden und ist auf Abbildung 18 zu sehen.

Um die Sicherheitsabstände einhalten zu können, werden mit Pylonen Start- und Haltelinien für den Fußgänger sowie für den Versuchsträger markiert. Da die Pylonen zwischen den Szenarien und Versuchen teilweise und über Nacht ganz vom Testgelände entfernt werden

müssen, sind diese Linien zusätzlich mit Straßenkreide auf dem Gelände gekennzeichnet. Diese Maßnahme gilt zudem dem Zwecke der Standardisierung zwischen den Versuchen. Abbildung 18 zeigt beispielhaft eine solche Szenariomarkierung.



Abbildung 18 Foto eines Versuchsaufbaus. Zu sehen sind Kreidemarkierungen und Pylonen zur Markierung der Halte- und Lauflinien. Rechts im Bild ist die Spanplatte zu erkennen, hinter der der Co-Statist aufgestellt ist.

Zu der organisatorischen Vorbereitung gehört des Weiteren die Bereitstellung von Tischen und Stühlen in der geheizten Fahrzeuggarage für die Vor- und Nachbefragung. Walkie Talkies, Versuchsdokumente sowie Verpflegung werden ebenfalls zu Tagesbeginn vorbereitet.

Weitere Bilder der Versuchsaufbauten sind im digitalen Anhang auf der beigefügten Daten-CD zu finden.

4.2.3 Rekrutierung

Die Probanden werden persönlich auf dem Forschungsgelände durch das Projektteam rekrutiert. Voraussetzung für die Teilnahme am Versuch ist der Besitz einer Fahrerlaubnis 2. Für die Teilnahme an dem rund 70-minütigen Versuch werden die Probanden mit Süßigkeiten und Kuchen entschädigt, die Tests finden während der Arbeitszeit statt.

4.3 Durchführung

Die Versuche finden am 14. und 15. Februar 2018 auf dem Forschungsgelände der Daimler AG in Ulm statt. Zu Tagesbeginn werden Versuchsfahrzeug und Teststrecke wie oben beschrieben für die Testfahrten präpariert. Insgesamt werden zwölf Versuche mit einer Dauer von jeweils ca. 70 Minuten durchgeführt. Da während der Mittagszeit ein höheres "Verkehrsaufkommen" auf dem Gelände erwartet wird, finden zwischen 11:15 Uhr und 13:30 Uhr keine Testfahrten statt. Die Startzeiten für die Versuche liegen zwischen 09:00 Uhr morgens und 16:30 Uhr am Nachmittag, sodass alle Testfahrten bei Tageslicht absolviert werden können.

Der Proband wird an einem Treffpunkt in einem der Gebäude abgeholt und zur Garage mit dem Versuchsträger begleitet. Im Anschluss an die Begrüßung des Probanden werden diesem die Versuchsinstruktion sowie der Vorfragebogen vorgelegt. Nach Klärung eventueller Rückfragen wird der Proband zum Versuchsträger geführt und in diesen eingewiesen. Nach einer zusätzlichen Sicherheitsunterweisung unterzeichnet der Proband die Einwilligungserklärung, welche auch die Aufzeichnung und Speicherung von Kamera- und Fragebogendaten als Gegenstand führt. Im Stand wird vor Versuchsfahrt die Warnung demonstriert. Dabei läuft ein Statist auf das Auto zu, welches den Probanden auf dem Fahrersitz warnt. Der Proband wird darauf hingewiesen, dass das System nur aus Demonstrationszwecken auch im Stand Warnungen ausgibt. Anschließend fährt der Proband zur Teststrecke. Vor jedem Szenario wird der Proband durch den Co-Fahrer genau über den Ablauf des Szenarios informiert, sodass er den Bewegungsverlauf des Statisten und die Rolle des Co-Statisten kennt. Außerdem wird der Proband angewiesen, bei Freigabe durch den Co-Statisten mit einer Geschwindigkeit von 15 km/h bis 20 km/h zu fahren und vor Haltelinien abrupt zum Stehen zu kommen. Vor jeder Fahrt wird der Proband ausdrücklich darauf hingewiesen, dass der Sicherheit aller Beteiligten die höchste Priorität zugeordnet wird und dass der Proband so fahren soll, dass er sich wohl fühlt.

Es folgen die vier oben vorgestellten Szenarien, die in randomisierter Reihenfolge gefahren werden. Jedes der vier Szenarien wird zwei Male gefahren. Die Videoaufnahmen werden vor jeder Fahrt gestartet und danach beendet. Wenn ein Szenario zwei Male gefahren wurde, wird dem Probanden der Zwischenfragebogen zur Beantwortung ausgehändigt. Statist und Co-Statist nutzen die Zeit, um das Folgeszenario vorzubereiten. Der Versuchsleiter notiert während des gesamten Versuches Beobachtungen und Kommentare des Probanden.

Nach Beendigung der Versuchsfahrten fährt der Proband den Versuchsträger zurück zur Garage. Dort folgen der Abschlussfragebogen und das Interview. Daraufhin werden offene Fragen geklärt und der Proband mit einer Aufwandsentschädigung in Form von Süßigkeiten verabschiedet. Im Anhang Anhang A.2 ist ein detaillierter Ablauf des Versuches abgebildet.

4.4 Ergebnisse

Vorab ist zu erinnern, dass die Evaluation keinerlei Kontroll- oder Vergleichsgruppe beinhaltet. Somit erfolgt die Auswertung vor allem deskriptiv. Bei dem aktuellen Prototypstatus können die Ergebnisse genutzt werden, um mithilfe von Tendenzen in den Antworten Besonderheiten, Schwachstellen sowie Optimierungsmöglichkeiten aufzudecken.

4.4.1 Vorfragebogen

Die teilnehmenden Probanden sind zwischen 24 und 50 Jahren alt ($M = 32,42$; $SD = 8,08$). Durch den hohen Männeranteil der Belegschaft ist die Geschlechterverteilung mit elf Männern und einer Frau sehr ungleich verteilt. Die Körpergröße der Probanden variiert zwischen 165cm und 199 cm ($M = 183,67$; $SD = 10,45$). Acht der Probanden geben an, keine Sehschwäche zu haben und drei weitere geben an, ihre Sehschwäche mit einer Sehhilfe zu korrigieren. Lediglich ein Proband macht die Aussage, trotz Sehschwäche keine Sehhilfe zu nutzen. Keiner der Probanden gibt an, unter einer Hörschwäche zu leiden.

Im Durchschnitt sind die Probanden seit 14,33 Jahren ($SD = 8,35$) im Besitz einer Fahrerlaubnis, mindestens jedoch seit 2 Jahren und maximal seit 32 Jahren. Die geschätzte Fahrleistung liegt im letzten Jahr bei 14.041,67 km durchschnittlich ($SD = 8.619,37$) mit einem Minimum von 2.000,00 km. Neun Probanden (1, 4-11) geben an, im letzten Jahr zwischen 10.000,00 km und 30.000,00 km gefahren zu sein. Die angegebene Gesamtfahrleistung betrug im Durchschnitt 171.818,18 km ($SD = 135.982,95$) mit einem Minimum von 5.000,00 km. Neun Probanden (1, 4-11) weisen eine Gesamtfahrleistung von 100.000,00 km oder mehr auf. Ein Proband (2) gibt ab dieser Frage keine Antworten im Fragebogen an, möglicherweise wegen Übersehens der Rückseite. Die (praktische) Erfahrung (privat und beruflich) mit Fahrerassistenzsystemen wie ACC, Notbremsassistent oder Einparkassistent stufen die Probanden mit einem Durchschnitt von 4,64 ($SD = 1,21$; Skala: 1=„überhaupt keine“ – 6=„sehr viel“) eher als hoch ein. Lediglich zwei Probanden geben eine 2 (4) bzw. 3 (12) als Antwort. Auch das Vertrauen in Fahrerassistenzsysteme – auf Basis privater und beruflicher Erfahrungen – wird mit einem Mittelwert von 4,45 ($SD = 0,93$; Skala: 1=„überhaupt nicht“ – 6=„völlig“) hoch eingeschätzt. Erneut gibt es lediglich zwei Probanden (3, 12), die jeweils eine 3 als Antwort geben. Die subjektive Einschätzung des eigenen Fahrertyps geschieht auf neun Items auf einer sechsstufigen Skala, wobei 1 einen eher offensiven und sicheren Fahrstil beschreibt, während 6 einen defensiven und unsicheren Fahrertyp beschreibt. Da die Items unterschiedliche Inhalte widerspiegeln und keine Subskalen gebildet werden, gibt es keine zusammenfassende Betrachtung der Einschätzungen. Es wird lediglich auf Auffälligkeiten einzelner Items oder Probanden bzw. Probandengruppen eingegangen werden. Es zeigt sich, dass die Probanden sich generell als eher sichere Fahrer einstufen (Item 1 - Einschätzung Erfahrung: $M = 2,58$, $SD = 1,00$; Item 4 - Einschätzung Kontrolle über das Fahrzeug $M = 2,33$, $SD = 0,78$; Item 5 – Sicherheit im Umgang mit fremdem Fahrzeug $M = 2,17$, $SD = 0,83$; Item 6 – Interesse an Technik: $M = 2,08$, $SD = 1,44$). Bei allen Items ist die Standardabweichung mit einem Maximum von 1,65 (Item 7 - Bedeutung Autofahren: $M = 3,00$)

eher niedrig. Die deskriptive Betrachtung einzelner Items und Probanden zeigt keine Auffälligkeiten einzelner Probanden oder -gruppen. Weitere Ergebnisse einzelner Items sind dem Anhang A.3 zu entnehmen.

Lediglich Proband 12 weicht von den anderen Probanden ab, indem dieser die Minimalwerte der Stichprobe mit teilweise deutlichem Abstand ankreuzt in den Fragen: Dauer des Besitzes einer Fahrerlaubnis (2 Jahre), Jahresfahrleistung (2000 km), Gesamtfahrleistung (5000 km), Erfahrung mit Fahrerassistenzsystemen (3, wobei Proband 4 sogar nur eine 2 ankreuzt) und Vertrauen in Fahrerassistenzsysteme (3, wobei auch Proband 3 eine 3 ankreuzt). Auf ein eventuelles Abweichen der Antworten dieses Probanden soll im Folgenden geachtet und gegebenenfalls angesprochen werden.

Da das Warnsystem auf eine Körpergröße von 180 cm eingestellt ist, ist insbesondere bei den deutlich kleineren Probanden (6: 168cm; 7: 165cm) und den deutlich größeren Probanden (4:198cm; 9: 199cm) auf Kommentare bezüglich der Sichtbarkeit der visuellen Warnkomponente zu achten. Proband 4 gibt zudem ebenfalls eine Sehschwäche ohne entsprechende Korrektur an.

4.4.2 Zwischenfragebogen

Jeweils nach dem zweiten Durchgang eines Szenarios wird dem Probanden ein Klemmbrett mit dem Zwischenfragebogen übergeben. Abgefragt werden die in der Methodik (Kapitel 4.1) beschriebenen sechs Bewertungskriterien auf einer Skala von 1 bis 6, wobei 6 einer hohen Zustimmung entspricht. Bei der Auswertung sollen auch mögliche Einflussfaktoren wie Witterungsbedingungen, also Sichtverhältnisse, Tageszeiten der Versuche sowie die Güte der Warnung in der jeweiligen Situation in Betracht gezogen werden.

Über alle Szenarien und alle Probanden hinweg erreichen die sechs Kriterien Bewertungen zwischen 3,09 ($SD = 1,40$) im Vertrauen und 4,72 ($SD = 1,33$) in der Verständlichkeit. Graphisch sind die Ergebnisse in Abbildung 19 dargestellt. Vier der sechs Kriterien werden im Mittel zwischen 3 und 4 bewertet, was damit deutlich einer mittleren („weder noch“) Bewertung entspricht. Dabei schneidet die Nützlichkeit mit 3,36 ($SD = 1,61$) am zweitschlechtesten ab. Die Einstellung wird mit 4,06 ($SD = 1,52$) durchschnittlich am zweitbesten bewertet, gefolgt von der Gestaltung ($M = 3,96$, $SD = 1,06$) und der Angemessenheit des Systems ($M = 3,68$, $SD = 1,56$).

Um auszuschließen, dass einzelne Probanden ausschließlich gute und andere Probanden ausschließlich schlechte Bewertungen abgeben, werden die Bewertungen über alle Szenarien und Kriterien für jeden Probanden gemittelt. Diese mittleren Bewertungen pro Proband variieren lediglich zwischen 3,08 ($SD = 0,8$; Proband 5) und 4,75 ($SD = 0,82$; Proband 11). Auffälligkeiten bezüglich einzelner Probanden oder Probandengruppen können nicht festgestellt werden. Weitere Werte sind im Anhang A.3 aufgeführt.

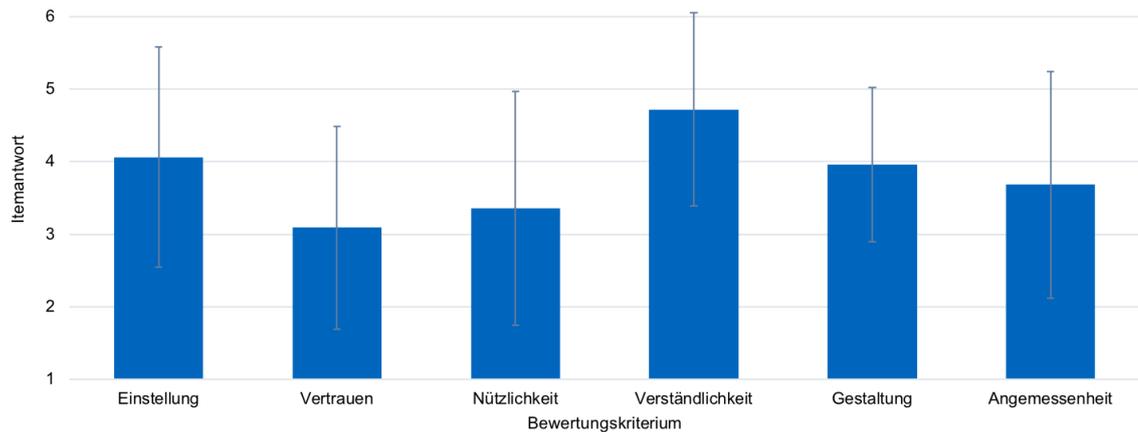


Abbildung 19 Dargestellt sind die Ergebnisse des Zwischenfragebogens über alle Szenarien und alle Probanden hinweg. Aufgetragen sind die Mittelwerte der Stichprobe auf einer Skala von 1-6; Fehlerbalken visualisieren +/- 1 Standardabweichung; n=12.

Am ersten Tag der Messung und damit bei den ersten sechs Probanden (1-6) ist das Wetter sonnig. Am zweiten Tag hat ein Proband (8) bedeckte, aber trockene Witterungsbedingungen, während die anderen fünf Probanden bei leichtem Regen (7, 11, 12) oder leichtem Schneefall (9, 10) die Versuche fahren. Doch die Witterungsbedingungen üben keinen deutlich erkennbaren Einfluss auf die Bewertungen aus, denn die Probanden mit sonnigen Witterungsverhältnissen (1-6) bewerteten die Kriterien im Mittel mit einer 3,67 ($SD = 1,01$) und die weiteren sechs Probanden mit bedecktem Himmel oder leichtem Regen bzw. Schneefall geben im Mittel eine Bewertung von 3,99 ($SD = 0,95$) ab. Die Startzeiten der Versuche liegen zwischen 09:00 Uhr und 16:30 Uhr. Aufgrund der Jahreszeit ist daher mit einer Blendung durch eine schrägstehende Sonne am Morgen oder Abend zu rechnen. Jedoch zeigt auch eine Prüfung des Einflusses der Tageszeiten keine Unterschiede in der Bewertung.

Die Probanden werden gebeten nach jedem Szenario die sechs Kriterien zu bewerten. Das System funktioniert aufgrund fehlender Einbindung der Seitenkamera bei den zwei Abbiegeszenarien (2) und (3) nicht so gut wie bei den Szenarien (1) und (4), bei denen der Fußgänger die Fahrbahn kreuzt bzw. der Fußgänger seitlich vom Wagen passiert wird. Die Notizen des Versuchsleiters zeigen, dass bei den insgesamt 24 Malen, die jedes einzelne Szenario gefahren wird, bei den Szenarien (2) und (3) das System 17 bzw. 20 Male keine oder lediglich eine späte Warnung zeigt. Bei den Szenarien (1) und (4) gibt es diese Systemausfälle und -verzögerungen nur je 3 Male. Ein Zusammenhang der Systemausfälle mit äußeren Faktoren wie z.B. der Witterung kann nicht festgestellt werden. Diese Probleme der Zuverlässigkeit des Warnsystems führen zu Kommentaren seitens der Versuchsprobanden wie „weißst du, warum es nicht geklingelt hat? [...] Habe im Zwischenfragebogen angegeben, es sei unverständlich, da es nicht reagiert hatte“ (Proband 6; Szenario (2)), „noch viel schlechter, viel zu spät, sinnlose Warnung“ (Proband 3; Szenario (3)) oder „Einstellung zum System?! Hat ja nicht funktioniert!“ (Proband 5; Szenario (3)).

Die Auswertung der einzelnen Szenarien spiegelt genau diese Unterschiede in der Leistung des Warnsystems wider. So kann bei allen sechs Bewertungskriterien festgestellt werden, dass Szenario (1) und (4) besser bewertet werden als Szenarien (2) und (3). Wertetabellen auch für einzelne Szenarien sind im Anhang enthalten (Anhang A.3). Die folgende Abbildung 20 zeigt jeweils zusammengefasst die Szenarien (1) und (4) sowie (2) und (3).

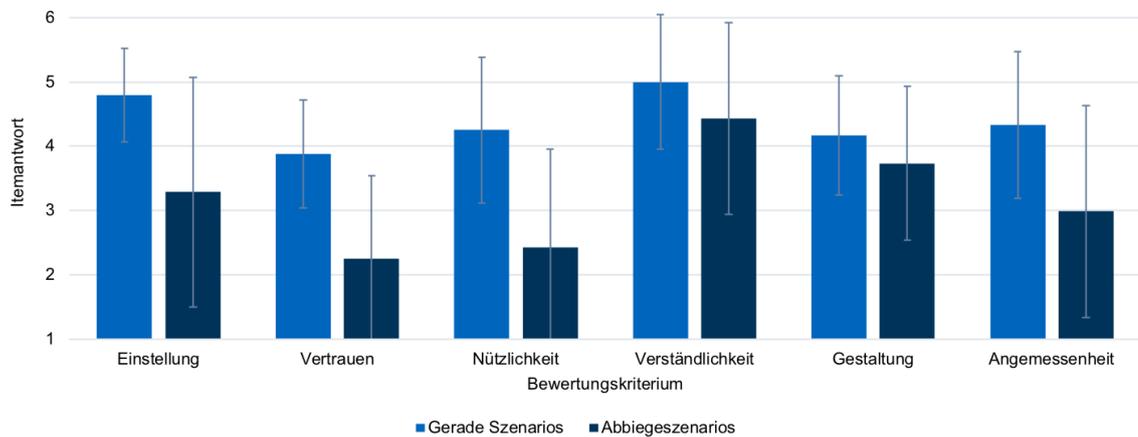


Abbildung 20 Dargestellt sind die Ergebnisse des Zwischenfragebogens über alle Probanden hinweg zusammengefasst für die Gerade- und die Abbiegeszenarios. Aufgetragen sind die Mittelwerte der Stichprobe auf einer Skala von 1-6; Fehlerbalken visualisieren +/- 1 Standardabweichung; n=12.

Bei einer Trennung der Auswertung der Szenarien in Abbiege- und geradeausfahrenden Szenarien steigt die Bewertung der Szenarien (1) und (4) auf Werte zwischen 3,88 ($SD = 0,84$) im Vertrauen und 5,00 ($SD = 1,05$) in der Verständlichkeit. Die Bewertung der Szenarien (2) und (3) sinkt auf Werte zwischen 2,25 ($SD = 1,29$) im Vertrauen und 4,43 ($SD = 1,43$) in der Verständlichkeit mit einer leicht höheren Standardabweichung. Diese Ergebnisse zeigen schlechtere Bewertungen für die Abbiegeszenarios in allen sechs Kriterien Einstellung, Vertrauen, Nützlichkeit, Verständlichkeit, Gestaltung und Angemessenheit des Systems. Sowohl in den Abbiege- als auch in den geradeausfahrenden Szenarien wird die Verständlichkeit am höchsten bewertet, während das Vertrauen in das System jeweils die schlechteste Bewertung erfährt. Die größten Unterschiede können im Kriterium Nützlichkeit (Differenz Mittelwerte = 1,83) und im Vertrauen (Differenz Mittelwerte = 1,63) festgestellt werden. Die Bewertung der Gestaltung (Differenz Mittelwerte = 0,44) und der Verständlichkeit (Differenz Mittelwerte = 0,58) des Systems weisen vergleichsweise kleine Unterschiede auf.

