

BAND 24 | SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

MARINA BUDANOW

ENTWICKLUNG EINES LICHTBASIERTEN
FAHRERASSISTENZSYSTEMS



Marina Budanow

Entwicklung eines lichtbasierten Fahrerassistenzsystems

Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Entwicklung eines lichtbasierten Fahrerassistenzsystems

von
Marina Budanow

Karlsruher Institut für Technologie
Lichttechnisches Institut

Entwicklung eines lichtbasierten Fahrerassistenzsystems

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor der Ingenieurwissenschaften von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von M.Sc. (Chem.) Marina Budanow

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Dezember 2019

Hauptreferent: Prof. Dr. Cornelius Neumann

Korreferent: Prof. Dr. Wilhelm Stork

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>



The cover page is licensed under a Creative Commons Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>

Print on Demand 2020 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 2195-1152

ISBN 978-3-7315-1018-5

DOI 10.5445/KSP/1000105925

„Es ist besser ein kleines Licht anzuzünden,
als über die Dunkelheit zu schimpfen“

(- Laotze -)

Meinen Eltern

I DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand bei der BMW AG unter der Betreuung von Prof. Dr. Cornelius Neumann des Lichttechnischen Instituts am Karlsruher Institut für Technologie.

Mein Dank gebührt an erster Stelle Prof. Neumann für die Bereitschaft die Betreuung zu übernehmen und für sämtliche Unterstützung bei Themenfindung, Durchführung und für die vielen anregenden Diskussionen, für die er sich immer wieder Zeit nahm. Durch ihn konnte meine Faszination an der Forschung und Entwicklung dieser Arbeit immer weiter entfacht werden.

Prof. Dr. Wilhelm Stork als Zweitgutachter wie auch Prof. Dr. Gerd Trommer und den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission, möchte ich für das Interesse an meiner Arbeit, die Prüfung und Bewertung dieser danken. Ebenso gilt den Mitarbeitern und Mit-Doktoranden des LTI, v.a. Dr. Dieter Kooß, Melanie Helmer und Patric Jahn, wie auch den Hilfswissenschaftlern und Praktikanten die mir bei den Nachtschichten während der Studien voller Elan zur Seite standen großer Dank. Danke auch an die externen Helfer: Herr Nerpel vom Hockenheimring und die Straßenmeisterei Wiesloch in Person von Herrn Wäsch.

Mein Team bei BMW, u.a. Dr. Christian Jebas und Stefan Weber, berieten mich bei der Organisation der Umsetzung meiner Ideen in die Realität. Thomas Hausmann und Christian Amann gaben mir die

DANKSAGUNG

Möglichkeit, diese Ideen umzusetzen und die Ergebnisse meiner Forschung in die Welt zu tragen.

Dort traf ich Forscher und Ingenieure, die mit Leidenschaft daran arbeiten, die Welt ein kleines Stückchen besser zu machen und diese Leidenschaft mit mir teilten, mich damit weiter anspornten. Die GTB war es letzten Endes, die meine Arbeit zur Grundlage nahm, um einen die Änderung der internationalen Gesetzgebung bei der UN ECE anzustoßen.

Mein neues Team bei BMW ermöglichte es mir letzten Endes, diese Arbeit in Ruhe zu vollenden. Neben der Ruhe waren haben auch meine Korrekturleser Stefan Namyslo und Dr. Andreas Kain einen nicht unerheblichen Beitrag für die Lesbarkeit dieser Arbeit geleistet. Vielen Dank für die stets geduldige Korrektur, den ausgiebigen Austausch und auch die Bereitschaft zur Diskussion hinsichtlich der Finalisierung. Tanja Schäfer und meine Schwester Alexandra haben weiteren Beitrag dazu geleistet, dass die ein oder andere unfreiwillig humorvolle Einlage ihren Weg nicht in den Druck gefunden hat.

Bereits vor dem Beginn dieser Arbeit sind meine Freunde und meine Familie, allen voran meine Eltern, meine Schwester und mein Freund Stefan, nicht müde geworden mir genug Kraft zu geben, um diese Arbeit zu dem Erfolg zu machen, der sie für mich geworden ist.

Danke für alles.

II INHALTSVERZEICHNIS

I	Danksagung	I
1	Einleitung	1
2	Motivation	3
2.1	Bedarf	4
2.2	Stand der Technik	12
2.2.1	Optische Systeme	13
2.2.2	Assistenzsysteme – Mensch-Maschine- Interaktionen	17
2.2.3	Zusammenfassender Überblick des Stands der Technik	21
2.3	Stand der Gesetzgebung	24
2.4	Stand der Forschung	26
2.5	Handlungsfeld	28
3	Umsetzung	33
3.1	Studie 1 – Die Semantik des Lichts: Kann mittels Lichtprojektionen mit dem Fahrer kommuniziert werden?	34
3.1.1	Vorbereitung und Ausarbeitung	36
3.1.2	Durchführung im Fahrsimulator	47
3.1.3	Ergebnisse und Auswertung der simulativen Studie	52

INHALTSVERZEICHNIS

3.1.4	Diskussion der Kommunikationsmöglichkeit mittels Lichtprojektionen	75
3.2	Studie 2 – Kommunikation mit Lichtprojektionen unter realitätsnahen Bedingungen	80
3.2.1	Vorbereitung und Ausarbeitung.....	80
3.2.2	Durchführung auf dem Testgelände	101
3.2.3	Ergebnisse und Auswertung des Fahrversuchs.....	108
3.2.4	Diskussion des Kommunikationserfolgs im Feldversuch	158
3.3	Umsetzung im seriennahen Prototypen im Realfahrzeug	162
3.3.1	Konzeption des Prototypen	163
3.3.2	Der Prototyp.....	177
4	Systembewertung des Gesamtsystems.....	189
4.1	Technische Umsetzbarkeit	189
4.2	Use-Cases.....	191
4.3	Sicherheitsgewinn & Risiken	193
5	Ausblick und weitere Schritte.....	199
5.1	Handlungsfeld Forschung – Mensch- Maschine Interaktion	199
5.2	Handlungsfeld Technologie.....	201
5.3	Handlungsfeld Gesetzgebung	203
6	Zusammenfassung	207
7	Anhang	213

INHALTSVERZEICHNIS

Anhang A: Publikations- und Patentverzeichnis	213
A.1 Publikationen.....	213
A.2 Eingereichte Patente	215
Anhang B: Verzeichnisse.....	217
B.1 Literaturverzeichnis.....	217
B.2 Abkürzungsverzeichnis	229
B.3 Einheitenverzeichnis.....	232
B.4 Abbildungsverzeichnis.....	233
B.5 Tabellenverzeichnis	242
Anhang C: Anschreiben, Informations- und Fragebögen	245
C.1 Fragebögen Der Studie 1	245
C.2 Fragebögen Der Studie 2	256
Anhang D: Detaillierte Resultate	265
D.1 Detaillierte Resultate der Studie 1	265
D.2 Detaillierte Resultate der Studie 2	296
D.3 Lichttechnische Messungen des Prototyps	308
Anhang E: Empfehlung der gesetzlichen Regulierung	313

Kapitel 1

EINLEITUNG

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines lichtbasierten Fahrerassistenzsystems zur Unterstützung von Kraftfahrern während der Fahrt bei Nacht.