Die Zwischenfragebögen geben erste Hinweise auf die Bewertungen im Abschlussfragebogen. Zudem ermöglichen diese eine Differenzierung zwischen den einzelnen Szenarien, welche sich als sehr wichtig für die Interpretation der Ergebnisse erweist. Unterschiede, welche durch die Witterungsverhältnisse entstehen, können nicht festgestellt werden.

4.4.3 Abschlussfragebogen

Im Abschlussfragebogen werden analog zu den Zwischenfragebögen die sechs Bewertungskriterien (beschrieben in Kapitel 4.1) abgefragt. Wie dort beschrieben, werden diese sechs Kriterien im Vergleich zu den Zwischenfragebögen differenzierter und ausführlicher erhoben.

Die Ergebnisse werden über alle Probanden hinweg vorgestellt. Sollten in der Analyse einzelne Probanden durch ihre Antworten auffallen, wird dies entsprechend gekennzeichnet. Die in den Abbildungen 21 bis 27 angegebenen Zielwerte sollen lediglich als Orientierungshilfe aufgrund der verschiedenen Fragebogen- und Skalenformate dienen. Diese geben jeweils die Richtung an, die im Sinne einer positiven Bewertung angestrebt wird.

Akzeptanz und allgemeine Einstellung

Die allgemeine Einstellung gegenüber dem Warnsystem wird mithilfe der Akzeptanzskala zur Erfassung der Akzeptanz eines Systems (Van Der Laan et al., 1997) erfasst. Die Skala besteht aus den zwei Subskalen zur „Usefulness Scale“ und „Satisfying Scale“. Die Werte werden zwischen -2 und +2 angegeben, wobei +2 einer positiven Einstellung gegenüber dem System entspricht. Insgesamt wird im Mittel ein Akzeptanz-Gesamtwert von 0,85 ($SD = 0,93$) angegeben, der damit auf eine eher positive Einstellung zum System hindeutet. Bei der Betrachtung der Subskalen ergeben sich ein Mittelwert von 0,72 ($SD = 1,01$) für die Usefulness Scale und ein Mittelwert von 1,02 ($SD = 0,79$) für die Satisfying Scale. Während von den Probanden der komplette Bereich zwischen -2 und +2 bei der Angabe der Nützlichkeit genutzt wird, variieren die Werte der Satisfying Scale nur zwischen -1 und +2. Der Mittelwert ist bei dieser Subskala etwas höher und weist eine niedrigere Standardabweichung auf.

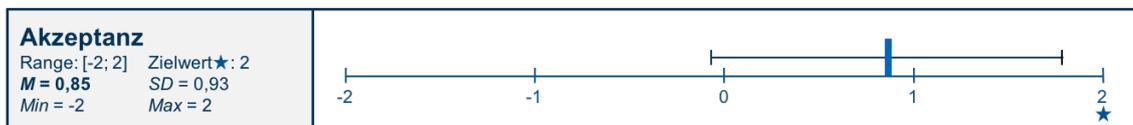


Abbildung 21 Dargestellt sind die aggregierten Ergebnisse des Abschlussfragebogens zur Akzeptanz nach Van Der Laan, Heino und De Waard (1997) über alle Probanden hinweg. Links sind Minimum, Maximum sowie Mittelwert und Standardabweichung angegeben. Die Angabe des Zielwerts gilt als Orientierungshilfe - wie auch die angegebene Antwortrange. Aufgetragen ist der Mittelwert der Stichprobe; Fehlerbalken visualisieren +/- 1 Standardabweichung; n=12.

Nützlichkeit bzw. die Einschätzung zu Sicherheitsgewinn und Ablenkung

Die Nützlichkeit wird zudem separat durch die Konstrukte Sicherheitsgewinn und Workload (Pauzie, 2008) erhoben. Bei der Beantwortung der fünf Items zum Sicherheitsgewinn gibt es fünf Abstufungen für die Probanden. Dieser Bereich wird durch die Probanden vollständig genutzt. Als Mittelwert über alle Probanden ergibt sich ein Wert von 3,68 ($SD = 1,07$), welcher damit eine leicht positive Tendenz aufweist.

Zur Berechnung des subjektiven Workloads werden die Faktoren „Global Attention Demand“, „Visual Demand“, „Auditory Demand“, „Stress“, „Temporal Demand“ sowie „Interference“ herangezogen. Der Faktor mit dem geringsten subjektiven Workload scheint der Faktor „Stress“ zu sein mit einem Maximalwert von 3 bei einem Mittelwert von 1,92 ($SD = 0,51$). Der nächsthöhere Wert mit 2,50 ($SD = 1,09$) wird beim Faktor „Interference“ angegeben, welcher die Störung durch andere Tätigkeiten oder Systeme (hier das Warnsystem) behandelt. Am höchsten

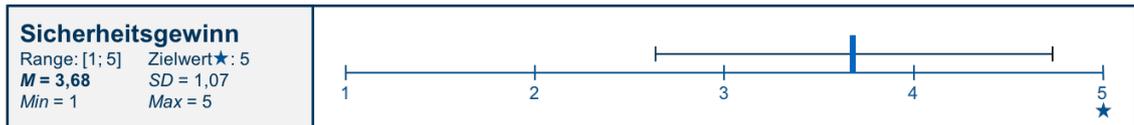


Abbildung 22 Dargestellt sind die aggregierten Ergebnisse des Abschlussfragebogens zum Sicherheitsgewinn zusammengestellt nach Arndt (2011) und Petermann-Stock und Werneke (2014) über alle Probanden hinweg. Links sind Minimum, Maximum sowie Mittelwert und Standardabweichung angegeben. Die Angabe des Zielwerts gilt als Orientierungshilfe - wie auch die angegebene Antwortrange. Aufgetragen ist der Mittelwert der Stichprobe; Fehlerbalken visualisieren +/- 1 Standardabweichung; n=12.

ist der subjektive Workload bei „Visual Demand“ mit einem Wert von 3,42 ($SD = 1,44$), der damit auf einen erhöhten Workload hinweist.

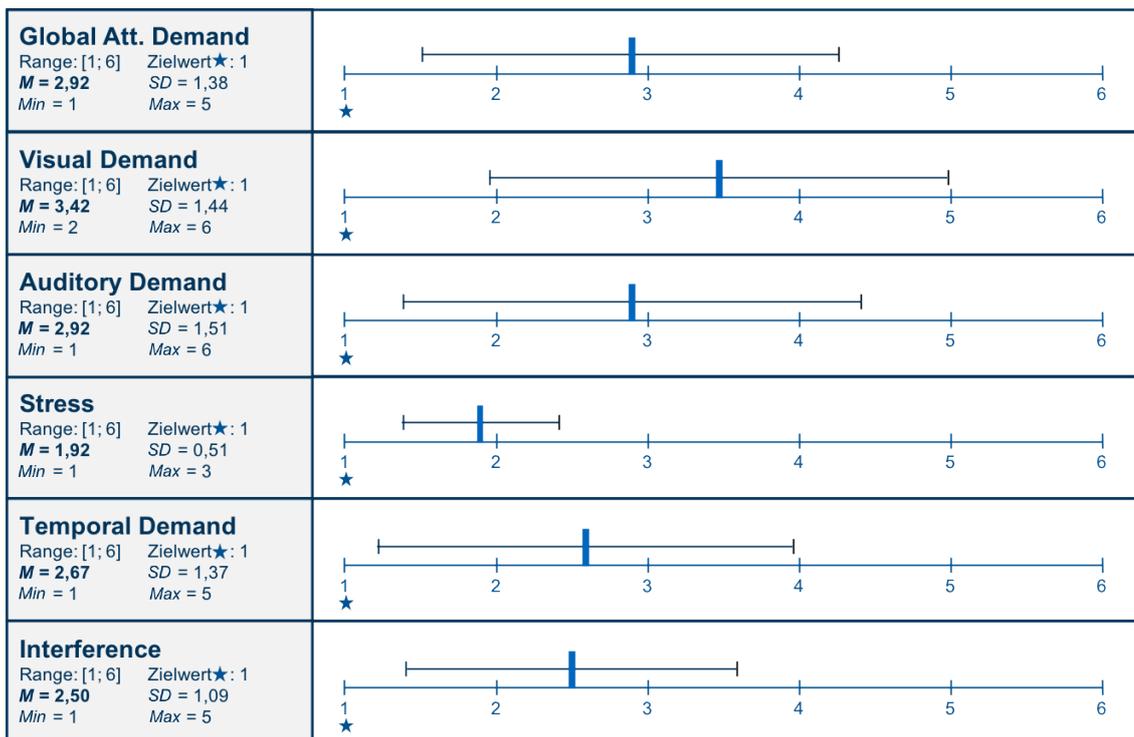


Abbildung 23 Dargestellt sind die aggregierten Ergebnisse des Abschlussfragebogens zum Workload nach Pauzie (2008) über alle Probanden hinweg. Links sind Minimum, Maximum sowie Mittelwert und Standardabweichung angegeben. Die Angabe des Zielwerts gilt als Orientierungshilfe - wie auch die angegebene Antwortrange. Aufgetragen sind die Mittelwerte der Stichprobe für die einzelnen Faktoren; Fehlerbalken visualisieren +/- 1 Standardabweichung; n=12.

Usability und Verständlichkeit

Die Usability und Verständlichkeit des Warnsystems wird mithilfe einer angepassten Auswahl aus dem „System Usability Scale“ erhoben (Brooke, 1996). Der Antwortbereich besteht aus fünf Stufen. Eine Berechnung des SUS Scores ist wegen der Anpassung des Fragebogens nicht möglich und somit auch kein globaler Vergleich. Die sechs beantworteten Items ergeben einen Gesamtmittelwert von 4,07 ($SD = 1,20$), welcher deutlich positiv ausfällt. Auffallend ist, dass das Item „Ich fühlte mich bei der Verwendung des Warnsystems sehr sicher“ mit einem Mittelwert von lediglich 2,42 ($SD = 1,00$) stark nach unten von den anderen Items abweicht.

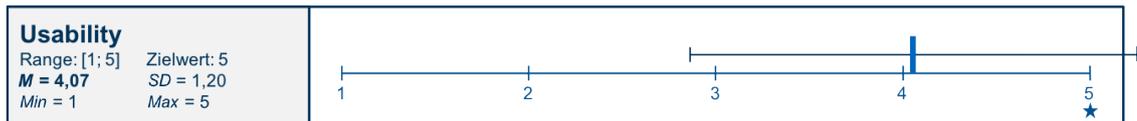


Abbildung 24 Dargestellt sind die aggregierten Ergebnisse des Abschlussfragebogens zur Usability angelehnt an Brooke (1996) über alle Probanden hinweg. Links sind Minimum, Maximum sowie Mittelwert und Standardabweichung angegeben. Die Angabe des Zielwerts gilt als Orientierungshilfe - wie auch die angegebene Antwortrange. Aufgetragen ist der Mittelwert der Stichprobe; Fehlerbalken visualisieren +/- 1 Standardabweichung; n=12.

Gestaltung

Die Gestaltung wird durch eine direkte Frage auf einer sechsstufigen Skala erhoben. Es ergibt sich ein Mittelwert von 4,75 ($SD = 0,87$). Die Skala wird bei der Beantwortung nicht vollständig, sondern nur zwischen den Positionen 3 und 6 ausgenutzt.



Abbildung 25 Dargestellt sind die aggregierten Ergebnisse des Abschlussfragebogens zur Gestaltung (frei zusammengestellt) über alle Probanden hinweg. Links sind Minimum, Maximum sowie Mittelwert und Standardabweichung angegeben. Die Angabe des Zielwerts gilt als Orientierungshilfe - wie auch die angegebene Antwortrange. Aufgetragen ist der Mittelwert der Stichprobe; Fehlerbalken visualisieren +/- 1 Standardabweichung; n=12.

Vertrauen

Auch das Vertrauen wird direkt auf einer sechsstufigen Skala abgefragt. Hier variieren die Bewertungen zwischen 1 und 5 und ergeben einen Mittelwert von nur 2,75 ($SD = 1,22$). Der Mittelwert tendiert damit leicht in Richtung „überhaupt kein Vertrauen“.



Abbildung 26 Dargestellt sind die aggregierten Ergebnisse des Abschlussfragebogens zum Vertrauen (frei zusammengestellt) über alle Probanden hinweg. Links sind Minimum, Maximum sowie Mittelwert und Standardabweichung angegeben. Die Angabe des Zielwerts gilt als Orientierungshilfe - wie auch die angegebene Antwortrange. Aufgetragen ist der Mittelwert der Stichprobe; Fehlerbalken visualisieren +/- 1 Standardabweichung; n=12.

Angemessenheit in den jeweiligen Situationen

Die Angemessenheit des Systems in den jeweiligen Situationen wird durch Items zur Kritikalität, zum Zeitpunkt der Warnung sowie zur Informationsmenge erhoben. Auf einer fünfstufigen Skala kann jeweils angegeben werden, ob der Proband das jeweilige Kriterium als zu wenig/zu früh oder als zu viel/zu spät einstuft, die mittlere Kategorie (Wert = 3) entspricht daher dem subjektiven Optimum für das jeweilige Kriterium. Bei der Bewertung der Kritikalität nutzen die Probanden die gesamte Skala aus und es ergibt sich ein Mittelwert von 2,17 ($SD = 1,27$), womit die Probanden die Warnung in den jeweiligen Situationen in der Tendenz als unkritisch empfinden. Während neun der zwölf Probanden die Antworten 1 oder 2 auf der Skala ankreuzen, wählen drei Probanden die Antworten 3 (11), 4 (10) bzw. 5 (6). Den Zeitpunkt bewerten die Probanden im Durchschnitt mit einer 4,08 ($SD = 0,79$), wobei hier nur der Skalenbereich zwischen 3 und 5 genutzt werden. Die subjektive Bewertung tendiert daher zur Aussage, die Warnung sei zu spät gewesen. Der Informationsgehalt wird von elf der zwölf Probanden mit einer 3 eingestuft. Lediglich ein Proband (4) bewertet diesen mit einer 2, woraus sich ein Mittelwert von 2,92 ($SD = 0,29$) ergibt.

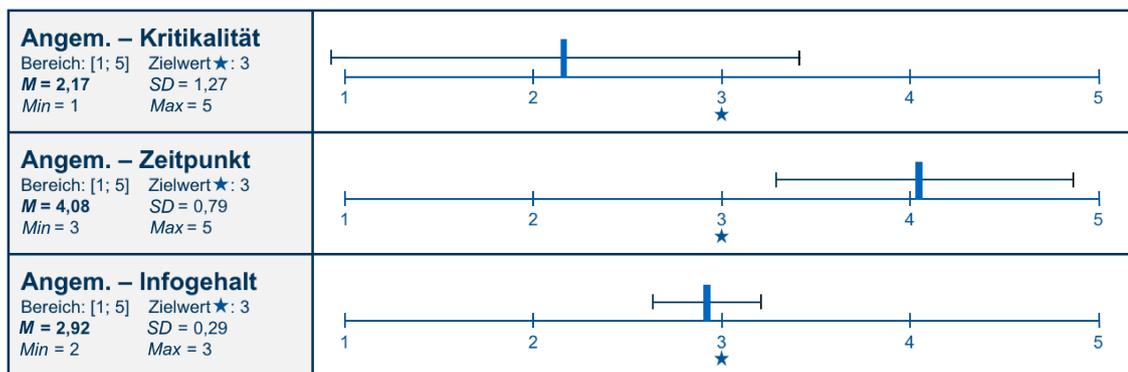


Abbildung 27 Dargestellt sind die aggregierten Ergebnisse des Abschlussfragebogens zur Angemessenheit (frei zusammengestellt) über alle Probanden hinweg. Links sind Minimum, Maximum sowie Mittelwert und Standardabweichung angegeben. Die Angabe des Zielwerts gilt als Orientierungshilfe - wie auch die angegebene Antwortenrange. Aufgetragen sind die Mittelwerte der Stichprobe; Fehlerbalken visualisieren +/- 1 Standardabweichung; $n=12$.

Bei der Auswertung des Abschlussfragebogens können keine Auffälligkeiten bezüglich einzelner Probanden oder Probandengruppen festgestellt werden. Nur ein Proband (10) nutzt das Freifeld für Anmerkungen und gibt dort an, dass der Warnton unangenehm sei.

4.4.4 Interview

Nach den Versuchsfahrten und einem anschließenden Fragebogen zu dem im Versuch erlebten Warnkonzept folgt für den Probanden abschließend ein halbstandardisiertes Interview mit dem Versuchsleiter. Inhalte und Fragenblöcke des Interviews sind im Kapitel Methodik gelistet.

Für die Ergebnissdarstellung des Interviews werden die Aussagen der einzelnen Probanden herangezogen und Referenzen auf die jeweilige Person in Klammern gegeben und farblich markiert. Die Verweise beziehen sich auf die Mitschriften der Interviews (siehe elektronischer

Anhang auf der Daten-CD). Um die Probanden in ihrer Bewertung möglichst wenig zu beeinflussen, wird nur bei Unklarheiten durch den Versuchsleiter gezielt nachgefragt. Es ist daher darauf hinzuweisen, dass – der Methode geschuldet – die Probanden zwar manche Aspekte durchaus wahrgenommen haben könnten, sie jedoch dem Versuchsleiter nicht explizit mitteilen, womit sie wiederum nicht erfasst werden. Das Ziel des Interviews, ein umfassendes Feedback zu den einzelnen Warnkomponenten zu erhalten und Schwachstellen des Konzeptes aufzudecken, wird hierdurch jedoch nicht beeinträchtigt.

Beschreibung der Warnung

Alle zwölf Probanden nennen die zwei Modalitäten der akustisch-visuellen Warnung. Zehn Probanden (1, 3-5, 7-12) erkennen zudem, dass die LED-Leiste die Position der detektierten VRUs visualisiert, indem sie von einer „lokalisierten“ (1) Warnung, der „Position der Gefahr“ (4) oder auch einer „Aufmerksamkeitslenkung“ (11) sprechen. Elf Probanden (1-5, 7-12) nennen zudem eine Farbänderung von gelb bis rot und alle zwölf Probanden beschreiben ein akustisches Signal. Dabei haben drei Probanden (7, 8, 10) den Ton einer bestimmten Distanz zugeordnet, während die anderen neun Probanden den Ton ab einer bestimmten Kritikalität erwarten. Eine grobe Beschreibung der Warnung ist somit durch alle Probanden korrekt erfolgt. Im nächsten Abschnitt wird näher auf die Bedeutung der Warnstufen eingegangen und dadurch im Speziellen die Unterscheidung zwischen Kritikalität der Situation und Distanz zum Objekt behandelt.

Abstufungen in der Warnung und deren Bedeutung sowie Angemessenheit der Dringlichkeit

Zunächst werden die Probanden befragt, ob sie Abstufungen in der Warnung erkannt haben und falls ja, wie viele und wie diese gestaltet seien. Hierzu geben drei Probanden (3, 7, 10) an, sie hätten eine fließende Veränderung und keine Stufen der Warnung wahrgenommen. Jeweils ein Proband nimmt zwei Warnstufen (5: „1: gelb, 2: orange-rot mit Warnton“), vier Warnstufen (8: „1: gelb, 2: rot, 3: klingeln, 4: blinken“) und sechs bis sieben Warnstufen (12: „gelb bis rot, ab rot mit Ton“) wahr. Die restlichen sechs Probanden (1, 2, 4, 6, 9, 11) erkennen drei Warnstufen, wobei sich diese teilweise von der tatsächlichen Eigenschaft der Stufe unterscheiden. So nennt beispielsweise Proband 9 die Stufen 1 „gelb“, 2 „rötlich“ und 3 „Klang“ oder Proband 11 die Stufen 1 „orange mit Richtung“, 2 „rot mit Richtung und Klingeln“ und 3 „alles rot mit Klingeln“. Von den zwölf Probanden nennen zwei Probanden (8, 10) ein wahrgenommenes Blinken der LED-Leiste und lediglich drei Probanden (1, 3, 6) unterscheiden in der Beschreibung der Stufen beim akustischen Signal zwischen einmaligem und doppeltem Klingeln.

In der Einführung wird die Warnung mit ihren klar abgrenzbaren Stufen demonstriert. Die Ergebnisse zeigen dennoch, dass die Mehrheit der Probanden im Anschluss an den Versuch nicht mehr in der Lage zu sein scheint, diese korrekt wiedergeben zu können.

Die Antworten der Probanden auf die Frage, was die Stufen kommunizieren würden, lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen. Sechs Probanden (2-4, 8, 10, 12) nennen die Entfernung zum Objekt als Kriterium für die einzelnen Stufen. Dabei machen sie Aussagen wie „Distanz“ (2), „Abstand des Fußgängers“ (8) oder „Nähe des Fußgängers“ (12). Weitere fünf (1, 5-7, 9) Probanden erkennen als Kriterium der Stufen die Kritikalität der Situation. Dies beschreiben sie unter anderem mit „Gefährlichkeit [...] wie wahrscheinlich ist ein Unfall“ (1), „Brenzlichkeit“ (6) oder „zunehmende Gefahr“ (9). Ein Proband gibt keine Antwort auf diese Frage. Bei den Antworten zu dieser Frage geben einige Probanden andere Kriterien als bei der Beschreibung der Warnung in den vorigen Fragen an.