In dieser Arbeit werden, nach der Darstellung der Motivation, sowohl der Stand der Technik als auch der Forschung vorgestellt. Daraus wird ein Handlungsfeld aufgespannt, in dem sich die hier vorliegende Arbeit bewegt. Basierend auf dem Prinzip der Mensch-Maschine-Interaktion werden technologische Einflüsse ebenso wie die Einflüsse der menschlichen Wahrnehmung betrachtet.

Bei Dunkelheit sind visuelle Informationen reduziert. Um diese zu kompensieren, wurde an einem System gearbeitet, welches den Fahrer visuell unterstützt ohne ihn zusätzlich vom Straßenverkehr abzulenken. Kapitel 3 beschreibt hierzu zunächst eine Simulator-Studie, in der getestet wurde, ob die Möglichkeit der Kommunikation mit dem Fahrer über Projektion von Symbolen auf der Straße besteht.

Aus allen, in der Studie gezeigten, Symbolen wurden die vielversprechendsten Symbole in einem Realversuch auf ihre Wirksamkeit hin untersucht. Die aus der Realstudie abgeleiteten Anforderungen an eine Umsetzung in Serienfahrzeugen wurden dem aktuellen Stand

der Technik gegenübergestellt. Die aussichtsreichste verfügbare Technologie wurde in einem Satz Prototypen-Scheinwerfer realisiert und anschließend auf ihre mögliche Serienumsetzung hin geprüft.

Das vierte Kapitel befasst sich mit der gesamtheitlichen Bewertung des in dieser Arbeit entwickelten Assistenzsystems zur Unterstützung von Kraftfahrzeugfahrern bei Nacht. Hierbei werden neben der technischen Machbarkeit auch die möglichen Anwendungsfälle (*engl.*: Use-Cases), der dabei entstehende Sicherheitsgewinn sowie mögliche Risiken diskutiert.

Aus den Ergebnissen in Kapitel 3 und der Bewertung des daraus resultierenden Systems in Kapitel 4 werden verwandte, noch offene Handlungsfelder hinsichtlich Forschung der Mensch-Maschine-Interaktion dargestellt. Ebenso werden die notwendige technologische Weiterentwicklung und eine Handlungsempfehlung an den Gesetzgeber in Kapitel 5 dargestellt aus denen sich die Möglichkeit einer Verbesserung der Verkehrssicherheit bei Nacht ergeben.

Kapitel 2

MOTIVATION

Immer wieder werden neue Wege gesucht, den Straßenverkehr sicherer und für den Fahrer angenehmer zu gestalten. Neben dem Blick zum vollautonomen Fahren hin soll auch der aktuell noch aktive Fahrer weiter unterstützt werden. Die Motivation für die vorliegende Arbeit in diesem Forschungsfeld soll im folgenden Kapitel vorgestellt werden, bevor im Anschluss auf eine mögliche Lösung eingegangen wird.

Der Bedarf für eine neuartige Sicherheitsfunktion leitet sich aus der aktuellen Verkehrssituation und den immer kürzeren Innovationszyklen im Automobil ab. Der Stand der Technik hinsichtlich verschiedener Ausprägungen der Mensch-Maschine-Interaktion, die für den Endkunden bereits zur Verfügung stehen, werden im Abschnitt 2.2. vorgestellt. Hier werden die Potentiale der zugrundeliegenden Technologien aufgezeigt, die durch eine geeignete Kombination einen größeren Mehrwert im Verkehrsgeschehen hinsichtlich Fahrerassistenz und damit Sicherheit bieten können.

Die weiteren Abschnitte befassen sich mit dem Stand der Gesetzgebung zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Arbeit (s. Abschnitt 2.3), als auch dem Stand der Forschung hinsichtlich Lichtprojektionen als

Mittel der Fahrerassistenz bzw. Kommunikation (s. Abschnitt 2.4). In Abschnitt 2.5 wird damit ein Handlungsfeld für diese Arbeit abgeleitet.

2.1 BEDARF

In den vergangenen rund 100 Jahren hat sich nicht nur hinsichtlich der Eigenschaften eines Automobils und dessen Sicherheitsfunktionen viel getan. Waren bis vor etwa 3 Jahrzehnten nur Scheinwerfer mit Glühlampen oder Halogen-Scheinwerfer mit einer Reichweite von 140 m Reichweite [1] verfügbar, so können Laser-Scheinwerfer Objekte in bis zu 600 m Entfernung sichtbar machen. Gleichzeitig steigt über eine zunehmende Anzahl an Bildschirmen und vermehrte Ambientbeleuchtung im Innenraum des Fahrzeugs der Informationsfluss an den Fahrer (Abbildung 2.1): Warnung vor einer Geschwindigkeitsüberschreitung, Navigationshinweise, die Anzeige des aktuellen Radiosenders und vieles mehr kann vom Geschehen auf der Straße ablenken. Diese optischen Reize werden zudem oft durch akustische und/oder haptische Signale unterstützt.

Hinzu kommt eine immer weiter steigende Verkehrsdichte: Nach Zahlen des ADAC und des Bundesamts für Straßenwesen (*kurz: BaSt*) hat sich die tägliche Straßenbelastung der Autobahnen in Deutschland seit 1975 beinahe verdoppelt (1975: 25.400 Kraftfahrzeug; 2015: 49.900 Kfz) und nimmt weiter zu. [2, 3] Auch anhand des Fahrzeugbestands ist eine Verdichtung auf den Straßen erkennbar: Laut

Kraftfahrtbundesamt stieg der Fahrzeugbestand in Deutschland 2019 um rund 11 % auf 57,3 Millionen Kraftfahrzeuge im Vergleich zum Wert aus dem Jahr 2000 (50,7 Millionen).[4, 5]

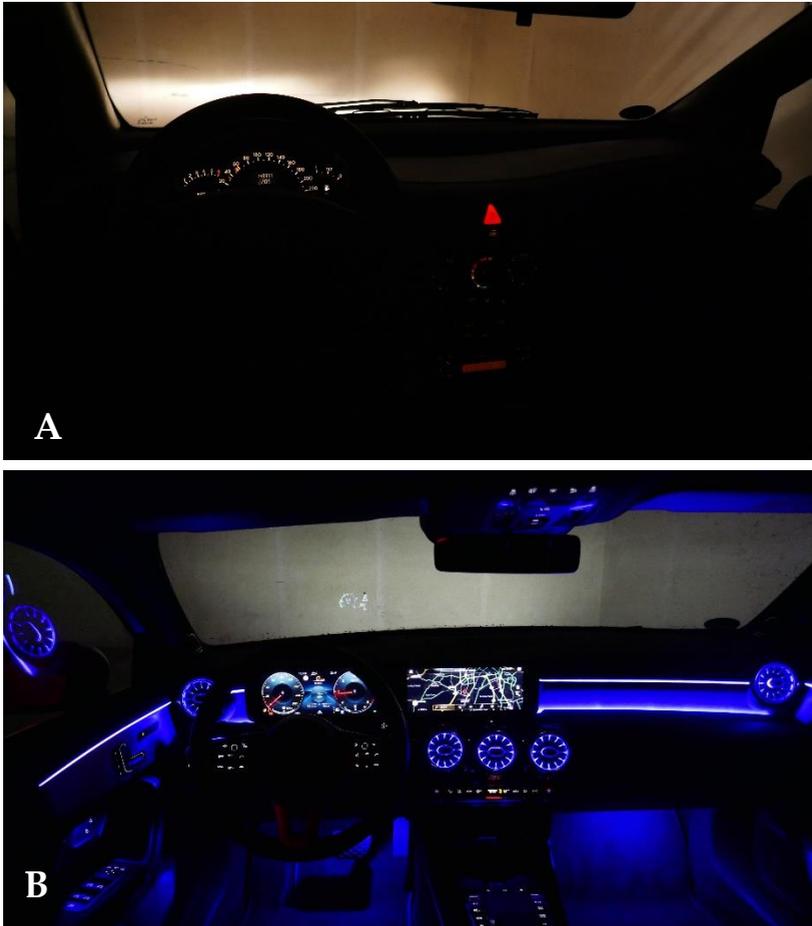


Abbildung 2.1 Vergleich der Innenbeleuchtung eines Mercedes Benz A-Klasse des Baujahrs 1999 (A) und des Modells von 2018 (B).

Autofahrer müssen somit nicht nur immer mehr Informationen von ihrem eigenen Fahrzeug verarbeiten, sondern auch immer aufmerksamer das Verkehrsgeschehen verfolgen.

Innerhalb von etwa 20 Jahren entwickelte sich aus dem schlichten, auf das Kombi-Instrument fokussierte Innenlicht ein Entertainmentpaket, welches den Fahrer dazu verleitet seine Aufmerksamkeit immer stärker ins Fahrzeuginnere zu lenken.

Ist der Fokus des Fahrers nicht vollständig auf den Straßenverkehr gerichtet, steigt die Gefahr für Unfällen. In der Schweiz wird deshalb „Unaufmerksamkeit und Ablenkung“ bereits als Unfallursache gelistet. Die Zahlen des Schweizer Bundesamts für Statistik (*kurz: BFS*) aus dem Jahr 2018 zeigen, dass 20% der im Straßenverkehr Verunfallten Opfer von Unaufmerksamkeit oder Ablenkung geworden sind[6].

Eine von der Allianz Versicherung in Auftrag gegebene Umfrage ergab, dass 40% der Fahrer während der Fahrt durch ein Telefon und ebenso viele durch die Bedienung des Navigationsgeräts abgelenkt sind. Es müssen jedoch nicht immer Smartphone und Navigationsgerät sein: 76% der Befragten gaben an, sich während der Fahrt von der im Fahrzeug verbauten Technik abgelenkt zu fühlen[7]. Eine Möglichkeit Technik im Fahrzeug darzustellen ist die visuelle Anzeige. Ein Beispiel dafür ist die Ambientbeleuchtung, die in den vergangenen Jahren eine markante Weiterentwicklung erfahren hat: Wie in Abbildung 2.1 zu sehen, hat die Beleuchtung im Innenraum des Fahr

zeugs (hier am Beispiel der Mercedes Benz A-Klasse) stark zugenommen. Zwar kann laut Caberletti et al.[8] die Ambientbeleuchtung im Kfz zur besseren Orientierung im Fahrzeug selbst beitragen, wirkt aber laut M. Grimm[9] nur bis zu einem Leuchtdichtewert von $0,1 \text{ cd/m}^2$ nicht blendend. Auch Grimm sieht in der steigenden Anzahl an Leuchtquellen und Bildschirmen ein Ablenkungspotential des Fahrers.

Diese Informationen decken sich mit den von „Auto Motor und Sport“[10] erfassten Blickbewegungen von Autofahrern. Untersucht wurden zum damaligen Zeitpunkt neu auf dem Markt erschienene Fahrzeuge im Stand und während der Fahrt.

Aufgrund der Durchführung des Tests bei Tageslicht treten vor allem Display-Elemente und weniger Leuchtelemente wie das Ambiente in den Fokus der Untersuchung. Wie in Abbildung 2.2 am Beispiel des BMW 7er (Baujahr 2015, Entwicklungscode: G11) zu



Abbildung 2.2 Bei einem Test der „Auto-Motor-und-Sport“ erfasste Blickbewegungen von Autofahrern in neuen Fahrzeugen. Rote Bereiche zeigen lange, gelbe mittlere und grüne kurze Fixationsdauern an. (Bild: auto-motor-und-sport.de)

erkennen ist, liegt die Fixationsdauer vor allem auf dem Infotainmentsystem und weiteren Anzeigen im Innenraum. Mit größer werdenden Anzeigen nehmen auch die Fixationsdauer werdenden Anzeigen nehmen auch die Fixationsdauern auf die Bildschirme zu und die Blicke in Richtung Windschutzscheibe ab[10].

Bei Fahrten bei Dämmerung oder bei Nacht ist die Umgebungshelligkeit reduziert. Dem Fahrer stehen dann weniger optische Reize und damit weniger sichtbare Informationen außerhalb des Fahrzeugs zur Verfügung (Abbildung 2.3).