Im Anschluss wird die Bedeutung der einzelnen Stufen für den Fahrer abgefragt. Alle Probanden, die sich hierzu äußern scheinen die Unterscheidung zwischen Hinweis und Handlungsaufforderung in der Warnung erkannt zu haben. Probanden machen Aussagen wie „gelb: hier ist wer, orange: Gefahr nahe, rot: Kollision!“ (4), „gelb: gemerkt, rot: handeln“ (7) oder „1: Obacht, da ist jemand, 3: jetzt notbremsen“ (11).

Als letztes werden in diesem Fragenblock die Warnung bzw. ihre Stufen hinsichtlich der Dringlichkeit in Bezug zur Kritikalität der Situation bewertet. Fünf Probanden (3, 4, 6, 9, 11) geben an, die Warnungen seien zu spät gekommen. So gibt Proband 3 an, dass das System während des Versuchs insgesamt, vor allem aber beim Abbiegen viel zu spät warnte, bei der Einführung sei der Zeitpunkt aber „top“ gewesen. Auch Proband 11 empfindet den Zeitpunkt der Warnung beim Abbiegeszenario 3 als viel zu spät. Proband 6 spezifiziert, dass er die visuelle Warnung als passend, das Klingeln jedoch als zu spät empfindet. Probanden 4 und 9 wünschen sich, dass die erste Warnstufe früher aktiviert würde. Von den anderen Probanden gibt Proband 8 an, ihm seien die Abbiegeszenarien nicht dringlich genug, die anderen beiden Szenarien jedoch sehr dringlich vorgekommen. Im Gegensatz zu Proband 6 empfindet Proband 12 die Stufe mit Ton als zu früh und ein weiterer Proband (5) gibt an, dass er keine Aussage treffen könne, da das System nicht zuverlässig funktioniere. Eine Vielzahl der Probanden empfindet also die Warnung, wie sie sich im Versuch präsentiert, als zu spät. Dabei werden gleich mehrmals die Abbiegeszenarien gesondert genannt. Bezüglich der ersten Warnstufe sowie des Zeitpunkts der akustischen Warnung gehen die Meinungen der Probanden auseinander.

Bewertung der visuellen Warnkomponente

Im Anschluss an die Befragung zur Warnung und den Warnstufen werden die Probanden aufgefordert die einzelnen Komponenten zu bewerten und nach potenziellen Verbesserungsvorschlägen gefragt.

Sieben Probanden (1, 3, 4, 9-12) heben die Positionsanzeige als positive Eigenschaft hervor. Proband 5 empfindet die Richtungsanzeige als schlecht, da sie von der Sitzposition abhängig sei. Ebenso merken drei andere Probanden (1, 8, 12) an, dass die Positionsanzeige nicht

immer genau passt. Proband 12 schlägt daher vor, man könne die Anzeigen an den Fahrer z.B. durch Blickbewegungsmessungen anpassen.

Zur Position und den Maßen der LED-Leiste äußern sich die Probanden unterschiedlich. Drei Probanden finden, dass die Leiste „zu weit unten“ (1), „nicht direkt im Sichtfeld“ (2) oder „vielleicht von der Straße ablenkend“ (4) sei. Proband 5 schlägt vor, zu überprüfen, wo die Augen während der Fahrt ruhten, um so festzustellen, ob man die Leiste lieber oben oder unten anbringen sollte. Proband 9 lobt die Position der Leiste. Bezüglich der Breite der LED-Leiste merkt Proband 3 an, dass sie ruhig „bis in die Türen“ reingehen dürfte. Proband 11 hingegen findet die Breite gut, bemängelt jedoch, dass die Leiste zu hoch sei, während Proband 2 die Leiste als zu schmal empfindet. Neben der reinen Position wird auch auf die Sichtbarkeit der Warnungen geachtet. Drei Probanden (1, 5, 6) merken an, dass die Leiste nicht hell genug sei. Probanden 3 und 8 hingegen finden, dass die LED-Anzeige gut sichtbar und hell genug wäre. Hier ist anzumerken, dass bei diesen Probanden im Gegensatz zu den drei oben genannten Probanden die Sonne nicht so stark (3) bzw. gar nicht (8) scheint.

Proband 7 nennt die geeignete Farbauswahl von gelb bis rot und betont, dass weiß und grün nicht geeignet seien für ein Warnsystem.

Das Konzept der visuellen Warnkomponente loben drei Probanden (3, 7, 9), indem sie das Warnen mit „Farben und Stufen“ (3), die Richtungsanzeige beim Abbiegen als „richtig gut und hilfreich“ (7) oder die Warnung als „passend zum Daimler-Gesamtkonzept“ (9) bezeichnen. Vier Probanden (1, 4, 6, 8) nennen Ideen für alternative Warnungen oder Verbesserungen. So schlägt Proband 1 vor, die LED-Leiste in die Scheibe hochstrahlen zu lassen, um die Sichtbarkeit zu erhöhen. Zwei Probanden (4, 8) schlagen eine Integration der Warnung in ein HUD vor, wobei Proband 8 skeptisch ist, wie damit Fußgänger in den Seitenbereichen dargestellt würden und Proband 4 überlegt, alle erkannten Objekte im HUD anzuzeigen. Proband 6 gibt an, dass seinem Geschmack eher eine Anzeige mithilfe einzelner sichtbarer LED-Punkte in der Leiste entsprechen würde als Ambient Light. Zudem überlegt er, ob ein Blinken eine gute Option sei oder ob es zu sehr ablenken würde. Tabelle 1 fasst die Themenbereiche der Äußerungen gegliedert nach positiven und negativen Kommentaren sowie Verbesserungsvorschlägen zusammen.

Die Bewertungen der visuellen Warnkomponente sind mehrheitlich positiv. Als Kritikpunkte werden vor allem die Helligkeit, die Position der LED-Leiste im/außerhalb des Blickfelds sowie die Positionsgenauigkeit des VRUs genannt. Die Position der LED-Leiste wird von keinem der Probanden mit Extremwerten in den Körperhöhen kommentiert. Vorschläge bezüglich alternativer Warnkonzepte sollen im Folgekapitel diskutiert werden.

Visuelle Warnkomponente	Probanden
Positive Anmerkungen	
Konzept LED-Leiste	3, 7, 9
Prinzip der Positionsanzeige	1, 3, 4, 9-12
Sichtbarkeit	3, 8
Position der LED-Leiste	9
Maße der LED-Leiste	11
Farben	7
Negative Anmerkungen	
Abhängigkeit der Positionsanzeige von Sitzposition	5
Genauigkeit der Positionsanzeige	1, 12
Sichtbarkeit	1, 5, 6
Position der Lichtleiste	1, 2
Maße der LED-Leiste	2, 11
Verbesserungsvorschläge	
Konzept LED-Leiste	1, 4, 6, 8
Anpassung Positionsanzeige durch Blickmessung	12
Maße der LED-Leiste	3

Tabelle 1 Die gezeigte Tabelle gibt einen Überblick über die Themenbereiche, zu denen sich die Probanden in Bezug auf die visuelle Warnkomponente positiv oder negativ geäußert haben bzw. Verbesserungsvorschläge gemacht haben.

Bewertung der akustischen Warnkomponente

Die Aussagen der Probanden zum akustischen Warnsignal lassen sich in die Bereiche Lautstärke, Art des Tones, Lokalisierung und Kritikalität bzw. Zeitpunkt einteilen. Die Lautstärke wird von zwei Probanden (1, 4) als zu leise bemängelt und von vier Probanden (7, 9, 10, 12) als positiv gewertet. Die anderen sechs Probanden treffen keine Aussage zur Lautstärke.

Die Art des Tones wird von der Mehrheit der Probanden (1, 4-6, 8-12) negativ beurteilt. Das Klingeln wird als „nervig“ (11, 12), „nicht zu Mercedes/Daimler passend“ (5, 8, 9) oder als „unkritisch“ (1) bzw. als „für einen Warnton ungeeignet“ (4) bezeichnet. Während ein Proband (6) das Klingeln mit Radfahrern assoziiert, stellen zwei Probanden (10, 11) eine Ähnlichkeit zu dem Klingeln eines Telefons fest. Zwei Probanden (2, 7) machen positive Anmerkungen zur Art des Tones. So beschreibt einer, dass der Ton im Gegensatz zu „allgemeinem Piepsen“ einer konkreten Gefahr zuzuordnen sei (2), und dass er nicht angenehm sei, aber damit für einen Warnton geeignet sei. Die Probanden 4 und 7 halten den Ton bei geringen Kritikalitätsstufen für ausreichend, bemängeln jedoch die unzureichende Dringlichkeit bei höherer Gefahr. Als mögliche Alternative schlagen vier Probanden (1, 6, 10, 11) vor, vorhandene Warntöne - wie sie bei Parkassistenten oder bestehenden Warnsystemen verwendet würden

- zu nutzen. Zwei Probanden (1, 11) sprechen die Lokalisierung des Tones an. Proband 1 meint, er habe einen „räumlichen“ Ton wahrgenommen und fragt, ob diese Beobachtung korrekt gewesen sei. Proband 11 schlägt vor, den Ton zu lokalisieren, um auch damit auf die Gefahr hinzuweisen¹.

Bezüglich der Kritikalität bzw. des Zeitpunkts der Warnung gibt es verschiedene Vorschläge und Kritiken vonseiten der Probanden. So hält Proband 5 es für sinnvoll, ein akustisches Signal zu bringen, sobald eine Reaktion erforderlich sei. Dem zuzuordnen ist die Kritik des Probanden 12, dass der Ton „zu früh [kommt], da er nicht abhängig von der eigenen Geschwindigkeit“ sei². Proband 3 schlägt vor, bei der Erkennung eines Objekts zu läuten und dann denselben Ton ab der 3. Stufe doppelt, jedoch in derselben Lautstärke zu wiederholen. Proband 8 hingegen schlägt vor, „wie bei Parkassistenten bei gelb den Ton [zu] bringen und dann die Frequenz [zu] erhöhen“. Tabelle 2 fasst die Themenbereiche der Äußerungen gegliedert nach positiven und negativen Kommentaren sowie Verbesserungsvorschlägen zusammen.

Akustische Warnkomponente	Probanden
Positive Anmerkungen	
Lautstärke	9, 10, 12
Art des Tones	2, 4
Lokalisierung	1, 11
Negative Anmerkungen	
Lautstärke	1, 4
Art des Tones	1, 4-6, 8-12
Kritikalität/Zeitpunkt	12
Verbesserungsvorschläge	
Art des Tones	1, 6, 7, 10, 11
Kritikalität/Zeitpunkt	3, 5, 8

Tabelle 2 Die gezeigte Tabelle gibt einen Überblick über die Themenbereiche, zu denen sich die Probanden in Bezug auf die akustische Warnkomponente positiv oder negativ geäußert haben bzw. Verbesserungsvorschläge gemacht haben.

Die akustische Warnkomponente wird mehrheitlich negativ bewertet. Hierbei stellt die Art des Tones den größten Kritikpunkt dar. Zudem werden die Lautstärke sowie der Zeitpunkt der akustischen Warnung bemängelt. Vorschläge seitens der Probanden sollen im nächsten Kapitel diskutiert werden. Die Bewertungen des akustischen Warnsignals im Gesamtkonzept wird im folgenden Fragenblock vorgestellt.

¹ Es ist bereits eine Lokalisierung (links, mittig, rechts) des Tones implementiert.

² Tatsächlich passt sich die Warnung dynamisch an die Fahrzeuggeschwindigkeit an.

Bewertung der Warnung als Kombination akustischer und visueller Warnkomponente

Acht Probanden (1-5, 7, 9, 11) äußern sich positiv zur Kombination akustischer und visueller Warnkomponenten. Dabei loben sie den „Grundansatz, [die] Positionsanzeigen, [die] klar verständliche Abstufungen“ (2), den aus der Kombination entstehenden Sicherheitsgewinn (9) und die Kombination aus visueller und akustischer Warnung (4, 5, 11). Da dies beispielsweise – wie Proband 4 beschreibt – gut für Gefahren sei, während eine Modalität nur für Unwichtiges stehen könne. Proband 1 und 3 sprechen zudem davon, dass sie das System gerne nutzen würden. Neben den positiven Anmerkungen äußern fünf Probanden (1, 2, 6, 9, 10) Kritikpunkte. Zwei Probanden (6, 9) beschwerten sich über die späten Warnungen und Proband 1 bemängelt die Gesamtintegration als nicht fließend genug. Dieser spricht zudem den kleinen Erfassungsbereich der Kameras an, der vor allem einen Effekt auf die Abbiegeszenarien hätte. Proband 2 merkt erneut an, dass die LED-Leiste „nicht ganz im Blickfeld“ sei und Proband 10 wünscht sich, dass die Warnung nur bei kritischen Fällen angezeigt werden würde und dass beim Vorbeifahren keine Anzeige nötig sei. Als Verbesserungsvorschläge werden von den Probanden 1 und 3 vorgeschlagen, die LED-Leiste in den Türbereich zu erweitern. Drei Probanden (6, 9, 12) überlegen, dass eine Ergänzung des Warnkonzeptes um eine haptische Warnkomponente im Lenkrad sinnvoll sei. Proband 12 betont zudem, dass das Warnsystem unbedingt die eigene Geschwindigkeit in die Kritikalitätsberechnungen aufnehmen müsse. Diese dynamische Eigenschaft ist im aktuellen Warnsystem bereits enthalten.

Das Konzept der Kombination aus visueller und akustischer Warnung scheint von der Mehrheit der Probanden positiv aufgenommen zu werden. Vorteile des Systems sehen die Probanden vor allem in der Positionsanzeige, den Abstufungen der Warnung und dem resultierenden Sicherheitsgewinn, während Verbesserungen vor allem im Bereich der Systemintegration und Erkennungsleistung gewünscht werden.

Nutzungsbereitschaft

Auf die Frage, ob sie das Warnsystem im eigenen Auto nutzen würden, antworten sieben Probanden (1-5, 8, 11) mit einem klaren ja, wobei Proband 2 „für vorne und hinten“ spezifiziert. Weitere drei Probanden (6, 9, 10) geben ihr ja mit Einschränkungen an. So sagt Proband 9, dass er das System gerne in seinem Auto hätte, es jedoch nicht zu teuer sein dürfe. Proband 7 gibt zur Antwort: „Joa, aber visuell würde z.B. auf dem Parkplatz reichen, bei höheren Geschwindigkeiten dann auch wieder akustisch“. Proband 10 merkt die Schwierigkeit des Systems in Stadtbereichen mit vielen Fußgängern an und beschreibt, dass er die Stufen gelb und orange nicht bräuchte. Die anderen beiden Probanden (6, 12) erscheinen unentschieden. So wünscht sich Proband 6 ein System, das nicht mehr warnte, sondern eigenständig bremsen würde und Proband 12 betont, dass er das Warnsystem nur nutzen würde, wenn dieses durch Systemtauglichkeit sein Vertrauen gewinnen würde.

Insgesamt fällt die im Interview angegebene Nutzungsbereitschaft hoch aus. Trotz des frühen Prototypenstatus weist diese Bewertung eine sehr positive Tendenz auf.

Weitere Kommentare und offene Fragen

Zuletzt werden die Probanden gebeten, Kommentare und Gedanken frei zu äußern, die während des Versuches oder im Anschluss daran aufkämen. Sechs Probanden (2, 3, 5, 7, 9, 11) machen ergänzende Aussagen, die sich bei der Mehrheit der Probanden (2, 3, 5, 7, 9) auf die Systemzuverlässigkeit (in Abbiegeszenarien) bezieht. Proband 3 lässt dies nach eigener Aussage in die Einzel- und auch Gesamtbewertung des Systems miteinfließen. Proband 11 ergänzt zu der Frage bezüglich der Ablenkung des Systems im Abschlussfragebogen seinen Eindruck, dass das System zwar ablenke, aber damit bei der Fahraufgabe helfen würde.

Auffälligkeiten bezüglich einzelner Probanden

Auch bei der Interviewauswertung wurde auf Auffälligkeiten einzelner Probanden geachtet. Dies betrifft insbesondere die Probanden, welche im Vorfragebogen durch ihre Antworten aufgefallen sind. So zeichnen sich Probanden 6 und 7 durch ihre kleine Körpergröße aus, während 4 und 9 durch ihre große Körperhöhe vom Durchschnitt der Gruppe abweichen. Proband 4 hat zudem eine nicht korrigierte Sehschwäche angegeben. Die Aussagen dieser Probanden weichen jedoch auch hinsichtlich der Sichtbarkeit der LED-Leiste nicht von den Aussagen anderer Probanden ab.

Proband 12 weist im Vorfragebogen einen deutlichen Abstand zu den anderen Probanden bezüglich Fahrerlaubnisbesitz und Fahrleistung sowie Erfahrung mit und Vertrauen in Fahrerassistenzsysteme auf. Doch auch bei ihm können keine Auffälligkeiten in den Aussagen festgestellt werden.

Weitere Notizen des Versuchsleiters und Videodaten

Kommentare und Anmerkungen der Probanden werden bereits im Ergebnisteil an den relevanten Stellen genannt. Die Videodaten zeigen, in welchen Fahrten das System durch späte Warnungen oder sogar Ausbleiben der Warnungen unzureichend funktioniert. Weitere Auffälligkeiten der Probanden oder des Systems konnten durch den Versuchsleiter oder in den Videodaten nicht beobachtet werden.

5 Diskussion

Die im Rahmen der Probandenstudie gewonnenen Daten sollen im weiteren Verlauf zur Verbesserung des Warnsystems und zu einer kritischen Hinterfragung des gesamten Prototyps genutzt werden.

5.1 Interpretation

Im Folgenden sollen zunächst die Erkenntnisse aus den Fragebögen und daran anschließend die Interviewergebnisse diskutiert werden. Vorab ist nochmals darauf hinzuweisen, dass die Ergebnisse ausschließlich deskriptiv gedeutet werden und nur Tendenzen und Schwerpunkte zur Verbesserung des Warnsystems aufzeigen sollen. Eine vergleichende Wertung und Interpretation der Ergebnisse mit Bezug auf andere Systeme wird nicht vorgenommen.

5.1.1 Stichprobe

Die Antworten aus dem Vorforschfragebogen bestätigen die Beobachtungen bei der Probandenrekrutierung, dass eine Stichprobe vorliegt, die eher technikaffin und vertraut mit dem Automobilkontext ist. Das Geschlechterverhältnis der Stichprobe ist mit elf männlichen Teilnehmern und nur einer Frau sehr ungleichmäßig verteilt. Dies liegt an der Einschränkung, die es ausschließlich Daimlermitarbeitern mit einer speziellen Fahrerlaubnis erlaubt, an den Versuchsfahrten teilzunehmen. Die geringen Abweichungen in den Angaben der subjektiven Einschätzung des Fahrertyps lassen zudem auf eine homogene Stichprobe schließen. Eigene Angaben der Probanden, die hohen Werte im Bereich Erfahrung und Vertrauen in Fahrerassistenzsysteme, die subjektive Einschätzung des Fahrertyps und auch die eher hohe Fahrleistung und -erfahrung deuten darauf hin, dass die Stichprobe aus tendenziell professionellen Fahrern besteht, die zudem Wissen im Bereich Fahrerassistenzsysteme vorzuweisen haben.

Da im Durchschnitt das Vertrauen in Fahrerassistenzsysteme sehr hoch angegeben wird, ist eine solche Tendenz auch in Bezug auf das Warnsystem zu erwarten. Die Eigenschaften der Stichprobe bedeuten, dass die Ergebnisse vermutlich nur eingeschränkt auf die allgemeine Bevölkerung übertragbar sind. Vielmehr können die Ergebnisse als Tendenz und als wichtiger Beitrag einer Expertengruppe gewertet werden. Mit Blick auf die Fahrleistungen und die Erfahrung mit Fahrerassistenzsystemen sowie das Vertrauen in diese, könnte Proband 12 eine Tendenz für die Gesamtpopulation deuten lassen und bedarf daher besonderer Beachtung. Ebenso wird bei der Auswertung auf die Probanden 4 und 9 sowie 6 und 7 auf Auffälligkeiten geachtet. Diese haben sich im Vorforschfragebogen durch eine besonders große bzw. kleine Körpergröße ausgezeichnet. Proband 4 gibt zudem eine nichtkorrigierte Sehschwäche an.