Auch das Fahren mit Fernlicht hat im Vergleich zu Fahrten bei Tageslicht eine stark reduzierte visuelle Informationsdichte. Dies hat zur Folge, dass dunkle Objekte auf der Strecke oder am Straßenrand bei Nacht später erkannt werden und Distanzen schlechter eingeschätzt werden können. Weiterhin ist ein Einschalten des (vollen) Fernlichts nur begrenzt möglich. In der Arbeit von Boehm[11] wurde in einem definierten Streckenabschnitt (vorwiegend über Landstraßen) bei Fahrten eine mögliche Nutzung des vollen Fernlichts von nur 39% festgestellt.

In Anbetracht der Anhäufung von visuellen Informationen im Innenraum über Displays und Ambientlicht erhöht sich die Helligkeit im Innenraum des Fahrzeugs bei Nacht gegenläufig zur Helligkeit der Umgebung. Um Informationen über die Strecke oder den Verkehr zu erhalten (bspw. Navigationsinformationen oder Warnhinweise), ist der Fahrer gezwungen den Blick wiederholt auf die Anzeigen im Innenraum zu lenken. Der Blick erfordert neben einer Refokussierung

des Auges auf die kürzere Distanz (etwa 1 m Abstand zum Kombi-Instrument bis zu virtuell 5 m Distanz zur Anzeige des Head-Up-Displays) auch eine Readaptation an die hellere Anzeige und Umgebung im Innenraum. Gleichzeitig darf der Fahrer das Geschehen auf der Straße nicht vernachlässigen und muss den Blick stets wieder auf die Straße vor sich lenken (bei erfahrenen Fahrern bis zu 120 m bei Tag, bzw. 100 m bei Nacht vor das Fahrzeug[12]).

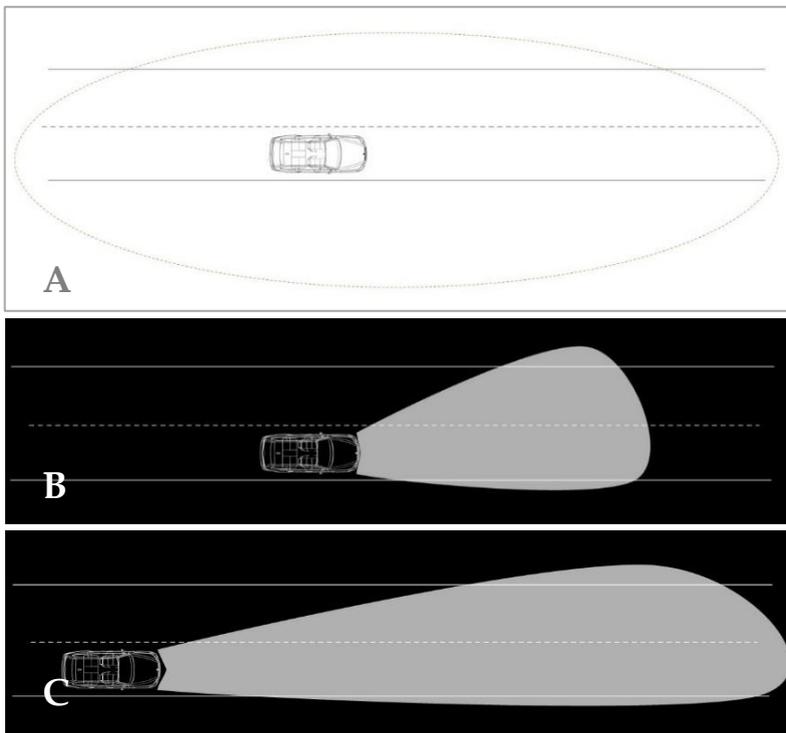


Abbildung 2.3 Schematische Darstellung des Sichtfelds bei Tag (A, grün gestricheltes Oval) und bei Nacht auf die jeweiligen Lichtkegel der Scheinwerfer reduziert mit Abblendlicht (B) und mit Fernlicht (C).

Die Readaptation an die dunklere Umgebung benötigt im Vergleich zur Adaptation an helle Reize deutlich mehr Zeit. (Helladaptation wird vor allem reflektorisch über eine verringerte Öffnung der Pupille gesteuert, wohingegen die Vergrößerung der Pupillenöffnung die Empfindlichkeit nur um den Faktor 10 (von maximal 10^{12}) erhöhen kann. Dunkeladaptation wird vorwiegend über Anpassung von Zapfen und Stäbchen im Auge gesteuert. Die für vorliegende Arbeit relevante, nervöse Adaptation (erhöhte Lichtempfindlichkeit der Retina bei verringerter zeitlicher und örtlicher Unterscheidungsfähigkeit) benötigt dabei mehrere Sekunden [13]. Die photochemische Adaptation der Zapfen hingegen benötigt bis zu 10 Minuten. Bis zur vollständigen Dunkeladaptation, also der Erhöhung der Empfindlichkeit bis zu einem Faktor von 10^{12} über Anpassung der Stäbchen, können bis zu 2 h vergehen)[14].

Im Zeitraum bis zur Adaptation an die Umgebung ist das mit dem Alter ohnehin abnehmende[15][16] Kontrastsehen verringert. Kontrastarme Objekte auf der Straße oder am Straßenrand können schlechter erkannt werden. Durch den ständigen Wechsel zwischen unterschiedlichen Beleuchtungsniveaus in Innenraum und Umgebung ermüdet das Auge des Fahrers zusätzlich.

Betrachtet man die absolute Anzahl an Verkehrsunfällen bei Nacht ist diese deutlich geringer als am Tag. Dies ist jedoch auf eine geringere Verkehrsdichte (Schwachverkehrszeiten von ca. 19 – 06 Uhr)[17] und eine damit korrelierende geringere Wahrscheinlichkeit eines Unfalls zurückzuführen. Die Häufigkeit der schweren Unfälle bei Nacht steigt jedoch im Vergleich zur Schwere der Unfälle am Tag. Von den

insgesamt rund 2,5 Millionen in Deutschland verzeichneten Unfällen im Jahr 2015, wurden etwa 300.000 Personenschäden mit 3.500 Getöteten gemeldet. Die Dämmerungs- und Nachtunfälle haben daran einen Anteil von insgesamt 24% bei Personenschaden bzw. bei 34% Getötete)[18].

Wie eingangs erläutert, ist das Kontrastsehen bei Nacht verringert. Dies führt dazu, dass mehr Zeit vergeht, bis ein Objekt wahrgenommen und erkannt wird und schließlich eine Reaktion herbeigeführt werden kann. Nach dem Erkennen des Objekts auf der Straße, welches durch das verringerte Kontrastsehen bei dunkler Umgebung weiter erschwert wird, tritt auch die Reaktion erst verzögert ein. Bis zum Ende einer Reaktion (z.B. das Stehenbleiben nach einer Vollbremsung) vergeht damit bei Nacht insgesamt mehr Zeit. Bei höherer Geschwindigkeit führt dies, wenn ein Unfall aufgrund der längeren Reaktionszeiträume nicht mehr vermieden werden kann, im Gesamten zu höheren Aufprallgeschwindigkeiten und damit zu schwerwiegenderen Unfällen.

Durch eine gezielte Lenkung der Aufmerksamkeit des Fahrers und ein früheres Warnen des Fahrers kann den erschwerenden Bedingungen bei Nacht entgegengewirkt werden. Eine frühere Blickzuwendung auf den Straßenverkehr und ein größerer Informationsfluss im relevanten, im Bereich des Verkehrsgeschehens liegenden, Bereich haben das Potential die Kaskade von der Wahrnehmung bis zum Ende einer Reaktion bei Nacht an diejenige vom Tag anzunähern.

2.2 STAND DER TECHNIK

Wie bereits erwähnt, werden sowohl bei optischen Systemen als auch bei Sensoren im Fahrzeug die Innovationszyklen immer kürzer. Glühlampen werden in Scheinwerfern zu Raritäten, die Lichtverteilung kann an verschiedene Situationen angepasst werden und Fernlicht kann hochauflösend andere Verkehrsteilnehmer ausblenden. Sensoren erkennen Straßenmarkierungen und Hindernisse und können bei Bedarf Informationen an Aktoren liefern, die aktiv in das Fahrverhalten eingreifen und gegebenenfalls Notbremsungen einleiten.

Dennoch ist der Fahrer im Fahrzeug weiterhin ein entscheidender Faktor, dessen Aufmerksamkeit und Fahrleistung einen großen Einfluss auf den Fahrerfolg hat. Es sollen folgend Systeme vorgestellt werden, die dem Fahrer entweder mehr Informationen während der Fahrt zur Verfügung stellen, oder ihn durch aktive Assistenz in der Fahraufgabe unterstützen.

Der Schwerpunkt liegt dabei auf Systemen, deren Technologien für eine spätere Verwendung in der vorliegenden Arbeit interessant sind oder vergleichbare Funktionalitäten bieten.

2.2.1 OPTISCHE SYSTEME

Adaptive Frontlighting System (AFS)

Das sogenannte Adaptive Frontlighting System (*kurz: AFS*) erweitert die Funktionalität des Abblendlichts so, dass es die Lichtverteilung abhängig von Geschwindigkeit, Lenkbewegung und weiteren Faktoren an die gegebenen Bedingungen anpasst[19]. Hierzu gehören unter anderem das Kurvenlicht, das Abbiegelicht, aber auch Stadt-, Autobahn- und Landstraßenlicht. In Kurven wird der Lichtkegel, üblicherweise abhängig von dem Lenkradeinschlag, dynamisch in die Kurve geschwenkt. Anstatt nur geradeaus zu leuchten, kann durch das AFS der Fahrweg im eigentlichen Sinne ausgeleuchtet werden. Beim Abbiegen wird auf der relevanten Seite ein zusätzlicher Lichtkegel erzeugt. So können auf dem Abbiegeweg befindliche Personen oder Hindernisse frühzeitig erkennbar gemacht werden.

Je nach Geschwindigkeit befindet sich das Abblendlicht im Stadt-, Land- oder Autobahnmodus. Bei geringen Geschwindigkeiten innerhalb der Stadt wird die Breite der Lichtverteilung auf Kosten der Reichweite erhöht. Im Stadtverkehr kann von Straßenbeleuchtung ausgegangen werden, die unabhängig vom Licht des Kraftfahrzeugs eine Fernsicht ermöglicht. Gefahren sind hier vorwiegend von den Straßenrändern durch Fahrradfahrer oder Fußgänger von beiden Seiten zu erwarten. Außerorts und auf Autobahnen erhöhen sich die Geschwindigkeiten und die Umgebungsbeleuchtung ist im Vergleich zu

innerorts reduziert. Um eine rechtzeitige Reaktion zu ermöglichen, muss die Ausleuchtung des Fahrwegs durch das eigene Fahrzeug eine möglichst hohe Reichweite erreichen. Die Wahrscheinlichkeiten für Gefahren von außerhalb des Straßenverlaufs nehmen von Innerorts über Außerorts hin zu Autobahnen ab. Eine breite Ausleuchtung kann hier damit zu Gunsten einer hohen Reichweite reduziert werden.

Zusatz-Fernlicht und Adaptive Driving Beam (ADB)

Automobilhersteller wie beispielsweise BMW und Audi verwenden neben den Funktionen im Abblendlicht ein Zusatz-Fernlicht basierend auf Laserlicht. Hiermit ist eine weitere punktuelle Ausleuchtung bis hin zu 600 m vor dem Fahrzeug möglich [20].

Dieses Fernlicht wird jedoch erst ab Geschwindigkeiten von über 60 km/h automatisiert zugeschaltet und auch nur, wenn sich keine anderen Verkehrsteilnehmer im Lichtkegel des vollen Fernlichts befinden. Die möglichen Einsatzzeiten von vollem Fernlicht, unabhängig von der zugrundeliegenden Technologie, betragen in etwa 10% der Fahrtzeiten bei Nacht[21]. Mit zunehmendem Verkehr wird auch die Nutzbarkeit von vollem Fernlicht geringer. Abhilfe schafft hier das „Blendfreie [bzw.] Segmentierte Fernlicht“ (*englisch*: Adaptive Driving Beam, *kurz*: ADB), welches andere Verkehrsteilnehmer ausblendet und somit diese nicht behindert werden. Durch alle Fernlicht-Funktionen wird der optische Gesamt-Informationsfluss erhöht, ohne jedoch eine explizite Warnung vor Gefahren zu liefern. Bei Ab-

lenkung können Fahrer, auch mit eingeschaltetem Fernlicht, relevante Informationen zu bspw. Hindernissen aus der Umgebung übersehen[22].

Nachtsicht und Markierungslicht

Ein weiteres System wird derzeit von Herstellern wie Cadillac („Night Vision System“)[23, 24], BMW („BMW Night Vision“)[25, 26], Audi („Nachtassistent“)[27, 28] und Mercedes („Nachtsicht-Assistent Plus“)[29, 30] basierend auf Infrarot-Technologie angeboten. Die Funktionsweise dieser Systeme gleicht der eines Nachtsichtgeräts. Dabei wird ein Bild der Umgebung durch eine Wärmebild-Kamera erfasst und dem Fahrer über ein Display im Fahrzeuginnenraum angezeigt. Personen in dunkler Kleidung und schlecht wahrnehmbare Tiere sind damit auch bei Nacht gut erkennbar. Auch Gegenstände, die Wärme abstrahlen wie beispielsweise ein gerade erst zum Stillstand gekommenes Fahrzeug, können über das Zusatzdisplay sichtbar gemacht werden.