5.1.2 Auffälligkeiten einzelner Probandengruppen

Weder für die im vorigen Abschnitt genannten Probanden oder für andere Probanden der Stichprobe noch für Probandengruppen können Auffälligkeiten in den Ergebnissen festgestellt werden. Natürlich gibt es unterschiedlich große Streuungen in den Fragebogenergebnissen und auch in den Aussagen des Interviews, doch können keine deutlich positiven oder negativen Antworttrends für einzelne Personen oder Gruppen festgestellt werden. Nichtsdestotrotz lässt dies nicht eindeutig den Schluss zu, dass keiner der Probanden aufgrund seiner Körpergröße Probleme mit der Sichtbarkeit oder aufgrund von Vorerfahrungen Probleme im Umgang mit dem Warnsystem hat. Doch die homogenen Ergebnisse zeigen, dass zumindest in dieser Stichprobe tendenziell Einigkeit über die Bewertung des Systems besteht.

5.1.3 Einfluss von Witterungs- oder Sichtbedingungen sowie Tageszeiten

Ebenfalls kann in den Ergebnissen nicht festgestellt werden, dass es Unterschiede in den Bewertungen in Hinsicht auf die Witterungs- oder Sichtbedingungen sowie Tageszeiten gibt. So scheint vermutlich das Warnsystem unabhängig von diesen Faktoren mit gleicher Performanz zu funktionieren. Es ist allerdings auch möglich, dass die Bewertungen des Systems durch die Probanden entsprechend angepasst werden. Derartige Schlüsse können nicht aus den vorliegenden Daten gezogen werden.

5.1.4 Bewertung der abgefragten Dimensionen

Ergebnisse aus dem Zwischenfragebogen

Die sechs Kriterien (siehe Kapitel 4.1) werden im Zwischenfragebogen im Schnitt eher mittelmäßig bewertet, wobei die Verständlichkeit und die Einstellung zum System die besten Bewertungen erhalten, während die Bewertung zum Vertrauen und der Nützlichkeit am schlechtesten ausfallen. Die mittleren Bewertungen deuten darauf hin, dass das Warnsystem in seiner Gesamtheit nicht vollständig überzeugt. Schwerpunkte für Verbesserungen sollten bei dem Kriterium Vertrauen sowie bei der Nützlichkeit gesetzt werden. Dass die grundsätzliche Einstellung gegenüber dem System tendenziell positiv ist, ist als unterstützender Gedanke bei der Weiterentwicklung zu deuten. Doch sollte auch hier nicht die Versuchssituation außer Acht gelassen werden, welche im Allgemeinen Probanden veranlasst, positivere bzw. gewünschte Antworten zu geben.

Eine genauere Analyse zeigt, dass das System bei einem hohen Anteil der Abbiegeszenarien ausfällt oder nur sehr spät warnt. Bei den anderen beiden Szenarien funktioniert das System in fast allen Fällen zuverlässig. Im Zusammenhang dazu können die Unterschiede in den Antworten der Zwischenfragebögen gesehen werden, bei denen alle sechs Bewertungskriterien für die Abbiegeszenarien schlechter bewertet werden als Szenarien (1) und (4). Die größten Unterschiede können dabei im Kriterium, wie hilfreich das System ist, und im Vertrauen festgestellt werden. Die Bewertung der Gestaltung und der Verständlichkeit des Systems weisen vergleichsweise kleine Unterschiede auf und scheinen damit von der Systemzuverlässigkeit nicht so stark beeinflusst zu werden.

Die Ergebnisse erlauben eine wichtige Differenzierung zwischen den Szenarien und lassen zudem einen Schluss auf die Hintergründe der Bewertungen durch die Probanden zu. Durch den Zwischenfragebogen werden die immense Bedeutung und der Einfluss der Systemzuverlässigkeit auf verschiedene Bewertungsaspekte des Warnsystems deutlich.

Ergebnisse aus dem Abschlussfragebogen

Im Gegensatz zum Zwischenfragebogen lässt der Abschlussfragebogen keine Differenzierung einzelner Szenarien oder anderer vergleichbarer Systeme zu. Dies lässt ausschließlich Raum für deskriptive Beschreibungen. Wichtig ist, dass die Unterschiede in den Bewertungen der einzelnen Kriterien aufzeigen, auf welche Aspekte in zukünftigen Entwicklungen der Fokus gelegt werden sollte. Die Aussage von Proband 3, nach welcher dieser das gesamte System aufgrund der mangelhaften Systemzuverlässigkeit schlechter bewertet hätte, unterstützt jedoch die Vermutung, dass auch die Ergebnisse des Abschlussfragebogens durch Mängel in der Systemzuverlässigkeit und Erkennungsleistung beeinflusst werden.

Akzeptanz und allgemeine Einstellung

Die von Van Der Laan et al. (1997) entwickelte Akzeptanzskala erreicht im abschließenden Fragebogen eine tendenziell positive Bewertung des Warnsystems, wobei die „Satisfying Scale“ leicht bessere Werte als die „Usefulness Scale“ aufweist. Die Ergebnisse gehen mit den Antworten aus dem Zwischenfragebogen einher, die auf eine positive Grundeinstellung gegenüber dem vorgestellten Warnkonzept hindeuten.

Nützlichkeit bzw. die Einschätzung zu Sicherheitsgewinn und Ablenkung

Auch das Kriterium Sicherheitsgewinn erhält Bewertungen mit einer leicht positiven Tendenz. Mit dem Hintergrund, dass das Warnsystem aktuell als Prototyp mit Mängeln in der Erkennungsleistung und Systemzuverlässigkeit vorliegt, ist dies positiv zu bewerten. Doch ist auch auf die eher hohe Streuung in den Ergebnissen hinzuweisen, welche zeigt, dass die Probanden hier in ihren Bewertungen auseinandergehen. Eine Verbesserung in diesem Kriterium sollte daher angestrebt werden.

Die im DALI-Fragebogen angegebenen Werte des subjektiven Workloads weisen keine extrem hohen oder auffallend niedrige Wertungen auf (Pauzie, 2008). Dass der „Visual Demand“ den höchsten subjektiven Workload erhält, könnte neben dem Warnsystem auch auf die zugrundeliegende Tätigkeit des Autofahrens zurückgeführt werden. Da keine Kontrollgruppe zum Vergleich herangezogen werden kann, ist es nicht möglich, dies endgültig zu interpretieren, jedoch sollte in zukünftigen Studien eine Kontrollgruppe in das Versuchsdesign miteinbezogen werden.

Usability und Verständlichkeit

Das Kriterium Usability und Verständlichkeit wird im Abschlussfragebogen deutlich positiv bewertet. Auffallend ist die deutlich niedrigere Bewertung des Items „Ich fühlte mich bei der Verwendung des Warnsystems sehr sicher“. Dies deutet auf eine Unsicherheit im Umgang mit dem Warnsystem hin. Da die Gebrauchstauglichkeit im Gesamten jedoch hoch eingestuft wird, ist als Grund für diese Wertung vermutlich die mangelhafte Systemzuverlässigkeit anzuführen.

Gestaltung

Die sehr gut bewertete Gestaltung mit einer geringen Streuung innerhalb der Stichprobe lässt den Schluss zu, dass die Probanden mit dem Grundaufbau und -design des Warnsystems zufrieden sind. Die gut bewertete Subskala „Satisfying Scale“ unterstützt ebenfalls dieses Fazit.

Vertrauen

Anders verhält es sich mit dem Vertrauen, welches in die Richtung „überhaupt kein Vertrauen“ tendiert. Wie auch im Zwischenfragebogen wird deutlich, dass für einen erfolgreichen Einsatz des Warnsystems eine Erhöhung des Vertrauens unbedingt notwendig ist. Dies lässt sich in Bezug auf ein Warnsystem vor allem durch eine hohe Zuverlässigkeit mit geringer Fehlerquote erreichen und sollte zukünftig im Fokus der Weiterentwicklung liegen.

Angemessenheit in den jeweiligen Situationen

Der Informationsgehalt der Warnungen wird von den Probanden als der jeweiligen Situation angemessen empfunden. Im Gegensatz dazu weisen die Kriterien Zeitpunkt und Kritikalität Potenzial für Verbesserungen auf. Der Zeitpunkt der Warnung wird tendenziell als zu spät bewertet. Bereits vor und auch während des Versuchs konnten Probleme mit der Erkennung und eine daraus resultierende verspätet oder gar nicht einsetzende Warnung durch das Projektteam beobachtet werden. Dies kann mit Delays, verursacht durch den Prototypaufbau, sowie durch die Systemerkennungsleistung im Allgemeinen erklärt werden. Die Wertung einiger Probanden, die Warnungen seien nicht kritisch genug für die jeweilige Situation gewesen, lässt sich auch durch die verspätet einsetzenden Warnungen erklären. Durch systembedingte Verzögerungen und somit zu spät einsetzenden Warnungen werden die Warnstufen zu kritischeren Situationen angezeigt als theoretisch geplant. Hier wäre eine längere Testphase notwendig gewesen, um etwaige Schwächen des Prototyps vorab zu identifizieren.

5.1.5 Interview

Die im vorigen Kapitel vorgestellten Interviewergebnisse sollen im Folgenden interpretiert und gewertet werden. Inhalte und Ziele des Interviews sind im Kapitel Methodik vorgestellt.

Beschreibung der Warnung

Die Antworten der Probanden bestätigen, dass die Warnung in groben Zügen durch alle Probanden korrekt wiedergegeben werden kann. Aufgrund einer Demonstration der Warnung mit ihren klar abgrenzbaren Stufen zu Beginn des Versuches ist dies nicht anders zu erwarten gewesen. Erst in den nächsten Frageblöcken werden detailliertere Wahrnehmungen abgefragt.

Abstufungen in der Warnung und deren Bedeutung sowie Angemessenheit der Dringlichkeit

Es kann festgestellt werden, dass alle Probanden Veränderungen bzw. Abstufungen in der Warnung erkennen können, diese jedoch nach Versuchsende von der Mehrheit nicht korrekt beschrieben werden. Die Stufen und ihre Abgrenzbarkeit sind von hoher Bedeutung für den Fahrer und seine Handlungen. Daher ist es von großer Wichtigkeit, dass bei der Weiterentwicklung auf die Robustheit des Systems geachtet wird und die Stufenwechsel für den Fahrer nachvollziehbar erfolgen. Während dieser Versuchsfahrten kommt es gehäuft zu einem sprunghaften Wechsel der Warnung zwischen den verschiedenen Stufen. Dieses wird in erster Linie durch den begrenzten Erfassungswinkel der Kameras sowie durch Mängel in der Fußgängererkennung verursacht und könnte daher die mentale Vorstellung des Warnkonzepts beeinflusst haben. Dennoch kann die Mehrheit der Probanden die Bedeutung der Warnstufen, von einem Hinweis bis zur Handlungsaufforderung korrekt interpretieren und in Relation zur Kritikalität der Situation setzen. Fast synonym wird hier auch die Entfernung des VRUs als Kriterium genannt.

Der Zeitpunkt der Warnung wird durch eine Vielzahl der Probanden als zu spät empfunden. Da diese Äußerung häufig im Zusammenhang mit Abbiegeszenarien getroffen wird, ist zu vermuten, dass diese Wahrnehmung, zumindest zum Teil, auf die schlechte Performance des Warnsystems bei Abbiegeszenarien zurückzuführen ist. Dieses wiederum ist insbesondere den fehlenden Seitenkameras des genutzten Umgebungserfassungssystems geschuldet. Da in Bezug auf die erste Warnstufe unterschiedliche Präferenzen geäußert werden – z.B. das sehr frühe oder sehr spät bis gar nicht Einsetzen der Warnung – sollte für weitere Entwicklungen diskutiert werden, inwiefern eine Individualisierung der ersten Warnstufe (Hinweisstufe) von Seiten des Nutzers möglich sein sollte.

Bewertung der visuellen Warnkomponente

Insgesamt fallen die Bewertungen der visuellen Warnkomponente positiv aus. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass bei der Weiterentwicklung jedoch darauf geachtet werden sollte, dass die Helligkeit für alle Sicht- und Lichtverhältnisse ausreichend ist und auch die Position der LED-Leiste im Blickfeld liegt ohne dieses einzuschränken. Eine genaue Positionsanzeige könnte durch eine Innenkamera mit Blickbewegungsmessung oder Kopfpositionserkennung erreicht werden. Weitere Anmerkungen in Bezug auf das Konzept wie beispielsweise das Hochstrahlen in die Scheibe, die Integration in ein HUD oder das Blinken punktueller LED-Leuchten scheinen teilweise persönliche Präferenzen widerzuspiegeln. Hierbei ist auf die Literatur sowie auf Beobachtungen während des Prototypbaus hinzuweisen, wobei z.B. das Hochstrahlen in die Scheibe wegen Reflektionen vermieden wurden. Ein HUD stellt ein alternatives Konzept dar, welches im Rahmen dieses Projektes zugunsten der LED-Leiste nicht weiterverfolgt wird. Die LED-Leiste besitzt gegenüber einem HUD den Vorteil, dass sie (auch durch Erweiterungen in Türbereiche) über eine große Breite Gefahrenpositionen lokalisiert anzeigen kann.

Bewertung der akustischen Warnkomponente

Aus den Aussagen der Probanden zur Bewertung der akustischen Warnkomponente können folgende Schlüsse gezogen werden: Die Lautstärke des Tones sollte zu einem gewissen Grad individuell einstellbar sein, sich aber auch dynamisch an den Lautstärkepegel im Auto anpassen. Es muss dabei gewährleistet werden, dass der Ton für jeden Fahrer und in jeder Situation gut hörbar ist. Bei der Art des Tones ist auf eine geeignete Integration des Warnsystems in vorhandene Systeme sowie hinsichtlich markenspezifischen Sounddesigns zu achten. Es bleibt zu diskutieren, ob der Ton selbst einen Hinweis auf die Natur des Warnobjektes geben sollte oder nicht. In der Literatur (siehe Kapitel 2.1) sowie bei dem im Prototyp präsentierten Ton zeigen sich unterschiedliche Präferenzen der Probanden. Derartige Präferenzunterschiede sind auch in Verbindung mit dem Zeitpunkt der akustischen Warnung zu beobachten. Bei der Weiterentwicklung sollten dies berücksichtigt werden und verschiedene Varianten in Betracht gezogen werden. Diese sind in weiteren Probandentests und -befragungen zu evaluieren, wobei verschiedene Use Cases wie z.B. Stadtverkehr mit erhöhtem VRU-Aufkommen abgedeckt werden sollten.

Bewertung der Warnung als Kombination akustischer und visueller Warnkomponente

Das Konzept der visuellen und akustischen Warnung wird von der Mehrheit der Probanden sehr positiv bewertet. Die Vorteile des Systems sehen die Probanden vor allem in der Positionsanzeige, den Abstufungen der Warnung und dem resultierenden Sicherheitsgewinn. Wie auch im vorigen Fragenblock wird deutlich, dass die Probanden – möglicherweise der Stichprobenauswahl aus Daimlermitarbeitern geschuldet – einen hohen Wert auf die Integration des Systems in (markenspezifische,) bestehende Systeme legen. Die sinnvolle Integration in

bestehende Systeme ist neben persönlichen Präferenzen aber auch aus Gründen der kognitiven Kapazitäten zur Einordnung und Unterscheidung verschiedener Signale anzustreben. Auch die Anmerkungen der Probanden zum Wunsch einer Ergänzung um eine haptische Komponente sowie eine Erweiterung in den Türbereich deckt sich mit dem in Kapitel 3 vorgestellten angestrebten Warnkonzept und festigt damit dieses Konzept.

Nutzungsbereitschaft

Insgesamt fällt die im Interview angegebene Nutzungsbereitschaft hoch aus. Trotz des frühen Prototypstatus weist diese Bewertung eine sehr positive Tendenz auf. Die Kommentare zeigen zudem, dass die Zuverlässigkeit des Systems sowie die Tauglichkeit des Systems in Situationen wie im Stadtverkehr oder auf Parkplätzen von größter Wichtigkeit für den Fahrer sind und damit eine zentrale Rolle in der weiteren Entwicklung spielen sollten. Dies wird zudem durch die freien Kommentare der Probanden zu Ende des Interviews gestützt.

5.1.6 Zusammenfassung

Nach Auswertung der Fragebögen und des Interviews kann eine Vielzahl an Empfehlungen für die Weiterentwicklung des Warnkonzeptes in potentielle nächste Phasen übernommen werden. Das Interview erweist sich zudem als sehr wertvoll, um Themenbereiche abzugrenzen, die von der ausgewählten Probandengruppe als ähnlich bewertet werden und um Bereiche aufzudecken, bei denen offenbar die persönliche Präferenz eine große Rolle spielt.

Die Ergebnisse der Fragebögen zeigen, dass vor allem das Vertrauen in das getestete Warnsystem gering ist. Dieses kann – gestützt durch die Beobachtungen im Zwischenfragebogen – durch eine Verbesserung der Systemzuverlässigkeit erreicht werden. Auch kann eine bessere Erkennungsleistung zusammen mit einer zeitpunktoptimierten Anzeige die Angemessenheit der Warnungen in den jeweiligen Situationen nachhaltig verbessern.

Insgesamt wird das Warnkonzept als Kombination aus einer akustischen und einer visuellen Komponente positiv aufgefasst, wobei vor allem der Richtungshinweis der LED-Leiste positiv hervorgehoben werden kann.

Den Anmerkungen der Probanden nach könnte dieses System sinnvoll um eine haptische Komponente z.B. im Lenkrad ergänzt werden. Bei der Weiterentwicklung der LED-Leiste sollte der Fokus auf die Integration in das Gesamtkonzept sowie auf die Sichtbarkeit gelegt werden. Letztere wird im Wesentlichen durch Lichtbedingungen, Helligkeit und die Position beeinflusst. In höheren Prototypstadien sollte zudem auf eine Anpassung der Richtungshinweise an den Fahrer bzw. an dessen Position z.B. durch Blickbewegungsmessung geachtet werden. Eine Erweiterung der Warnanzeige auf die Türenbereiche sollte – bestärkt nach einer diesbezüglichen Äußerung eines Probanden (3) – weiterhin mitgedacht werden.

Bei der Gestaltung und dem Zeitpunkt der ersten Warnstufe sind interindividuelle Unterschiede deutlich geworden. Diese Unterschiede unterstreichen die Unverzichtbarkeit des Einbezugs der zukünftigen Nutzer, wobei das aus der Literatur entstandene Warnkonzept den Rahmen der Gestaltungsfreiheit bilden sollte.

Aus den Aussagen der Probanden wird außerdem deutlich, dass der verwendete Warnton eine Überarbeitung erfordert. Eine Mitbetrachtung vorhandener Systeme zur Integration erscheint dafür sinnvoll.

Zuletzt ist festzustellen, dass zwar die Nutzungsbereitschaft eines solchen Warnsystems durch die Probanden hoch wäre, diese jedoch eng mit der Systemzuverlässigkeit verknüpft zu sein scheint.

5.2 Verbesserungspotential

Nach abgeschlossener Evaluationsphase sollen das Verbesserungspotential für den entwickelten Prototyp zusammengefasst werden.

Die im Rahmen der Evaluation abzuleitenden Gestaltungsempfehlungen ergeben sich aus den Aussagen der Probanden während des Interviews sowie aus deren Kommentaren während des gesamten Versuchs. Zudem helfen die Ergebnisse aus dem Zwischen- und Abschlussfragebogen bei der Aufdeckung von Schwachstellen. Im Folgenden sollen daher nun diese Ergebnisse hier zusammengefasst werden. Des Weiteren wird auf das Verbesserungspotential des Prototyps eingegangen, welches durch das Projektteam während der Entwicklung und Integration beobachtet werden konnte.

5.2.1 Ergebnisse aus der Evaluation

Zu Beginn sollte erneut darauf hingewiesen werden, dass die Stichprobe aus eher erfahrenen Fahrern besteht, welche mit der Automobilbranche vertraut sind. Daher könnte ein Transfer der Ergebnisse nur eingeschränkt auf die Allgemeinbevölkerung vorgenommen werden. Aufgrund der Erfahrung der Probanden ist es jedoch möglich, diese als Expertengruppe aufzufassen, womit deren Bewertungen und Aussagen eine hohe Relevanz erfahren.

Systemzuverlässigkeit und Erkennungsleistung

Die Ergebnisse des Zwischenfragebogens und Interviewaussagen zeigen, dass das Warnsystem deutlich schlechtere Bewertungen in allen Bewertungskriterien erhalten hat, wenn das System mehr Ausfälle oder Verzögerungen zeigte. Dies lässt den Schluss zu, dass die Systemzuverlässigkeit und die Erkennungsleistung auf alle Bewertungskriterien einen hohen Einfluss ausüben und wegen seiner Bedeutung im Fokus der Weiterentwicklung stehen

sollten. Auch unter Berücksichtigung der Sicherheitsperspektive ist eine hohe Systemzuverlässigkeit mit geringer Fehlerquote anzustreben.

Vertrauen

Beim Vergleich der deskriptiven Ergebnisse des Zwischen- und Abschlussfragebogens zu den einzelnen Bewertungskriterien zeigen sich die schlechtesten Ergebnisse beim Vertrauen in das Warnsystem. Die Ergebnisse aus dem Zwischenfragebogen sowie Anmerkungen einzelner Probanden stützen die These, dass die Systemzuverlässigkeit maßgeblich für diese Bewertung ist. Nichtsdestotrotz sollte bei der Weiterentwicklung ein besonderes Augenmerk auf das Vertrauen der Nutzer in das Warnsystem gelegt werden, um gegebenenfalls andere Einflüsse auf das Vertrauen aufzudecken.