Eine Einschränkung des Systems liegt im aktuell vorhandenen Detektionsbereich: das Sichtfeld beschränkt sich auf 24° horizontal und 19° vertikal. Zwar wird in diesem Bereich die Detektion von Hindernissen bei schlechten Witterungsbedingungen verbessert, doch bei Temperaturen ab 25 °C und mehr ist die Erkennbarkeit von Gegenständen eingeschränkt (Abschaltung des Systems bei 32°C) [31].

Die Wiedergabe der Information über die Umgebung an den Fahrer erfolgt dabei vorwiegend über einen Bildschirm im Innenraum des Fahrzeugs. Der Fahrer muss somit den Blick vom Verkehrsgeschehen

abwenden und auf den jeweiligen, darstellenden Bildschirm lenken. Eine Studie des ADAC [32] bestätigt, dass diese Anzeigen von einem Großteil eines Probandenkollektivs als ablenkend empfunden werden.

Um zu vermeiden, dass der Fahrer den Blick nicht von der Straße in den Innenraum wendet und damit die auf dem Bildschirm angezeigte Gefahr nicht erkennt, wurde ein zusätzliches Marking Light (*engl. für: „Markierungslicht“*) eingeführt. Dieses Markierungslicht nutzt eine Zusatzleuchte im Frontbeleuchtungssystem um mögliche, nicht erkannte Gefahren durch direktes, punktuell Anleuchten für den Fahrer sichtbar zu machen [33, 34]. Der Blick und die Aufmerksamkeit des Fahrers werden dadurch direkt auf die Gefahrensituation gerichtet. Dies führt jedoch zur einer weiteren Gefahr: Durch die Korrelation von Blick- und Lenkrichtung bei Autofahrern kann durch dieses Mittel eine weitere gefährliche Situation hervorgerufen werden, indem die Bewegungsrichtung des Fahrzeugs hin zur angeleuchteten, „markierten“ Stelle angepasst wird.

2.2.2 ASSISTENZSYSTEME – MENSCH-MASCHINE-INTERAKTIONEN

Head Up Display

Als aktuell vielversprechendste Form der visuellen Mensch-Maschine-Interaktion (*kurz*: MMI, oder: *engl.* Human-Maschine-Interaction, *kurz*: HMI) bzw. informatorischen Fahrerassistenz wird von Experten aktuell das Head-Up-Display (*kurz*: HUD) bezeichnet[35] [36]. Die Information, die zuvor im Kombi-Instrument oder im Infotainment-System angezeigt wurde und den Blick des Fahrers damit von der Straße abgelenkt hat, wird beim HUD virtuell kurz vor das Fahrzeug projiziert. Im peripheren Blickfeld des Fahrers (außerhalb der sog. Foveau, in der die höchste Sehschärfe erreicht werden kann[14]) gelegen, werden die Informationen des HUD während der Fahrt ohne weitere Anstrengung wahrgenommen. Zum Erkennen der Information reichen lediglich kurze Blickbewegungen. Der Fahrer wird damit nur geringfügig vom Verkehrsgeschehen abgelenkt.

Die Darstellung ist aktuell, wie oben erwähnt, virtuell nur kurz vor dem Fahrzeug positioniert. Dieser Blickpunkt ist dabei mit den Blickbereichen junger Autofahrer vergleichbar. Nach A. Biermann [37] bleiben Blicke von unerfahrenen Fahrern vorwiegend kurz vor dem Fahrzeug verortet. Diese nahen Blickpunkte führen zu einer Häufung von Unfällen in der Gruppe junger Fahrer. Das HUD führt somit dazu, dass auch erfahrene Fahrer den Blick immer wieder nah vor das Fahrzeug wenden müssen um die gegebene Information richtig

MOTIVATION

zu erkennen (Abbildung 2.4). Dies kann in anspruchsvollen Situationen zu Ablenkung führen und den Fahrer weiter unter Stress setzen.



Abbildung 2.4 Sicht aus einem Mercedes Benz C-Klasse mit HUD. Das Head-Up Display (grüner Pfeil) ist auf maximale Höhe eingestellt und zeigt Informationen virtuell etwa 10 m vor dem Fahrzeug an. Auch bei stockendem Verkehr muss der Blick zwischen HUD und Straßenführung (rotes Oval) hin und her bewegt werden.

In der aktuellen technischen Umsetzung ist das HUD in seinen Projektionsmöglichkeiten jedoch noch weiter beschränkt: Anzeigen können aktuell nur relativ zur Fahrerposition dargestellt werden. Ändert der Fahrer seine Sitz-/Kopf-Position, kann die gezeigte Information in einen Bereich außerhalb der Erkennbarkeit geraten. Für jeden Fahrer und jede Sitzposition muss der noch stark begrenzte Darstellungsbereich angepasst werden. Absolute Darstellungen, die unabhängig von der Position des Fahrers sind, sind aktuell nur mit aufwändiger Erweiterung des HUD durch mehrere Kameras zur Erfassung der Augenposition und Blickrichtung des Fahrers umsetzbar.

Für die Funktion bspw. eines Engstellenassistenten ist eine absolute Darstellung der Fahrzeugbreite auf der Straße notwendig. Das HUD ist hierfür deswegen nur bedingt einsetzbar.

Spurhalteassistent

In Engstellen kann aktuell lediglich ein anderes, auf Umfeldsensorik basierendes System den Fahrer unterstützen: der sogenannte Spurhalteassistent. Über Kamera-Daten wird die Fahrbahn erfasst und, je nach System-Ausprägung, eine Ideallinie des Streckenverlaufs für das Fahrzeug berechnet. Wird das System durch den Fahrer aktiviert, greift es automatisiert in die Lenkung ein, wenn die berechnete Ideallinie oder die markierte Spur verlassen wird.

Die derzeit verfügbaren Systeme funktionieren nicht ideal: Gerade in anspruchsvollen Situationen wie bspw. in Baustellen, in denen oft eine doppelte Fahrbahnmarkierung vorhanden ist, oder aber auf Strecken ohne Fahrbahnmarkierung, weist dieses System Schwächen auf. Die Spur wird falsch oder nicht erkannt und das Fahrzeug durch das System ggf. fehlgeleitet. Ein Fahrer, der dieses System zur Unterstützung nutzt, kann bei Ausfall oder fehlerhaftem Auslösen in gerade diesen anspruchsvollen Situationen schnell überfordert sein. Zudem ist das System bei vielen Herstellern geschwindigkeitsbeschränkt und steht beispielsweise ab etwa 200 km/h nicht mehr zur Verfügung (Bsp. basiert auf Fahrzeugen von BMW).

Auch plötzliche Lenkeingriffe und/oder eine fehlerhafte Erfassung der Fahrbahn können Fahrer überrumpeln und zu impulsiven Reaktionen des Fahrers führen.

Auffahrwarnung

Um Unfälle zu vermeiden gibt es seit einigen Jahren die sogenannte Auffahrwarnung. Ohne aktiven Eingriff in die Fahrt wird der Fahrer zum Teil akustisch, zum Teil visuell oder haptisch vor einem Herannahen an ein Hindernis gewarnt. Auf Radar und Lidar (Radar: funkgestützte Ortung und Abstandsmessung *engl.*: radio detection and ranging, bzw. Lidar: optische Ortung und Abstandsmessung, *engl.*: light detection and ranging) basierende Sensoren tasten permanent die Fahrzeugumgebung ab. Wird der Abstand zu bspw. einem vorausfahrenden Fahrzeug geringer und das Fahrzeug nähert sich bis auf einen kritischen Abstand an das vorausfahrende Fahrzeug an, wird der Fahrer über die oben genannten Kanäle darauf hingewiesen und vor einem Auffahren bzw. einer möglichen Kollision gewarnt.

Während einer potentiellen Auffahrsituation wird die Aufmerksamkeit des Fahrers unabhängig von der Wiedergabeart zurück ins Fahrzeuginnere (beziehungsweise beim HUD virtuell kurz vor das Fahrzeug) gelenkt. Der Fahrer erhält eine Warnung und muss zunächst die Ursache erkennen. Dies kann in kritischen Situationen wichtige Zeit kosten. In einer Studie zur Übernahme der Fahrerrolle nach Ablenkung in Level 3 Fahrzeugen (sog. „hochautomatisiertes Fahren“) von W. Vlakoveld et al. [38] wurde eine Zeit von rund 6 Sekunden angegeben, die ein Fahrer benötigt, um die Gefahrenquelle auszumachen und zu reagieren.

Automatische Bremsfunktion

Eine Erweiterung der Auffahrwarnung ist die automatische Bremsfunktion. Hier wird nach Erkennen der Gefahr des unmittelbar bevorstehenden Auffahrens automatisiert ein Bremsmanöver eingeleitet, sofern der Fahrer selbst nicht rechtzeitig reagiert. Aufgrund des aktiven Eingreifens und zum Teil falsch positiver Erkennung kann jedoch die Akzeptanz des Fahrers sinken und ein Deaktivieren des Systems durch den Fahrer zur Folge haben.

2.2.3 ZUSAMMENFASSENDE ÜBERSICHT DES STANDS DER TECHNIK

Es lässt sich festhalten, dass eine Vielzahl an Systemen zu Verfügung stehen um den Fahrer während der Fahrt zu unterstützen und ihn vor Gefahren zu warnen. Die Systeme greifen auf diverse Sensortypen zurück, die wie auch die optischen Systeme, immer weiterentwickelt werden und eine genauere Umfelderkennung ermöglichen. Diese Systeme bieten einen Mehrwert für Fahrzeugführer, haben an einigen Stellen jedoch auch noch großes Entwicklungspotential. Tabelle 2.1 zeigt die aktuell noch vorhandenen Handlungsfelder der Systeme auf. Systeme wie AFS und ADB erhöhen die Sichtbarkeit von Hindernissen auf der Strecke, ohne jedoch konkret auf diese hinzuweisen. Systeme basierend auf Infrarot-Nachtsicht-Geräten führen zu einer Blickabwendung von der Straße entweder auf ein Display im Innenraum oder auf das Hindernis an sich. Das HUD reduziert diese

Blickabwendung zwar, kann sie aber nicht gänzlich vermeiden, da für das Scharfsehen und damit das Erkennen von Hinweisen eine (geringere) Blickbewegung weiterhin nötig ist.

Spurhalteassistenten erleichtern dem Fahrer u.a. das Manövrieren in schwierigen Situationen, können aber durch aktive, plötzliche Lenkeingriffe zu impulsiven Reaktionen des Fahrers führen. Auch die Auffahrwarnung und die automatische Bremsfunktion agieren für den Fahrer unerwartet und können ihn dadurch überraschen und zu ungünstigen Reaktionen führen.

Tabelle 2.1 Übersicht der für die vorliegende Arbeit relevanten, auf dem Markt verfügbaren Systeme mit zugrundeliegenden Technologien (links) mit deren Nutzen (Mitte) und Schwächen (rechts).

AFS/ADB		
CAN-/Kamera-Daten	Bedarfsabhängige Beleuchtung ohne Blendung	Keine Aufmerksamkeitslenkung
Night Vision		
FIR-/Kamera-Daten	Erkennen auch dunkler Hindernisse	Ablenkung auf Display in den Innenraum, Abschaltung bei >30°C
HUD		
Darstellendes System (Basis: CAN-/Navigationsdaten)	Anzeige virtuell vor dem Fahrzeug	Sehr kurze (virt.) Distanz zum Fzg erfordert weitere Blickbewegungen
Spurhalteassistent		
GPS-/Kamera-/CAN-Daten	Spur wird bei Bedarf gehalten	Keine Funktion ohne GPS, Fehlaktivität möglich, Ausfall ab 200 km/h
Auffahrwarnung/Automatischer Bremsassistent		
IR-/LIDAR-/CAN-Daten	Opt./Akk. Auffahrwarnung bzw. aktiver Bremsengriff bei Gefahr	Gefahrenquelle für den Fahrer nicht sofort erkennbar

2.3 STAND DER GESETZGEBUNG

AKTUELLER STAND DER GESETZGEBUNG

Zum Zeitpunkt des Beginns der vorliegenden Arbeit war das Thema Lichtprojektionen im Straßenverkehr in der weltweiten Gesetzgebung noch kaum behandelt. Eine direkte Regelung bestand und besteht weiterhin nicht. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit sind jedoch erste Lichtprojektionsdarstellungen in einzelnen Märkten verfügbar. Ein Beispiel dafür sind in Großbritannien zugelassene Zusatzleuchten mit Projektionsfunktion für Fahrradfahrer (Abb. 2.5 A) [39]. Durch die farbige Zusatzprojektion sollen Kraftfahrzeugführer Fahrradfahrer an Kreuzungen früher erkennen können und damit Kollisionen vermieden werden.