Zeitpunkt der Warnung

Des Weiteren sollte auch die Angemessenheit der Warnungen in Bezug auf die Kritikalität und den Zeitpunkt der Warnungen weiterhin im Fokus der Weiterentwicklung stehen. Dies wird insbesondere bei der Betrachtung komplexerer Use Cases wie z.B. im Innenstadtbereich mit vielen VRUs eine wichtige Rolle spielen. Den Fragebogenergebnissen und Interviewausagen zufolge sollte die Warnung tendenziell früher geschaltet werden.

Adaptierbarkeit

Die erste, also die hinweisende Warnstufe hat kontroverse Meinungen ausgelöst und sollte nach Wunsch einiger Probanden anpassbar sein. Hier ist zu überlegen, ob eine individuelle Einstellung möglich wäre. Es wäre jedoch eher eine bessere Lösung, das Sicherheitssystem nicht individuell anpassbar zu machen, sondern situativ anzupassen. So könnte die erste Warnstufe bei einem erhöhten VRU-Aufkommen dezenter gestaltet werden, um Störungen und Ablenkungen zu vermeiden.

Des Weiteren sollten die Sichtbarkeit der visuellen Warnkomponente und Hörbarkeit der akustischen Warnkomponente durch dynamische Anpassung der Helligkeit bzw. der Lautstärke an die Umgebungsverhältnisse verbessert werden. Auch eine individuelle Einstellung z.B. für Nutzer mit Hörbeeinträchtigungen ist zu erwägen. Wünschenswert wäre, dass die Lokalisierung der VRUs an die jeweilige Kopfposition des Fahrers angepasst wird. Dies könnte durch eine Innenkamera erreicht werden.

Visuelle Warnkomponente

Die visuelle Warnkomponente ist in Hinblick auf die Sichtbarkeit zu verbessern. Dies betrifft neben der oben genannten Helligkeit der LED-Leiste auch die Position der Leiste, welche im Sichtfeld aller Nutzer mit ihren individuellen Sitzeinstellungen liegen sollte ohne dieses einzuschränken. Um die Effektivität des Warnsystems zu erhöhen sollte zudem die LED-Leiste auch in die Türbereiche vorne erweitert werden. Auf diese Weise würde auch ein Totwinkelassistent integriert werden können.

Akustische Warnkomponente

Bezüglich der Art des Tones kann nach dieser Evaluation keine endgültige Aussage getroffen werden. Während einige Probanden den Ton als gut und passend empfinden, da er auf den VRU selbst hindeute, nennen andere Probanden Assoziationen, die nicht zum Verkehrskontext gehören oder empfinden den Ton als unpassend für Daimler. Im Sinne der Integration des Warnsystems in bestehende Systeme ist allerdings die Verwendung bestehender Warn-töne denkbar. Dies minimiert zudem die Anzahl unterschiedlicher Signale und Bedeutungen für den Fahrer, welches insbesondere in sicherheitskritischen Situationen anzustreben ist.

Haptische Warnkomponente

Das Warnkonzept als Ganzes wurde weitgehend positiv bewertet, würde jedoch laut Probandenanmerkungen sinnvoll durch eine haptische Komponente ergänzt werden, welche nach Bengler et al. (2018) ab der dritten Warnstufe aktiv werden könnte.

5.2.2 Form und Gestalt des Prototyps

Seiner niedrigen Entwicklungsstufe entsprechend besteht der Prototyp aus einem groben Aufbau aus verschiedenen Materialien. Da kein genaues CAD-Modell des Forschungsträgers zur Verfügung steht, war es nicht möglich einen passgenauen Prototyp für die LED-Leiste vorzufertigen. Als Lösung wurde durch eine Fotokartonstruktur flexibles Material gewählt, welches in Einzelteilen auf verschiedene Neigungen des Armaturenbretts und der Windschutzscheibe angepasst werden konnte. Aufgrund unterschiedlicher Neigungen der Windschutzscheibe hat der Prototyp unterschiedliche Öffnungsweiten, über welche das LED-Licht indirekt vom Fahrer wahrgenommen werden kann. Diese Öffnungen sollten auch mit Blick auf den Sichtwinkel des Fahrers über die gesamte Breite gleichmäßig gestaltet werden. Dies würde mit einem genauen Modell der Autoausstattung möglich sein, z.B. in Form eines 3D-Drucks eines Prototyps. Der weiße Fotokarton erfüllt zufriedenstellend den Zweck der Lichtdiffusion und kann auch bei weiteren Prototypen eingesetzt werden. Dennoch sollte mit voranschreitenden Entwicklungsstadien angestrebt werden, die Zahl unterschiedlicher Materialien (aktuell: Lederimitat, weißer Fotokarton, lichtschluckender Stoff) zu reduzieren, damit ein integrierbare und qualitativ hochwertiger Prototyp entsteht.

5.2.3 Systembedingte Delays

Durch die Verschaltung und Umleitung der Signale werden zudem Delays in unbekanntem Ausmaß verursacht, welche die Warnungen leicht zeitlich versetzt zu den Fußgängerpositionen erscheinen lassen. In dem vorliegenden Prototyp werden die Fußgänger als Bounding Boxes im Computer des Forschungsträgers durch die Erkennungssoftware berechnet. Im MacBook werden die Daten zur Berechnung der Kritikalität, der Position des LED-Streifens, der Lokalisierung des auditiven Signals und der Ansteuerung des Sounds genutzt. Die Ansteuerung der LED-Leiste erfolgt dann wiederum über den Arduino. Durch eine effizientere Verschaltung könnten auch die Delays verringert werden.

5.2.4 Abschließende Anmerkungen zur Verbesserung

Es ist darauf hinzuweisen, dass dieser Prototyp im jetzigen Entwicklungsstadium unvollständig und nur bedingt in das Forschungsfahrzeug integriert ist. Während bereits in Kapitel 3.2 die Einbindung einer weiteren visuellen Komponente im Display des Kombiinstrumentes sowie einer haptischen Komponente favorisiert wird, konnte dies im Rahmen des Projektes nicht realisiert werden. Zudem führen Mängel in der Erkennungsleistung und Zuverlässigkeit des Umgebungserfassungssystems sowie Delays, verursacht durch die Integration des Prototyps, zu einer verminderten Funktionsfähigkeit. Diese schlägt sich wie bereits oben beschrieben in den Bewertungen nieder. Aufgrund der Betrachtung des simplen Use Cases eines einzigen VRUs sind die Bewertungen der Probanden auch nur auf diesen Use Case einzuschränken. Weitere Verbesserungsvorschläge und Anmerkungen sind bei einer Erweiterung der Use Cases und auch bei einer Weiterentwicklung des Warnsystems zu erwarten.

5.3 Limitierung

Die Ergebnisse der Evaluation lassen einen wertvollen Einblick in die Eignung und Optimierungsmöglichkeiten des konzipierten Warnsystems sowie zu. Nichtsdestotrotz sind die Ergebnisse nur unter bestimmten Einschränkungen zu betrachten.

5.3.1 Limitierungen der Evaluation

Die gewählte Methode der Evaluation schließt keine Vergleichs- oder Kontrollbedingungen z.B. in Form von bereits implementierten Warnsystemen mit ein. Daher ist keine Schätzung des Wertpotentials des Warnsystems möglich und die Ergebnisse sind hauptsächlich deskriptiv und qualitativ zu bewerten.

Durch die Rahmenbedingungen weist die Stichprobe in ihren Nutzereigenschaften nur eine sehr kleine Variabilität auf, weshalb die Ergebnisse nicht uneingeschränkt auf die gesamte Nutzerpopulation übertragen werden können. Auch der eher kurze Zeitumfang, in dem das Warnsystem durch die Probanden genutzt wurde, ist hier herauszustellen. Faktoren wie Vertrauen in das System oder das gestört oder genervt Fühlen können erst in längeren Test- und vor allem Praxisphasen robust erhoben werden.

Die Anzahl und die Variabilität der getesteten Szenarien sind vor allem aufgrund der Sicherheitsvorgaben nur sehr gering. Die Ergebnisse sind daher auch vor dem Hintergrund der Szenarien mit lediglich einem Statisten als Fußgänger zu betrachten.

5.3.2 Limitierungen des Prototyps

Zunächst ist festzuhalten, dass das getestete Warnsystem lediglich in Form eines Prototyps vorliegt und deutlich als solcher erkennbar ist. Der Prototyp funktioniert mit Blick auf dynamische Anpassungen z.B. der Lautstärke oder des Lokalisierungshinweises nur rudimentär. Des Weiteren fehlt dem vorliegenden Prototyp die Einbindung einer visuellen Warnkomponente im Kombiinstrument.

Die Seitenkameras des Forschungsträgers sind im Allgemeinen in das Umgebungserfassungssystem eingebunden. Während der Evaluation ist die Nutzung dieser Kameras jedoch nicht möglich gewesen, wodurch insbesondere die Abbiegeszenarios die Systemperformanz beeinträchtigt werden. Diese Mängel in der Erkennungsleistung sowie Delays, welche durch eine prototypische Integration verursacht werden, machen deutlich, dass die Ergebnisse unter Berücksichtigung des aktuellen Entwicklungsstadiums betrachtet werden müssen.

Wie bereits im vorigen Abschnitt beschrieben wird das System nicht für mehrere VRUs getestet. Wie das System sich bei erhöhtem VRU-Aufkommen verhält, also z.B. ob es sich in der Fußgängerzone in einen reduzierten Modus schaltet, ist noch festzulegen. Auch eine Anzeige des Systemzustands ist im aktuellen Prototypen nicht implementiert.

Zuletzt ist noch berücksichtigen, dass das Warnsystem im Konzept und in der Evaluation für sich stehend vorliegt. Eine Integration in vorhandene Systeme ist für ein zukunftsfähiges Warnkonzept notwendig und sollte daher auch in der Entwicklung und Evaluation mitgedacht werden.

5.4 Ausblick

Nach Abschluss des Projekts soll im Folgenden ein Ausblick gegeben werden, welche Möglichkeiten der Weiterentwicklung für das Warnkonzept sinnvoll wären und wie zukünftige Evaluationen oder Testungen des Warnkonzepts aussehen könnten.

Bezüglich des Warnsystems sollte das Konzept bzw. der Prototyp um weitere Anzeigen oder Modalitäten ergänzt werden. Dies betrifft zum einen die visuelle Anzeige im Kombidisplay, welche für die Anzeige des Systemstatus sinnvoll wäre. Zum anderen ist auch die Ergänzung um eine haptische Komponente, z.B. durch Sitzvibration oder Lenkradvibration zu erwägen.

Bei zukünftigen Testungen sollten eine hohe Systemzuverlässigkeit mit geringer Fehlerquote als Ziel angestrebt werden. Um den Mehrwert des Systems zu quantifizieren, sollte zudem in

zukünftigen Studien eine Kontrollgruppe in das Versuchsdesign miteinbezogen werden. Eine Integration des Warnkonzepts in bestehende Warnsysteme ist ebenfalls auch mit Blick auf den Warnton zu verfolgen.

Ein weiterer Schwerpunkt in der Weiterentwicklung sollte zudem auf eine Erweiterung der Use Cases gelegt werden. Im Rahmen dieses Projektes beschränken sich das Warnkonzept und die Testung auf Szenarien mit lediglich einem VRU bzw. in der Testung sogar nur einem Fußgänger. In der Weiterentwicklung könnte z.B. mithilfe von Expertenbefragungen ein Konzept für die sinnvolle Anpassung des Warnsystems für komplexere Situationen entwickelt werden. Zum Beispiel könnte die Anzeige im Kombidisplay genutzt werden, um einen Warnhinweis über ein erhöhtes VRU-Aufkommen zu schalten und daraufhin das System mindestens um die Reduzierung der Hinweisstufe temporär anzupassen. Hierdurch würden Ablenkungen und auch Störungen durch das Warnsystem z.B. im Stadtverkehr geringgehalten.

Ferner ist eine Nutzung von Teilen des entwickelten Systems auch zur Information des Fahrers bzw. der Fahrzeuginsassen bei hoch- und voll-automatisierter Fahrt denkbar. Das System könnte hierbei den Insassen kommunizieren, dass bestimmte Objekte oder auch VRUs erkannt wurden und somit „Schrecksituationen“ vermeiden. Es könnte so möglicherweise das Vertrauen in das System erhöhen (Lee & See, 2004).

Damit eignet sich das Warnsystem zusätzlich auch dazu, den Übergang vom manuellen zum automatisierten Fahren für Nutzer fließender und transparenter zu gestalten, indem durch Kommunikation der erkannten Objekte das Vertrauen in autonome Fahrzeuge gestärkt wird.

6 Fazit

Bei der im Rahmen des Projekts konzipierten, entwickelten und evaluierten Mensch-Maschine-Schnittstelle handelt es sich um ein System zur multimodalen Fahrerwarnung vor Gefahren durch bzw. für VRUs. Nach Reschka et al. (2015, S. 915) ist das System zudem als ein FVCW-System zu klassifizieren. Insgesamt soll das System die Sicherheit für VRUs im Straßenverkehr erhöhen und deren hohen Anteil von weltweit 49 % der getöteten Verkehrsteilnehmer (World Health Organization, 2015) entgegenwirken.

Im Warnkonzept sowie in der Ausgestaltung des Prototypen sind insbesondere Gestaltungsableitungen aus basalen Informationsverarbeitungsmodellen wie das von Wickens et al. (2014) als auch spezifische Gestaltungsempfehlungen wie die aus Bengler et al. (2018) angewendet. Das Konzept differenziert drei Warnstufen (Frühwarnung, Warnung, Akutwarnung), welche auf Basis der durch Sensordaten errechneten Kritikalität der Situation getriggert werden. Je nach Warnstufe werden unterschiedliche Kombinationen aus visueller und akustischer Warnung präsentiert. Der Prototyp besteht hinsichtlich der Warnkomponenten aus einer LED-Leiste mit eigens gebauter Aufhängung zur Anbringung im Fahrzeugcockpit des Versuchsträgers sowie der Ansteuerung des Fahrzeugsoundsystems zur Anzeige von Auditory Icons als akustische Warnung. Die LED-Lichtbalken sowie die Warntöne werden lokalisiert für den Fahrer dargeboten, um einen Hinweis auf die Position des Fußgängers zu geben.

Der Prototyp ist in Zusammenarbeit mit einem Team der Daimler AG aus Ulm entwickelt worden, welches sich mit der Umgebungserfassung durch Maschinelles Sehen beschäftigt. Die Zusammenarbeit ermöglicht einerseits den Zugriff auf Expertenwissen im Bereich Umgebungserfassung und andererseits die Nutzung von State of the Art Technologie im Bereich der Fußgängererkennung. Das im Versuchsträger verbaute und für den Prototyp relevante System verwendet eine Stereokamera und neuronale Netze zur Erkennung und Klassifikation von Fußgängern. Auf Basis dieser Erkennung wird die Testung des entwickelten Konzepts in einem Realversuch möglich.

Der entwickelte Prototyp wird mittels einer Testung mit 12 professionellen Testfahren auf einem Testgelände in Ulm evaluiert. Die Untersuchungsmethode (Test mit professionellen Fahrern) ist im Code of Practice (RESPONSE 3, 2006) weiter beschrieben. Schwerpunkt der Erhebung ist vorrangig die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen für die entwickelte Mensch-Maschine-Schnittstelle. Aus diesem Grund sind daher zunächst vor allem qualitative Daten relevant. Zusätzlich zu den qualitativen Daten, die in einem halbstandardisierten Interview gewonnen werden, werden Fragebögen zur Sammlung quantitativer Daten gereicht. Diese ermöglichen eine deskriptive Einschätzung der sechs Bewertungskriterien Akzeptanz und allgemeine Einstellung, Vertrauen, Nützlichkeit bzw. die Einschätzung zu Sicherheitsgewinn und Ablenkung, Usability und Verständlichkeit, Gestaltung sowie Angemessenheit in den jeweiligen Situationen.

Die Ergebnisse der Evaluation zeigen das große Potential des multimodalen Warnkonzepts hinsichtlich empfundenem Sicherheitsgewinn auf. Ebenso zeigt die Testung positive Werte für den Prototyp hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit, Verständlichkeit und kommuniziertem Informationsgehalt auf. Während des Interviews wird die Kombination aus visueller und akustischer Warnung mit Positionshinweis positiv hervorgehoben.

Änderungen an der Schnittstelle sollten allerdings im Rahmen von Ergänzungen um weitere Komponenten (z.B. visuell oder haptisch) sowie bei der Integration in bestehende Systeme, z.B. in Form des Warntons erwägt werden. Geringes Vertrauen in das System im Rahmen der Evaluation kann auf Mängel in der Erkennungsleistung und der Systemzuverlässigkeit zurückgeführt werden. Des Weiteren sollte untersucht werden inwiefern die Warnparameter adaptiv bzw. adaptierbar sein sollten, z.B. hinsichtlich Helligkeit, Lautstärke oder der Kopfposition des Fahrers.

Limitierungen der Projektarbeit entstehen vor allem aus organisatorischen Gründen sowie insbesondere aufgrund der knappen Projektlaufzeit von sechs Monaten. Dies bedingt, dass im Rahmen des Projekts eine vergleichende und quantifizierbare Evaluation des HMI mit einer Kontrollgruppe nicht möglich ist. Zudem werden aus Sicherheitsgründen die Tests des Systems auf einfache Szenarios mit lediglich einem VRU beschränkt. Weiterhin wird als VRU zugunsten der Erkennungsleistung des Umgebungserfassungssystems ausschließlich mit Fußgängern getestet.

Das entwickelte Warnkonzept liegt in einem ersten Prototyp vor, der folglich steigerungsfähig in Bezug auf Vollständigkeit, Genauigkeit und Integration ins Fahrzeug ist. Weitere Forschung sollte diese Limitierungen adressieren und das System auch in erweiterten und komplexeren Situationen durch Nutzer testen.

Zusammenfassend lässt die Projektarbeit den Schluss zu, dass ein proaktives multimodales Warnsystem Potential hat, den Fahrer frühzeitig über mögliche Gefahrensituationen zu informieren und so die Unfallzahlen mit VRUs zu senken, die Unfallzahlen mit VRUs zu senken. Mit der an die Konzeption und Entwicklung des Warnkonzepts angeschlossene Evaluation können keine quantitativen und repräsentativen Schlussfolgerungen getroffen werden. Daher steht eine Prüfung des potentiellen Mehrwerts, der durch die Weitergabe von Sensordaten von Umgebungserfassungssystemen in Form von multimodalen, lokalisierten Warnungen an den Fahrer entsteht, noch aus. Dennoch zeigen die überwiegend qualitativen Ergebnisse, dass eine Weiterverfolgung des vorgestellten Warnkonzepts vielversprechend ist.

Retrospektive Betrachtung der Projektarbeit

Entsprechend den „Spielregeln“ zum IDP sollten im Rahmen des Interdisziplinären Projekts „Methoden und Problemlösungsstrategien in einem interdisziplinär zusammengesetzten Team“ angewendet sowie wissenschaftlich gearbeitet und Erfahrungen im Projektmanagement gesammelt werden (Senner, 2017, S. 1). Im Folgenden wird das Projekt anhand der genannten Punkte retrospektiv betrachtet.

Projektmanagement

Projektverlauf

Mit dem Beginn des Wintersemesters 2017/18 startete das Interdisziplinäre Projekt (IDP) für uns in der ersten Vorlesungswoche mit dem Start des begleitenden Methodenseminars und einer Kick-Off-Veranstaltung an der TU München sowie ersten Treffen mit den Partnern von der Daimler AG in Ulm. Die ersten beiden Wochen dienten uns in erster Linie zur Konkretisierung des Projektvorhabens. Daraus resultierte mitunter der Projektplan (Abbildung 28) mit einer kurzen Beschreibung der einzelnen angedachten Projektphasen. Die sieben Phasen konnten weitestgehend erfolgreich eingehalten werden, lediglich die Integration des Prototypen in den Versuchsträger (Phase 4) wurde von allen Projektpartnern unterschätzt und nahm daher mehr Zeit in Anspruch als ursprünglich geplant. Da die Phasen jedoch überlappend und mit Pufferzeiten geplant waren, hatte dies keinen größeren Einfluss auf die anderen Arbeitspakete. Zu jeder Projektphase wurden zudem geplante Outputs definiert. Diese dienten als eine Art Meilensteine, um jeweils zum Ende eines Abschnitts überprüfen zu können, ob wir im Zeitplan liegen. Hinsichtlich des gesamten Projektablaufs sind wir rückblickend äußerst zufrieden. Für die Evaluationsphase hätten wir uns etwas mehr Zeit gewünscht, um etwa auch sich ergebende Optimierungsvorschläge einzuarbeiten. Dies war jedoch aus organisatorischen und zeitlichen Einschränkungen leider nicht möglich.

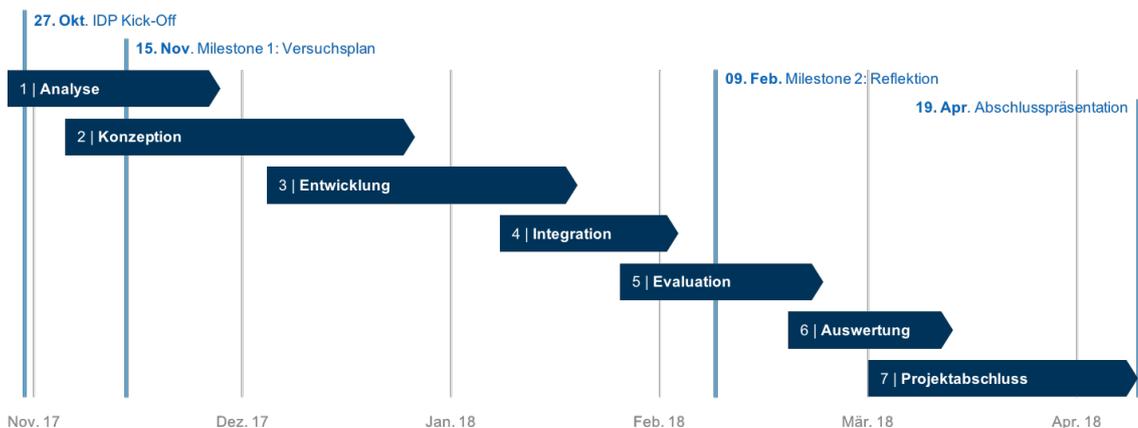


Abbildung 28 Projektplan

Sicherlich (auf Basis vorhergehender Projekte) hätten wir uns eine strukturierte Arbeitsweise über kurz oder lang auch ohne den Kick-Off angeeignet. Allerdings half die Veranstaltung rückblickend betrachtet beträchtlich, den organisatorischen Teil unter strukturierter und kompetenter Leitung relativ schnell zu definieren. Dies sparte somit Zeit und ermöglichte einen schnelle Fokussierung auf thematische Inhalte des Projekts.

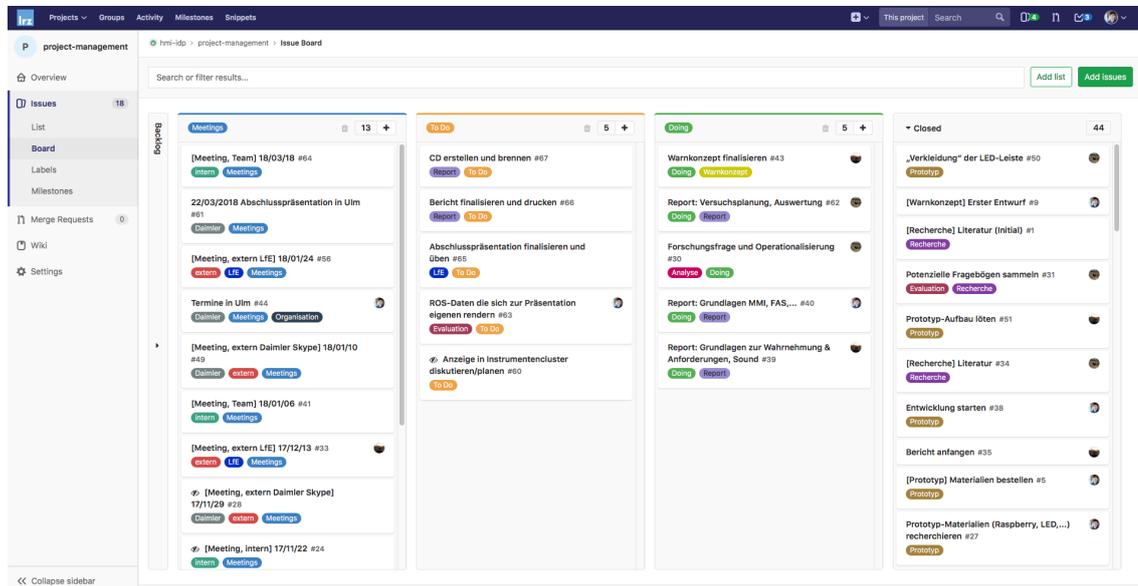


Abbildung 30 Kanban Board auf Gitlab

Betreuung am Lehrstuhl für Ergonomie

Die Projektbetreuung unseres studentischen Teams am Lehrstuhl für Ergonomie erfolgte durch Herrn Christian Lehsing. Dieser hatte immer ein offenes Ohr für Fragen unsererseits, unterstützte uns zudem mit hilfreichen Anregungen durch die Einnahme der Perspektive eines Externen oder half mit gelegentlichen Hinweisen zu weiterführenden Punkten. Insbesondere schätzen wir seiner Betreuung, dass er uns hinsichtlich des Projektmanagements und der Abstimmungen mit ihm Vertrauen schenkte und die Organisation uns überließ.

Durch das Methodenseminar erhielten wir zudem nebst interessanten inhaltlichen Aspekten wertvollen Input durch die Meilenstein-Präsentationen. Der dabei stattfindende Austausch mit anderen Projektgruppen gab zusätzlich zu dem Erhalt von qualifizierten Feedback zum eigenen Projekt, sehr gute Einblicke in die Projekte, Arbeitsweise und Erfahrungen anderer Gruppen.

Zusammenarbeit mit der Daimler AG

Die Projektpartner der Daimler AG in Ulm beschäftigen sich vorrangig mit der Entwicklung von Systemen zur Umgebungserfassung mittels kamerabildbasierter Sensorsysteme und neuronaler Netze. Ein besonderer Schwerpunkt ist dabei die Erkennung von Fußgängern und Radfahrern. Die Zusammenarbeit entstand aus einem informellen persönlichen Gespräch mit Fabian Flohr, einem projektverantwortlichen Entwicklungsingenieur in Ulm. Die am Anfang noch eher unkonkrete Idee zur Entwicklung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle, welche die er-

fassten Objektdaten des Versuchsträgers zur Fahrerwarnung nutzt, wurde in darauffolgenden Gesprächen konkretisiert und schließlich als IDP-Projektvorschlag eingereicht.

Die Zusammenarbeit im Rahmen des Projekts kann rückblickend als äußerst positiv bewertet werden. Unsere Expertise im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion wurde von den Projektpartnern aus Ulm stets sehr geschätzt. Nicht zuletzt hatten wir aus dem Grund bei der Gestaltung der Schnittstelle alle gewünschten Freiheiten, ohne einschränkende Vorgaben. Neben Fabian Flohr, welcher hauptsächlich als Projektleiter fungierte, arbeiteten wir insbesondere mit dem Doktoranden Sebastian Krebs zusammen. Dieser unterstützte uns bei der Entwicklung und insbesondere bei der Integration des Prototyps ins Versuchsfahrzeug.

Während des Projekts lernten wir auch die eher nachteiligen Seiten eines großen Industriekonzerns kennen. Teilweise waren Abstimmungen sehr zeitaufwendig und Bearbeitungswege lang, wodurch wir als externer Partner abhängig von unternehmensinternen Abläufen wurden. Durch das Projekt war es uns allerdings möglich, für unser IDP einen Realfahrzeug-Versuchsträger mit Umgebungserfassungssystem nach aktuellem Stand der Technik zu nutzen. Eine Chance, die für uns die nachteiligen Aspekte und den Mehraufwand an Organisation in den Schatten stellte.

Interdisziplinäre Zusammenarbeit

Projektteam

Hinsichtlich der Projektaufgabe konnte die Teamzusammenstellung als gute Konstellation bezeichnet werden. Nebst dem im Rahmen des Masterstudiums angeeigneten Wissen hatten wir durch unsere Bachelorstudiengängen aus den Bereichen Psychologie, Wirtschaftspsychologie und Medienkonzeption sowie jeweiliger diverser Berufserfahrungen eine sehr breit aufgestellte Wissensbasis. Zusätzlich zu theoretischen Inhalten können hier insbesondere konkrete Vorerfahrungen in den Bereichen Gestaltung und Entwicklung von Nutzerschnittstellen sowie in der Versuchsplanung und -durchführung angegeben werden. Hinsichtlich der technischen Entwicklung (und letztlich auch Integration in das Realfahrzeug) hatten wir alle ein fundiertes Grundwissen, wurden jedoch in diesen Projektphasen sehr gefordert, was rückblickend betrachtet zwar anstrengend aber äußerst förderlich war.

Erfahrungen und Learnings

Im Folgenden sind zusammenfassend die wesentlichen Erfahrungen und Learnings des Projektteams aufgelistet. Diese sind grob in die Abschnitte Technologie und Teamarbeit strukturiert. Letzterer fokussiert vor allem auf die Punkte, die aus unserer Sicht als Teammitglieder entscheidend für eine erfolgreiche Teamarbeit sind. Einen Großteil der aufgeführten Punkte konnten wir während des Projektverlaufs gut einhalten, doch bleibt es nicht aus, dass gelegentlich der ein oder andere Punkt erneut bewusst gemacht werden muss.

Technologie

- Mensch-Maschine-Interaktion in Fahrerassistenzsystemen
- Einblicke in industrielle Forschung im Bereich Fahrerassistenzsysteme
- Verständnis für bildbasierte Umgebungserfassung und neuronale Netze mit Anwendungsfokus auf Fußgängererkennung
- Elektrotechnik: Prototyping, Stromkreise, Löten
- Paper-Prototyping im Automobil
- Programmierung von Python und C/C++
- Nutzung von Arduino Uno und Raspberry Pi zu Ansteuerung von LED-Streifen
- Versuchsplanung und -durchführung mit Realfahrzeug
- Mit Versuchen im Realfahrzeug verbundene Sicherheitsvorkehrungen

Teamarbeit

- Persönliche Treffen in gewisser Regelmäßigkeit sind wichtig für Teamzusammenhalt, Projektmanagement und Planung
- Längere Treffen sollten aus Fokus-Phasen und Pausen bzw. „Off-Topic“-Phasen bestehen. In letzterer können nicht projektrelevante Dinge besprochen werden, wodurch sich die Arbeitseffizienz in den Fokus-Phasen spürbar steigert.
- Pflege der Projektmanagement-Tools und regelmäßige Kommunikation über gewählte Kanäle ist essentiell für eine erfolgreiche Zusammenarbeit
- Für eine gute Arbeitsatmosphäre sollte für das leibliche Wohl gesorgt werden
- Erwartungen sollten klar kommuniziert werden, wobei jedoch Rücksicht auf die jeweilige (persönliche) Situation anderer Teammitglieder genommen werden sollte
- Einhalten von Terminen und gesetzter Zeitfristen ist wichtig, Verspätungen bzw. Abweichungen sollten so früh wie möglich kommuniziert werden
- Kritik sollte nicht auf persönlicher Ebene geübt und ausgelegt werden, stattdessen sollte eher Kompromissbereitschaft angestrebt werden
- Stärken und Schwächen der Teilnehmer sollten klar und offen kommuniziert werden, um ggf. Einzel- und Teamarbeit jeweils dort anzusetzen, wo es entsprechend der aktuellen Projektsituation sinnvoll ist

Abschließende Worte

Zusammenfassend handelte es sich bei unserem IDP um ein äußerst förderliches und forderndes Projekt mit einem sehr spannenden Thema, einer tollen Teamkonstellation und super Betreuung. Einige äußerst intensive Phasen (insbesondere vor und während Versuchsdurchführung sowie bei Projektabschluss) mit Höhen und Tiefen, aber auch viel Spaß und gutem Zusammenhalt führten zu einem schönen Ergebnis, auf das wir sehr stolz sind.



Abbildung 31 Ein abschließendes Gruppenbild mit LED

Literatur

- Akamatsu, M., Green, P. & Bengler, K. (2013). Automotive Technology and Human Factors Research: Past, Present, and Future. *International Journal of Vehicular Technology*, 2013, 1–27. doi:10.1155/2013/526180
- Arndt, S. (2011). *Evaluierung der Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen Modell zum Kaufverhalten von Endkunden* (1. Aufl.). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Assmann, E. (1985). *Untersuchung über den Einfluss einer Bremsweganzeige auf das Fahrverhalten* (Diss., Technische Universität München). Zugriff unter <http://www.worldcat.org/title/untersuchung-uber-den-einfluss-einer-bremsweganzeige-auf-das-fahrverhalten/oclc/722269313>
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6), 775–779. doi:10.1016/0005-1098(83)90046-8
- Baum, H., Kranz, T. & Westerkamp, U. (2010). *Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland Berichte der*.
- Bengler, K., Dietmayer, K., Färber, B., Maurer, M., Stiller, C. & Winner, H. (2014). Three Decades of Driver Assistance Systems Review and Future Perspectives. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 6(October), 6–22.
- Bengler, K., Drüke, J., Hoffmann, S., Manstetten, D. & Neukum, A. (2018). *UR:BAN Human Factors in Traffic* (K. Bengler, J. Drüke, S. Hoffmann, D. Manstetten & A. Neukum, Hrsg.). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-15418-9
- Bibby, K. S., Margulies, F., Rijnsdorp, J. E., Withers, R. M. J. & Makarow, I. M. (1975). Man's role in control systems. *6th IFAC Congress Boston*, 664–683.
- Brooke, J. (1996). SUS - A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*, 189(194), 4–7.
- Bubb, H. (2015). Automobilergonomie – Einführung. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen & M. Vollrath (Hrsg.), *Automobilergonomie* (S. 1–26). Wiesbaden: Springer Fachmedien. doi:10.1007/978-3-642-13505-7
- Bubb, H., Bengler, K., Breuninger, J., Gold, C. & Helmbrecht, M. (2015). Systemergonomie des Fahrzeugs. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen & M. Vollrath (Hrsg.), *Automobilergonomie* (Kap. 6, S. 259–344). Wiesbaden: Springer Fachmedien. doi:10.1007/978-3-8348-2297-0
- Buld, S., Tietze, H. & Krüger, H.-P. (2005). Auswirkungen von Teilautomation auf das Fahren. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung* (S. 161–187). Berlin Heidelberg: Springer Fachmedien.
- Campbell, J. L., Richard, C. M., Brown, J. L. & McCallum, M. (Hrsg.). (2007). *Crash warning system interfaces: Human Factors insight and lessons learned* (Techn. Ber. Nr. HS 810 697). National Highway Traffic Safety Administration.
- de Rosario, H., Louredo, M., Díaz, I., Soler, A., Gil, J. J., Solaz, J. S. & Jornet, J. (2010). Efficacy and feeling of a vibrotactile Frontal Collision Warning implemented in a haptic

- pedal. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 13(2), 80–91. doi:10.1016/j.trf.2009.11.003
- Diederichs, F., Brouwer, N., Klöden, H., Zahn, P. & Schmitz, B. (2018). Application of a Driver Intention Recognition Algorithm on a Pedestrian Intention Recognition and Collision Avoidance System. In *UR:BAN Human Factors in Traffic* (S. 267–284). Wiesbaden: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-658-15418-9{_}14
- Donges, E. (1982). Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automob-Ind*, 27(2).
- Donges, E. (2012). Fahrerverhaltensmodelle. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 15–23). Wiesbaden: Springer Fachmedien. doi:10.1007/978-3-8348-8619-4
- Drüke, J., Semmler, C. & Bendewald, L. (2018). The “HMI tool kit” as a Strategy for the Systematic Derivation of User-Oriented HMI Concepts of Driver Assistance Systems in Urban Areas. In *UR:BAN Human Factors in Traffic* (Kap. 4, S. 53–74). Wiesbaden: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-658-15418-9{_}4
- ELK. (o.D.). *LED - Beleuchtung*. ELK. Zugriff unter <https://www.bappu.de/service/downloads/service-1/hintergrundinformationen/31-bappu-evo-und-led-beleuchtung/file>
- ELK. (2017). *BAPPU-evo Übersicht*. ELK-GmbH Ingenieurbüro für Elektronik. Krefeld. Zugriff unter <https://www.bappu.de/service/downloads/produktinformationen/bappu-evo-2>
- Endsley, M. R. (1988). Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 32(2), 97–101. doi:10.1177/154193128803200221
- Europäische Union. (2010). Richtlinie 2010/40/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Juli 2010 zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern. *Amtsblatt der Europäischen Union*, 1–13. doi:COM(2010)389final
- Eysel, U. (2011). Sehen und Augenbewegungen. In R. F. Schmidt, F. Lang & M. Heckmann (Hrsg.), *Physiologie des Menschen* (S. 345–385). Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Flemisch, F., Kelsch, J., Löper, C., Schieben, A. & Schindler, J. (2008). Automation spectrum , inner/outer compatibility and other potentially useful human factors concepts for assistance and automation. *Human Factors for Assistance and Automation*, (2008), 1–16.
- Flohr, F., Dumitru-guzu, M., Kooij, J. F. P. & Gavrilă, D. M. (2014). A Probabilistic Framework for Joint Pedestrian Head and Body Orientation Estimation. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, (4), 622.
- Fricke, N. (2009a). *Gestaltung zeit- und sicherheitskritischer Warnungen im Fahrzeug* (Diss., Technische Universität Berlin). Zugriff unter http://opus4.kobv.de/opus4-tuberlin/frontdoor/deliver/index/docId/2188/file/fricke_nicola.pdf

- Fricke, N. (2009b). Warn- und Alarmsounds im Automobil. In G. Spehr (Hrsg.), *Funktionale Klänge. Hörbare Daten, klingende Geräte und gestaltete Hörerfahrungen* (Kap. 2, S. 45–64). Bielefeld: transcript.
- Fricke, N., Glaser, C. & De Filippis, M. (2006). Passive und Aktive Sicherheitsmaßnahmen im Kraftfahrzeug. *MMI-Interaktiv*, 10(10), 39–47.
- Gasser, T. M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., ... Vogt, W. (2012). *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung*. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Bergisch Gladbach.
- Gasser, T. M., Seeck, A. & Smith, B. W. (2015). Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (3. Aufl., Kap. 3, S. 27–54). Wiesbaden: Springer Fachmedien. doi:10.1007/978-3-658-05734-3{_}3
- Gold, C., Damböck, D., Lorenz, L. & Bengler, K. (2013). Take Over! How Long Does It Take To Get the Driver Back Into the Loop? *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 57th Annual Meeting, 1938–1943*. doi:10.1177/1541931213571433
- Goldstein, E. B. (2008). *Wahrnehmungspsychologie* (7. Auflage) (H. Irtel, Hrsg.). Heidelberg: Springer.
- Golias, J., Yannis, G. & Antoniou, C. (2002). Classification of driver-assistance systems according to their impact on road safety and traffic efficiency. *Transport Reviews*, 22(2), 179–196. doi:10.1080/01441640110091215
- Götz, M. (2007). *Die Gestaltung von Bedienelementen unter dem Aspekt ihrer kommunikativen Funktion* (Diss., Technische Universität München). Zugriff unter <https://www.deutsche-digitale-bibliothek.de/binary/MK2MAW5JW6L5JCXZBAY3FAWDOMQMFA6P/full/1.pdf>
- Götze, M. & Bengler, K. (2015). Urban Driving: Where to Present What Types of Information – Comparison of Head-Down and Head-Up Displays. In S. Yamamoto (Hrsg.), *Human Interface and the Management of Information. Information and Knowledge in Context* (Bd. 9173, S. 190–200). Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-20618-9
- Götze, M., Bißbort, F., Petermann-Stock, I. & Bengler, K. (2014). A careful driver is one who looks in both directions when he passes a red light Increased demands in urban traffic. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Bd. 8522 LNCS, PART 2, S. 229–240). doi:10.1007/978-3-319-07863-2{_}23
- Götze, M., Ruff, F. & Bengler, K. (2015). Optimal Information Output in Urban Traffic Scenarios: An Evaluation of Different HMI Concepts. *Procedia Manufacturing*, 3(Ahfe), 739–746. doi:10.1016/j.promfg.2015.07.317
- Harloff, H. (2018). Man hätte als Fahrer keine Chance gehabt. Zugriff unter <http://www.sueddeutsche.de/auto/uber-unfall-in-arizona-man-haette-als-fahrer-keine-chance-gehabt-1.3916705>

- Hart, S. G. & Lowell, E. S. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. *Advances in Psychology*, 52, 139–183. doi:[https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Knoll, P. (2015). Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 659–673). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Kondzior, M. (2018). Akzeptanzskala. Zugriff unter http://www.hfes-europe.org/accept/accept_de.htm
- Kooij, J. F. P., Schneider, N., Flohr, F. & Gavrilu, D. M. (2014). Context-based Pedestrian Path Prediction. *Lecture Notes in Computer Science*, 8694, 618–633. doi:10.1007/978-3-319-10599-4{_}40
- Kraiss, K.-F. (1998). Benutzergerechte Automatisierung - Grundlagen und Realisierungskonzepte. *Automatisierungstechnik*, 46, 457–467.
- Lachenmayr, B. (2006). Gesichtsfeld und Verkehr. *Der Ophthalmologe*, 103(5), 373–381. doi:10.1007/s00347-005-1268-5
- Lee, J. D. & See, K. a. (2004). Trust in automation: designing for appropriate reliance. *Human factors*, 46(1), 50–80. doi:10.1518/hfes.46.1.50.30392
- Mackworth, N. H. (1976). Stimulus Density Limits the Useful Field of View. In *Eye movements and psychological processes* (S. 307–321). Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Maurer, M. (2012). Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. doi:10.1007/978-3-8348-9977-4
- Otte, D., Jänsch, M. & Haasper, C. (2012). Injury protection and accident causation parameters for vulnerable road users based on German In-Depth Accident Study GIDAS. *Accident Analysis & Prevention*, 44(1), 149–153.
- Parasuraman, R. & Riley, V. (1997). Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 39(2), 230–253. doi:10.1518/001872097778543886
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B. & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*. 30(3), 286–297. doi:10.1109/3468.844354
- Pauzie, A. (2008). A method to assess the driver mental workload: the driving activity load index (DALI). *IET Intell Transp Syst*, 2(4), 315–322. doi:10.1049/iet-its
- Petermann-Stock, I. (2013). *Projekt: Mensch im Verkehr - 1. Meilensteinbericht (Q4) - MMI AP1000: MMI Baukasten - Strategie zur systematischen Ableitung von MMI Konzepten*. UR:BAN. Garching.
- Petermann-Stock, I. & Werneke, J. (2014). *UR:BAN Projekt : Mensch im Verkehr – 2. Meilensteinbericht (Q8) Teilprojekt: Stadtgerechte Mensch-Maschine-Interaktion - MMI AP 2000: Entwurf; AP 3000: Test & Evaluation*. UR:BAN. Wolfsburg.
- Prenzel, M. & Rausch, H. (2013). Ergonomie für Schulen. *Ergonomie aktuell*, 4–7.
- PROSPECT. (2016). *PROSPECT Deliverable No. D2.1 Accident Analysis, Naturalistic Observations and Project Implications* (Techn. Ber. Nr. 634149).

- Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., ... Mg, A. (2009). ROS: an open-source Robot Operating System. *Icra*. Zugriff unter <http://www.willowgarage.com/papers/ros-open-source-robot-operating-system>
- Rasmussen, J. (1983). Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, *SMC-13*(3), 257–266. doi:10.1109/TSMC.1983.6313160
- Reschka, A., Rieken, J. & Maurer, M. (2015). Entwicklungsprozess von Kollisionsschutzsystemen für Frontkollisionen: Systeme zur Warnung, zur Unfallschwereminderung und zur Verhinderung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (3. Aufl., Kap. 48, S. 913–936). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- RESPONSE 3. (2006). Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS. *PREVENT – Preventive and Active Safety Applications*, 5.
- SAE International. (2016). J3016 Surface Vehicle Recommended Practice: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. SAE International.
- Schiele, B. & Wojek, C. (2015). Kamerabasierte Fußgängerdetektion. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 421–436). Wiesbaden: Springer Fachmedien. doi:10.1007/978-3-658-05734-3{_}23
- Senner, V. (2017). „Spielregeln“ zum IDP, Technische Universität München. München.
- Simons, D. J. & Chabris, C. F. (2000). Sustained Inattentive Blindness : Dynamic Events. *28*, 1059–1074.
- Statistisches Bundesamt. (2018). *Vekehrsunfälle – Dezember 2017* (Techn. Ber. Nr. 7). De-statis.
- Stoll, J., Schneider, A., Wisch, M., Seiniger, P. & Schaller, T. (2016). *PROSPECT Deliverable D3.1 The addressed VRU scenarios within PROSPECT and associated test catalogue* (Techn. Ber. Nr. 634149). PROSPECT.
- Szarvas, M., Yoshizawa, A., Yamamoto, M. & Ogata, J. (2005). Pedestrian detection with convolutional neural networks. *IEEE Proceedings. Intelligent Vehicles Symposium, 2005*. 224–229. doi:10.1109/IVS.2005.1505106
- UR:BAN. (2016). *UR:BAN Projekt : Mensch im Verkehr – 4. Meilensteinbericht (Q16) Teilprojekt: Stadtgerechte Mensch-Maschine-Interaktion – MMI AP 5000: Test und Evaluation (2. Phase)* (Techn. Ber. Nr. Evaluation der funktionsspezifischen MMI Konzepte in den Funktionsträgern und Demonstratoren). UR:BAN. Wolfsburg.
- Utesch, F. (2014). *Unschärfe Warnungen im Kraftfahrzeug: Eignet sich eine LED-Leiste als Anzeige für Fahrerassistenzsysteme?* (Diss., Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig). doi:10.13140/RG.2.1.3442.2480
- Van Der Laan, J. D., Heino, A. & De Waard, D. (1997). A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *5*(1), 1–10. doi:10.1016/S0968-090X(96)00025-3
- Verband der Automobilindustrie e.V. (2015). Automatisierung Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. *VDA Magazin - Automatisierung*, 3–21. Zugriff unter <https://www.vda.de/dam/vda/publications/2015/automatisierung.pdf>

- Wickens, C. D. (2000). The trade-off of design for routine and unexpected performance: Implications of situation awareness. In M. R. Endsley & D. J. Garland (Hrsg.), *Situation awareness analysis and measurement* (S. 211–225). Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Wickens, C. D. & Hollands, J. G. (1999). *Engineering Psychology and Human Performance*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Wickens, C. D., Lee, J. D., Liu, Y. & Gordon-Becker, S. E. (2014). *Introduction to Human Factors Engineering* (Second Edi). Pearson Education Limited.
- Wickens, C. D. & McCarley, J. S. (2008). *Applied attention theory*. Boca Raton: CRC Press. doi:10.1080/00140130802295564
- Winkler, S., Powelleit, M., Kazazi, Juela, Vollrath, M., Krautter, W., Korthauer, A., . . . Semmler, C. (2018). HMI Strategy – Warnings and Interventions. In *UR:BAN Human Factors in Traffic* (S. 75–102). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Winner, H., Hakuli, S. & Wolf, G. (Hrsg.). (2012). *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl.). Wiesbaden: Springer Fachmedien. doi:10.1007/978-3-8348-8619-4
- World Health Organization. (2015). *Global Status Report on Road Safety 2015*. World Health Organization. Genf. doi:10.1136/injuryprev-2013-040775
- Yerkes, R. M. & Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 18(5), 459–482. doi:10.1037/h0073415
- Zhao, L. & Thorpe, C. E. (2000). Stereo- and Neural Network-Based Pedestrian Detection. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1(3), 148–154. doi:10.1109/6979.892151

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Modell der menschlichen Informationsverarbeitung nach Wickens, Lee, Liu und Gordon-Becker (2014, S. 102)	3
Abbildung 2	Arbeitsmodell nach Rasmussen (1983) in Bezug zu Fahrverhaltensmodell nach Donges (1982) (aus Donges, 2012, S. 15)	8
Abbildung 3	Arbeitsmodell der Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug aus Winner, Hakuli und Wolf (2012, S. 314)	10
Abbildung 4	Stufen der Automatisierung im Automobil (Verband der Automobilindustrie e.V., 2015, S. 15).....	11
Abbildung 5	Schema der Warnstufen	23
Abbildung 6	LED-Anzeige auf der Warnstufe „Frühwarnung“	25
Abbildung 7	LED-Anzeige auf der Warnstufe „Warnung“	26
Abbildung 8	LED-Anzeige auf der Warnstufe „Akutwarnung“	27
Abbildung 9	Schematische Darstellung der Anbringung der LED-Leiste im Fahrzeug....	29
Abbildung 10	Spektralanalyse der Warntöne	30
Abbildung 11	Schematische Darstellung der Verschaltung des Protoyp.....	31
Abbildung 12	Grundkonzept der Berechnung der LED-Position	34
Abbildung 13	Die eingebaute LED-Halterung im Fahrzeug	37
Abbildung 14	Das Case mit den elektronischen Komponenten und Anschlüssen.....	38
Abbildung 15	Darstellung der Erkennung eines VRU	38
Abbildung 16	Darstellung der Szenarien 1 und 2	44
Abbildung 17	Darstellung der Szenarien 3 und 4	44
Abbildung 18	Foto eines Versuchsaufbaus während der Evaluation	50
Abbildung 19	Aggregierte Ergebnisse des Zwischenfragebogens über alle Dimensionen	54
Abbildung 20	Aggregierte Ergebnisse des Zwischenfragebogens getrennt für Gerade- und Abbiegeszenarios	55
Abbildung 21	Aggregierte Ergebnisse des Abschlussfragebogens zur Akzeptanz	56
Abbildung 22	Aggregierte Ergebnisse des Abschlussfragebogens zum Sicherheitsgewinn	57
Abbildung 23	Aggregierte Ergebnisse des Abschlussfragebogens zum Workload	57
Abbildung 24	Aggregierte Ergebnisse des Abschlussfragebogens zur Usability	58

Abbildung 25	Aggregierte Ergebnisse des Abschlussfragebogens zur Gestaltung	58
Abbildung 26	Aggregierte Ergebnisse des Abschlussfragebogens zum Vertrauen	58
Abbildung 27	Aggregierte Ergebnisse des Abschlussfragebogens zur Angemessenheit.	59
Abbildung 28	Projektplan	82
Abbildung 29	Foto des Teamcanvas, welches beim Kick-Off-Meeting erstellt wurde	83
Abbildung 30	Kanban Board auf Gitlab	84
Abbildung 31	Ein abschließendes Gruppenbild mit LED	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht über die positiven und negativen Rückmeldungen zur visuellen Warnkomponente	63
Tabelle 2 Übersicht über die positiven und negativen Rückmeldungen zur akustischen Warnkomponente	64

A Anhang

A.1 Modelldarstellungen

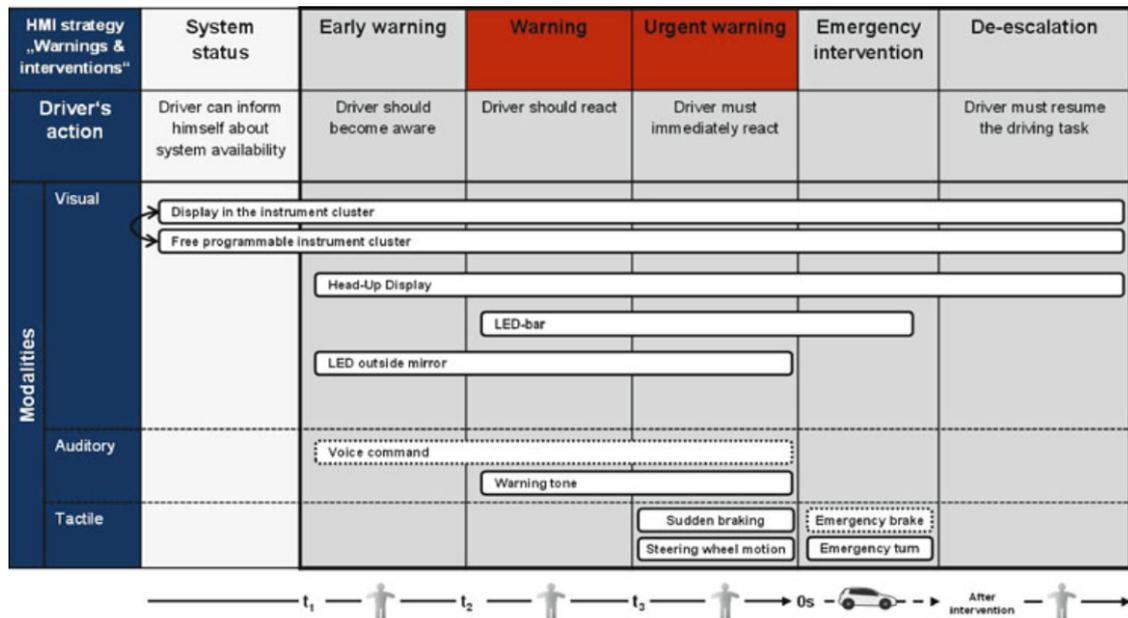


Abbildung 1 Die HMI-Strategie „Warnings and interventions“ aus Drücke, Semmler und Bendewald (2018)

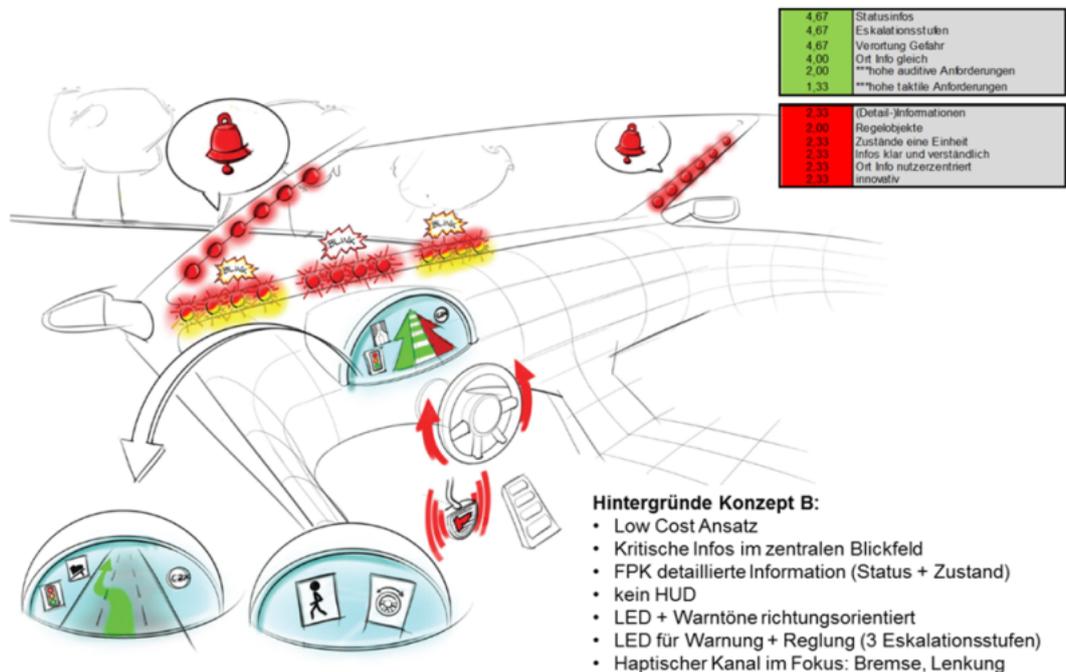


Abbildung 2 Konzept B aus Petermann-Stock (2013)

A.2 Versuchsdokumente

Evaluation | Versuchsleitfaden

Vorbereitungen

1. Markierungen auf der Testfläche anbringen/checken
2. Versuchsträger bereitstellen
3. Teststrecke absperren
4. Equipment bereitstellen
 - a. Warnwesten
 - b. Telefone für Kommunikation (Co-Statist und Co-Fahrer)
5. Befragungsraum herrichten
 - a. Tisch & Stühle aufstellen
 - b. Getränke & Süßigkeit
6. Fragebögen, Notizzettel und Stifte bereitlegen
7. Prototyp starten und auf Funktionstüchtigkeit prüfen
8. Aufnahmegeräte (Kameras) vorbereiten

Versuchsablauf

1. Dokumente bereitlegen (und mit VP-ID kennzeichnen)
 - a. Instruktionen
 - b. Einwilligungserklärung
 - c. Sicherheitshinweise
 - d. Szenarienabfolge
 - e. Fragebögen
 2. Abholen und Begrüßen der VP
 - a. Toilette, Handy lautlos stellen, Uhr abnehmen
 3. Vorgabe von
 - a. Instruktion
 - b. Soziodemographischer Fragebogen
 4. Klärung eventueller Rückfragen
-
5. Begleitung zum und Erklärung des Autos
 - a. Einstellung des Sitzes und Lenkrads
 - b. Geschwindigkeitslimitierung
 - c. Sicherheitsunterweisung
 - d. Unterzeichnung der Einwilligungserklärung
 - e. Position und Funktion des Co-Fahrers
 6. Probefahren mit Erläuterungen des Co-Fahrers und Demonstrieren der Warnungen
 - a. Aufnahme eventueller Anmerkungen und Rückmeldungen durch Co-Fahrer
-

7. Szenarienfahrt (a, b, c, d)
 - a. Aufnahme (Kameras) starten
 - b. Erläuterung und Instruktion (Demonstrieren am Tablet oder Probefahrt)
 - i. Co-Fahrer erklärt Fahrer das aktuelle Szenario
 - ii. Co-Statist erklärt Statist das aktuelle Szenario
 - iii. Fahrer und Statist bestätigen aktuelles Szenario
 - iv. Co-Statist und Co-Fahrer sind in Kontakt und bestätigen aktuell gefahrenes Szenario
 - v. Co-Statist und Co-Fahrer geben Startbereitschaft. Co-Fahrer gibt Start-Zeitpunkt an.
 - c. Testfahrt
 - d. Kurzbefragung im Auto
 - e. Aufnahme (Kameras) stoppen
-

8. Nachbefragung
9. Offene Fragen/Anmerkungen klären (ggf. nachhaken und nachfragen)
10. Verabschiedung, Bedanken und Belohnung (Süßigkeit) übergeben

Einführung

Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer,

vielen Dank für die Teilnahme an diesem Versuch.

Es geht heute um die Testung eines Anzeigesystems für ein neues Warnsystem. Dieses System warnt den Fahrer vor verletzlichen Verkehrsteilnehmern, also z.B. Fußgängern oder Fahrradfahrern. Diese werden von einem umfassenden Sensoriksystem am Auto erkannt und die Informationen werden über das Warnsystem an Sie weitergegeben.

Im heutigen Versuch werden Sie in einem Versuchsauto auf dem Daimler Forschungsgelände fahren. Neben einer Eingewöhnungsfahrt werden Sie in vier verschiedenen Szenarien das Warnsystem kennen lernen, welches Sie vor Fußgängern warnen wird. Um die Sicherheit von Ihnen und den Statisten zu gewährleisten, werden Sie vor jeder Fahrt genau instruiert, was passieren wird und wie Sie fahren müssen.

Der Versuch wird insgesamt bis zu 90 Minuten dauern. Vor Beginn möchten wir Sie bitten, einen Fragebogen zu Ihrer Person auszufüllen. Darauf folgen die Eingewöhnungsfahrt sowie die einzelnen Testfahrten. Zwischen den Fahrten werden wir Sie ebenfalls bitten, kurze Fragebögen auszufüllen. Am Ende des Versuches folgt ein abschließender Fragebogen sowie eine kurze Befragung durch unseren Versuchsleiter.

Bitte beachten Sie auch, dass wir in diesem Versuch an Ihrer persönlichen Meinung interessiert sind. Es gibt daher keine richtigen oder falschen Antworten.

Wenn Sie Fragen haben, stellen Sie diese bitte jetzt der Versuchsleiterin / dem Versuchsleiter.

VP-Nr:

Vorfragebogen

Vor dem Beginn der Testfahrt möchten wir Sie bitten, einige Fragen und Einschätzungen zu Ihrer Person zu beantworten. Alle Antworten werden anonym behandelt. Bei Fragen melden Sie sich gern jederzeit bei Ihrem Versuchsleiter.

Alter in Jahren

Geschlecht

- Weiblich
- Männlich
- Anders

Körpergröße in cm

Haben Sie eine Sehschwäche?

- Nein
- Ja und ich verwende keine Sehhilfe
- Ja, aber ich verwende eine Brille oder Kontaktlinsen

Falls Sie eine (andere), Ihnen bekannte Art von Fehlsichtigkeit haben, die Sie nicht korrigiert haben, beschreiben Sie diese bitte kurz. Dies könnte zum Beispiel die Augenbewegungen, die Akkomodation, die Kontrastempfindlichkeit oder das Farbsehen betreffen.

Haben Sie eine Hörbeeinträchtigung?

- Nein
- Ja und ich verwende keine Hörhilfe
- Ja, aber ich verwende eine Hörhilfe

Falls Sie eine (andere), Ihnen bekannte Hörbeeinträchtigung haben, die Sie nicht korrigiert haben, beschreiben Sie diese bitte kurz.

VP-Nr:

Bitte schätzen Sie: Wie hoch ist Ihre bisherige Gesamtfahrleistung in Kilometern (privat und beruflich)?

Wie viel (praktische) Erfahrungen haben Sie persönlich (privat und beruflich) mit Fahrerassistenzsystemen (z.B. ACC, Notbremsassistent, Einparkassistent)?

Gar keine Sehr viel

Wie sehr vertrauen Sie Fahrerassistenzsystemen – auf Basis Ihrer bisherigen Erfahrungen (privat und beruflich)?

Überhaupt nicht Völlig

Vielen Dank. Bitte melden Sie sich nach der Beantwortung wieder beim Versuchsleiter.

Halbstandardisiertes Interview

Material: Bilder/Videos der einzelnen Warnstufen - für die 2. Frage, ab 2.c)

1. Bitte beschreiben Sie die Warnungen kurz.
 - a. Wie präsentiert sich die Warnung; welche Kanäle werden wo im Auto angesprochen durch die Warnung (Modalitäten)?

2. Haben Sie verschiedene Abstufungen in der Warnung wahrgenommen?
 - a. Wie viele Abstufungen gab es?
 - b. Welche Abstufungen gab es?
 - c. Was wurde durch diese Abstufungen kommuniziert?
 - d. Als wie dringlich haben Sie die verschiedenen Abstufungen der Warnung wahrgenommen?

3. Bitte bewerten Sie kurz den Teil der Warnung, der in der LED-Leiste sichtbar wurde.
 - a. Was finden Sie gut?
 - b. Was finden Sie schlecht?
 - c. Was würden Sie verbessern?

4. Bitte bewerten Sie kurz den Teil der Warnung, der als Audiosignal hörbar wurde.
 - a. Was finden Sie gut?
 - b. Was finden Sie schlecht?
 - c. Was würden Sie verbessern?

5. Bitte bewerten Sie nun die Warnung als Ganzes, also in der Kombination aus der LED-Leiste und dem Audiosignal.
 - a. Was finden Sie gut?
 - b. Was finden Sie schlecht?
 - c. Was würden Sie verbessern?

6. Würden Sie das Warnsystem in Ihrem eigenen Auto nutzen wollen? Wenn ja, wieso? Wenn nein, wieso nicht?

7. Weitere Kommentare?

ID _____

Szenario _____

Zwischenfragebogen

Bitte beantworten Sie nun die folgenden Fragen. Bewerten Sie dabei bitte nur das soeben erlebte Szenario.

Wie ist ihre Einstellung gegenüber dem soeben erlebten Warnsystem?

Negativ Positiv

Wie sehr vertrauen Sie dem soeben erlebten Warnsystem?

Überhaupt nicht Völlig

Wie hilfreich finden Sie das soeben erlebte Warnsystem?

Überhaupt nicht Sehr

Wie verständlich finden Sie das soeben erlebte Warnsystem?

Völlig Völlig
unverständlich verständlich

Wie angenehm finden Sie die Gestaltung des soeben erlebten Warnsystems?

Überhaupt nicht Sehr

Als wie angemessen in Bezug auf das erlebte Szenario empfinden Sie das soeben erlebte Warnsystem?

Völlig Völlig
unangemessen angemessen

Bitte teilen Sie dem Versuchsleiter mit, wenn Sie Kommentare oder Anmerkungen zum Warnsystem oder zu den Fragen haben. Alternativ können Sie diese auch hier notieren. Ihre Antworten werden anonym behandelt.

VP-Nr:

Abschlussfragebogen

Bitte beantworten Sie nun die folgenden Fragen zu dem im Versuch erlebten Warnsystem.

Bitte beurteilen Sie jetzt das System. Lesen Sie hierfür aufmerksam jedes Wortpaar und machen Sie jeweils ein Kreuz pro Zeile.

Nützlich	<input type="checkbox"/>	Nutzlos				
Angenehm	<input type="checkbox"/>	Unangenehm				
Schlecht	<input type="checkbox"/>	Gut				
Nett	<input type="checkbox"/>	Nervig				
Effizient	<input type="checkbox"/>	Unnötig				
Ärgerlich	<input type="checkbox"/>	Erfreulich				
Hilfreich	<input type="checkbox"/>	Wertlos				
Nicht wünschenswert	<input type="checkbox"/>	Wünschenswert				
Aktivierend	<input type="checkbox"/>	Einschläfernd				

Die Warnung in den erlebten Szenarien ...

War zu unkritisch	<input type="checkbox"/>	War zu kritisch				
Zu früh	<input type="checkbox"/>	Zu spät				
Enthielt zu wenig Informationen	<input type="checkbox"/>	Enthielt zu viele Informationen				

VP-Nr:

	Stimme überhaupt nicht zu			Stimme völlig zu		
Ich fand das Warnsystem unnötig komplex.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich fand das Warnsystem einfach zu verwenden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich denke, das Warnsystem enthielt zu viele Inkonsistenzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit diesem Warnsystem sehr schnell lernen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich fand das Warnsystem sehr umständlich zu nutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich fühlte mich bei der Verwendung des Warnsystems sehr sicher.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	Trifft gar nicht zu			Trifft völlig zu		
Das Warnsystem half mir, Gefahren rechtzeitig zu erkennen.	<input type="checkbox"/>					
Das Warnsystem half mir, den Ort der Gefahr zu erkennen.	<input type="checkbox"/>					
Mit dem Warnsystem habe ich besser auf die Gefahr reagieren können.	<input type="checkbox"/>					
Das Warnsystem lenkt davon ab, Gefahren rechtzeitig zu erkennen.	<input type="checkbox"/>					
Das Warnsystem führt zu Fehlreaktionen.	<input type="checkbox"/>					

VP-Nr:

Der folgende Abschnitt beinhaltet Fragen auf Englisch, da die Formulierungen bereits in einer Vielzahl von Versuchen validiert wurde. Bei Fragen bezüglich des Vokabulars, melden Sie sich bitte beim Versuchsleiter. Bitte bewerten Sie die nun folgenden Bereiche mit der vorgegebenen Skala.

Global attention demand

Mental (to think about, to decide...), visual and auditory demand required during the test to achieve the whole activity...

Low High

Visual demand

Visual demand required during the test to achieve the whole activity.

Low High

Auditory demand

Auditory demand required during the test to achieve the whole activity.

Low High

Stress

Level of stress during the whole activity such as fatigue, insecure feeling, irritation, discouragement...

Low High

Temporal demand

Pressure and specific constraint felt due to timing demand when running the whole activity.

Low High

Interference

Disturbance of the driver' state and consequences on the driving activity when conducting the driving activity simultaneously with any other supplementary task such as phoning, using systems or radio...

Low High

VP-Nr:

Wie sehr vertrauen Sie dem im Versuch erlebten Warnsystem?

Überhaupt nicht Völlig

Wie angenehm finden Sie die Gestaltung des im Versuch erlebten Warnsystems?

Überhaupt nicht Sehr

Vielen Dank. Bitte melden Sie sich nach der Beantwortung wieder beim Versuchsleiter.

A.3 Ergebnisse

	Mittelwert	Standard- abweichung	Minimum	Maximum
Alter [Jahre]	32,42	8,08	24	50
Körpergröße [cm]	183,67	10,45	165	199
Besitz der Fahrerlaubnis [Jahre]	14,33	8,35	2	32
Jahresfahrleistung [km]	14.041,67	8.619,37	2.000	30.000
Gesamtfahrleistung [km] ¹	171.818,18	135.982,95	5.000	500.000
Erfahrung FAS [1-6] ¹	4,64	1,21	2	6
Vertrauen FAS [1-6] ¹	4,45	0,93	3	6

Anmerkung. In eckigen Klammern ist jeweils die Einheit beziehungsweise die Antwortskala angegeben (n=12).

¹n=11

Tabelle 1 Die Tabelle zeigt die Aggregation der Probandenantworten einiger Fragen aus dem Vorragebogen. Die Fragen sind frei zusammengestellt.

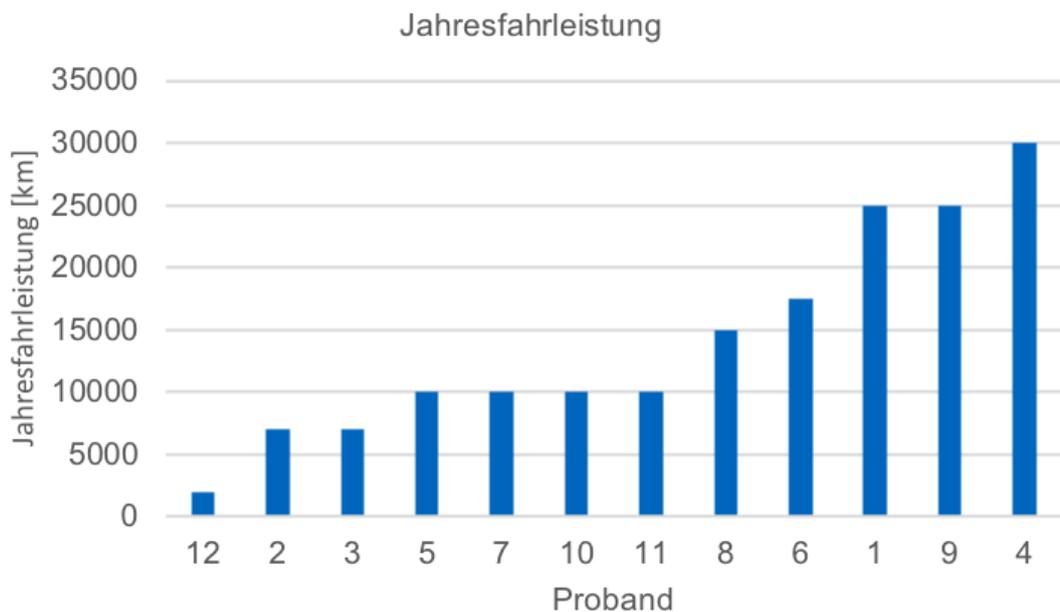


Abbildung 1 Aufgetragen sind die nach Kilometerleistung sortierten Antworten der einzelnen Probanden auf die Frage aus dem Vorragebogen, wie hoch die Fahrleistung in den letzten 12 Monaten gewesen sei (n=12).

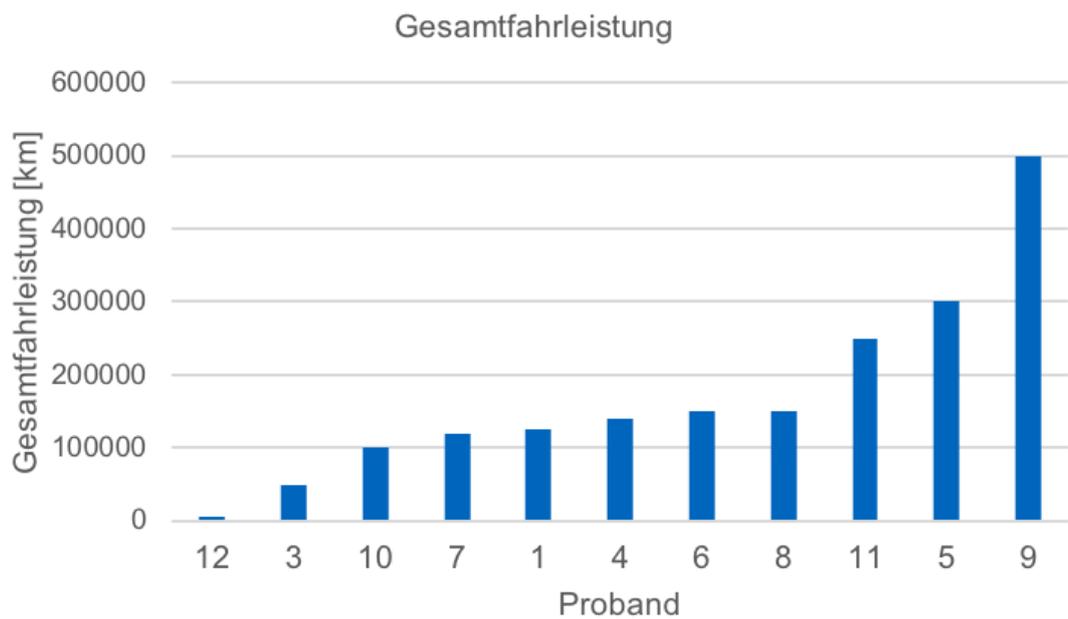


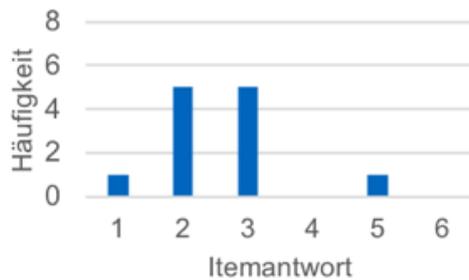
Abbildung 2 Aufgetragen sind die nach Kilometerleistung sortierten Antworten der einzelnen Probanden auf die Frage aus dem Vorforschfragebogen, wie hoch die Fahrleistung in den letzten 12 Monaten gewesen sei (n=11).

	Szenario (1)	Szenario (2)	Szenario (3)	Szenario (4)
Einstellung	4,67	3,58	3,00	4,92
	0,78	1,78	1,79	0,67
Vertrauen	3,33	2,50	2,00	4,42
	0,89	1,24	1,34	0,79
Nützlichkeit	4,25	2,67	2,18	4,25
	0,97	1,72	1,33	1,29
Verständlichkeit	5,25	4,67	4,18	4,75
	0,62	1,44	1,54	1,48
Gestaltung	4,17	3,83	3,64	4,17
	0,83	1,19	1,21	1,03
Angemessenheit	4,42	3,33	2,64	4,25
	1,31	1,87	1,43	0,97

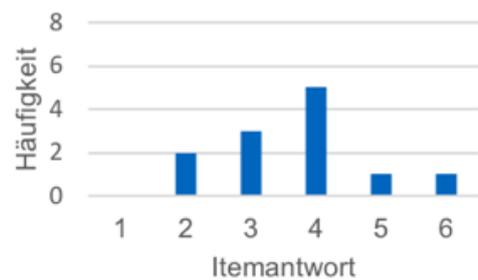
Anmerkung. Die Skala liegt zwischen 1 und 6, wobei 6 dem angestrebten Wert entspricht (n=12). In der ersten Zeile ist der Mittelwert aufgetragen, in der zweiten Zeile die Standardabweichung.

Tabelle 2 Die Tabelle zeigt die Aggregation der Probandenantworten der Fragen aus dem Zwischenfragebogen für die einzelnen Szenarien. Die Fragen sind frei zusammengestellt.

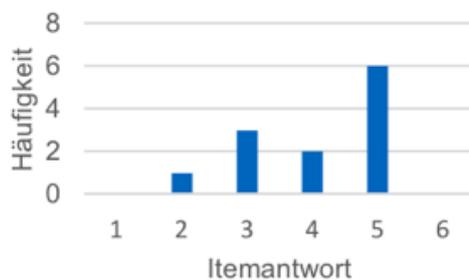
1) Im Vergleich zu anderen Autofahrern würde ich mich folgendermaßen einschätzen: sehr erfahren - sehr unerfahren



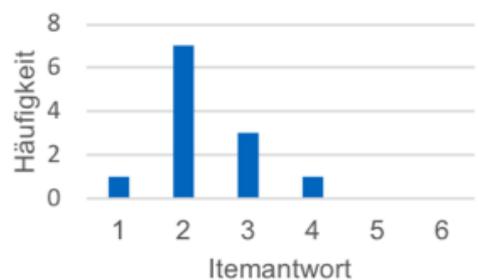
2) Ich würde meinen Fahrstil beschreiben als: sportlich/dynamisch - ruhig/ausgeglichnen



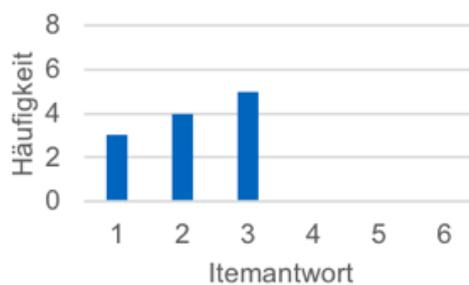
3) Bei hoher Verkehrsdichte verhalte ich mich: eher offensiv - eher defensiv



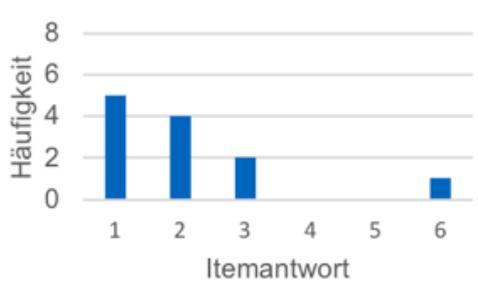
4) Meine Kontrolle über das Fahrzeug schätze ich wie folgt ein: Ich beherrsche mein Fahrzeug in jeder Situation - In manchen Situationen habe ich Schwierigkeiten



5) Mit einem fremden Fahrzeug zurechtzukommen: fällt mir leicht - bereitet mir Schwierigkeiten



6) Ich bin an technischen Dingen um das Auto: sehr interessiert und informiert - nicht interessiert



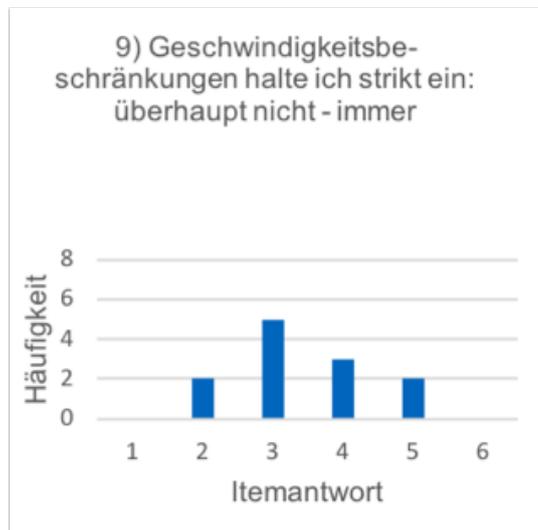
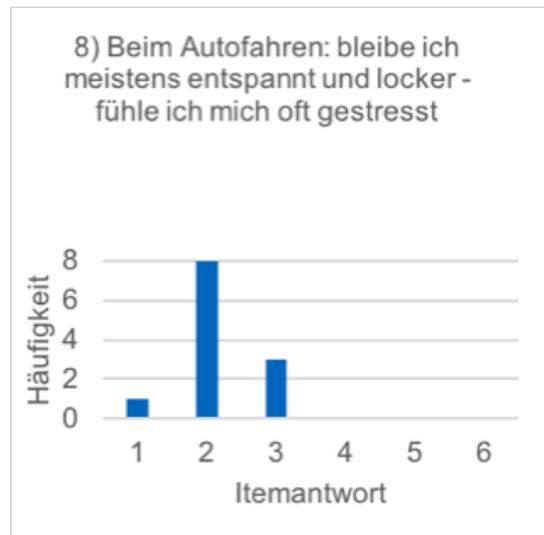


Abbildung 3 Die Diagramme zeigen Häufigkeitsdiagramme der Probandenantworten zu den neun Items aus dem Fragebogen zur subjektiven Einschätzung des Fahrertyps, der im Vorfragebogen enthalten ist (n=12).

Mittelwert und Standardabweichung	Szenario (1) & (4)	Szenario (2) & (3)	Gesamt
Einstellung	4,67	3,58	4,06
	0,78	1,78	1,52
Vertrauen	3,33	2,50	3,09
	0,89	1,24	1,40
Nützlichkeit	4,25	2,67	3,36
	0,97	1,72	1,61
Verständlichkeit	5,25	4,67	4,72
	0,62	1,44	1,33
Gestaltung	4,17	3,83	3,96
	0,83	1,19	1,06
Angemessenheit	4,42	3,33	3,68
	1,31	1,87	1,56

Anmerkung. Die Skala liegt zwischen 1 und 6, wobei 6 dem angestrebten Wert entspricht (n=12). In der ersten Zeile ist der Mittelwert aufgetragen, in der zweiten Zeile die Standardabweichung.

Tabelle 3 Die Tabelle zeigt die Aggregation der Probandenantworten der Fragen aus dem Zwischenfragebogen zusammengefasst für die Gerade-Szenarien (1) und (4) sowie für die Abbiege-Szenarien (2) und (3). Zudem ist eine Gesamtzusammenfassung aller Szenarien dargestellt. Die Fragen sind frei zusammengestellt.

	Mittelwert	Standard- abweichung	Minimum	Maximum
Akzeptanz [-2;2]¹				
Gesamt	0,85	0,93	-2	2
Usefulness Subscale	0,72	1,01	-2	2
Satisfying Subscale	1,02	0,79	-1	2
Vertrauen [1;6]²				
Sicherheitsgewinn [1;6] ³	3,68	1,07	1	5
Workload [1;6]⁴				
Global attention demand	2,92	1,38	1	5
Visual demand	3,42	1,44	2	6
Auditory demand	2,92	1,51	1	6
Stress	1,92	0,51	1	3
Temporal demand	2,67	1,37	1	5
Interference	2,50	1,09	1	5
Usability [1;6]⁵				
Gestaltung [1;6] ²	4,75	0,87	3	6
Angemessenheit [1;6]²				
Kritikalität	2,17	1,27	1	5
Zeitpunkt	4,08	0,79	3	5
Informationsgehalt	2,92	0,29	2	3

Anmerkung. In eckigen Klammern ist jeweils die Range der Skalen für das jeweilige Kriterium angegeben (n=12).

¹ Van Der Laan et al. (1997); ² frei zusammengestellt; ³ UR:BAN, 2014; Arndt, 2011; ⁴ Pauzie, 2008; ⁵ Brooke, 1996

Tabelle 4 Die Tabelle zeigt die Aggregation der Probandenantworten der Fragen aus dem Abschlussfragebogen. Die Referenzen der Fragebögen sind in den Anmerkungen angegeben.