Im Kfz-Straßenverkehr ist der Genesis G90 das weltweit erste Fahrzeug, welches eine Zulassung für Lichtprojektionen während der



Abbildung 2.5 Projektionen im Straßenverkehr. Die Firma „Blaze“ bietet bereits Projektionssysteme für Fahrradfahrer an, die sie an Kreuzungen vor Unfällen schützen sollen (A, gestrichelter Kreis). Bild: radmarkt.de

Als erster Fahrzeug-Hersteller bietet „Genesis“ beim G90 ab 2020 eine Funktion an, die über Projektionen auf der Fahrbahn den Rückwärtsgang des Fahrzeugs indizieren soll (B).

Fahrt bei geringen Geschwindigkeiten erhält (Abb. 2.5 B). Zum Zeitpunkt der Entstehung der vorliegenden Arbeit nur in Südkorea zugelassen, werden beim Einlegen des Rückwärtsgangs aus den Heckleuchten weiße Markierungen auf die Straße projiziert. Wie bereits bei der Fahrrad-Leuchte soll auch hier in schlecht einsehbaren Situationen eine Anzeige über Projektionen hinter dem Fahrzeug generiert werden, die eine frühere Wahrnehmung des Fahrzeugs und dessen Bewegungsrichtung möglich macht.

Für alle anderen Märkte oder bei Geschwindigkeiten über der Schrittgeschwindigkeit sind derzeit noch keine Gesetze oder Normen hinsichtlich Projektionen im Straßenverkehr bekannt. Lediglich Projektionssysteme wie der „Welcome Light Carpet“ von BMW[40] und Logo-Projektionen anderer Hersteller wie Jaguar[41], Mercedes Benz[42, 43] und Mini[44] sind als Vorfeldbeleuchtung zugelassen. Diese übernehmen allerdings keine kommunizierende Funktion mit dem Fahrer oder der Umgebung und sind deshalb für eine weitere Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit nicht relevant.

Farbe und Leuchtdichtewerte sind aktuell in der Gesetzgebung der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (*engl.*: United Nations Economic Commission for Europe“, *kurz*: UNECE, *oft*: ECE), an verschiedenen Punkten vor dem Fahrzeug festgelegt (weitere Länder wie Australien, Thailand u.W. sind Teil dieser Kommission und passen ihre länderspezifische Gesetzgebung entsprechend den Entscheidungen der UNECE an).

Nach ECE R112 bzw. R113 ist die Farbe des emittierten Lichts von Frontscheinwerfern auf weiß festgelegt [45, 46]. Ebenso wird in der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung in Paragraph 50 darauf hingewiesen, dass „für die Beleuchtung der Fahrbahn [...] nur weißes Licht verwendet werden [darf]“ [47] (Fahrtrichtungsanzeiger sind hier ausgenommen, da diese nicht der Beleuchtung dienen sondern eine Signalfunktion haben). Aufgrund der expliziten Nennungen der Farbe von Licht vor dem Fahrzeug wurde in der vorliegenden Arbeit auf eine Farbwahl außerhalb des Weißspektrums verzichtet.

2.4 STAND DER FORSCHUNG

Die Defizite der aktuell auf dem Markt verfügbaren Assistenzsysteme (s. Tabelle 2.1) können mit einem übergreifenden System behoben werden, welches sowohl die Fahrspur und mögliche Hindernisse auf der Strecke erkennt und den Fahrer frühzeitig warnt, seinen Blick dabei jedoch nicht von der Straße ablenkt. Um dem Fahrer die in Abschnitt 2.2 gelisteten Sensor-Daten von Spurhalteassistent, Auffahrwarner und automatischer Bremsfunktion ohne Ablenkung zur Verfügung zu stellen bietet sich der visuelle Kanal an.

Zwar hat das HUD das Potential diese Funktion zu erfüllen, birgt aufgrund von Einschränkungen in der technischen Umsetzung jedoch noch Verbesserungspotential. Eine Möglichkeit, dem Fahrer die Informationen zielführender zu vermitteln ist die Projektion von Lichtsymbolen auf die Straße.

Folgend soll ein Überblick der bislang veröffentlichten Forschungsarbeiten zur Nutzung von Lichtprojektionen als Assistenzsystem vorgestellt werden. Die Projektionen werden dabei als Mittel der Kommunikation mit dem Fahrer, also als eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, genutzt.

Die genannten Forschungsarbeiten werden im folgenden Abschnitt nur kurz vorgestellt um das Handlungsfeld im darauffolgenden Kapitel zu definieren. In Kapitel 4 werden die Resultate der veröffentlichten Forschungsarbeiten zusammen mit den Resultaten aus der vorliegenden Dissertation diskutiert.

Im Zeitraum der Entstehung der vorliegenden Arbeit wurden einige Arbeiten zum Thema lichtbasierte Kommunikation bzw. Fahrerassistenz veröffentlicht. Dabei wurden sowohl lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme zur Fahrmanöverunterstützung beim Einfädeln, Spurwechseln und der Geschwindigkeitsanpassung untersucht[48], als auch die Möglichkeit der Unterstützung von Fahrzeugführern beim Überholvorgang in Engstellen wie bspw. Baustellen[49]. Im ersten Fall wurde die Information durch eine dynamische Änderung verschiedener graphischer Darstellungen der Lichtprojektionen erreicht. Im zweiten Fall, der Unterstützung in Engstellen, wurde der Mehrwert von einer Fahrzeugbreitendarstellung mittels zweier paralleler Linien untersucht.

P. Jahn und C. Neumann[50] untersuchten die potenziell ablenkende Wirkung auf andere Fahrzeugführer von solchen lichtbasierten Fahr-

zeugbreitendarstellungen am Beispiel von parallelen Linien undeinem heller erleuchteten „Fahrschlauch“ (die Fahrzeugbreite wird vor dem Fahrzeug vollständig positiv kontrastiert).

Das Thema Kommunikation mittels Projektionen wird des Weiteren vermehrt für die Kommunikation zwischen vollautonom fahrenden Fahrzeugen und anderen, vorwiegend menschlichen, Verkehrsteilnehmern untersucht (sog. Car-2-X-Kommunikation). Die Arbeiten, die die Car-2-X-Kommunikation untersuchen, befassen sich sowohl mit der Darstellungsart (Lichtband, Projektionen oder Displays am Fahrzeug)[51], als auch mit potentiellen Symbolen die bei Lichtprojektionen genutzt werden können[52] [53].

Alle in Abschnitt 2.4 genannten Arbeiten zeigen die Möglichkeiten von Lichtprojektionen zur Nutzung als Fahrerassistenzsysteme in verschiedenen Situationen auf.

2.5 HANDLUNGSFELD

In Abschnitt 2.1 wurde aufgezeigt, dass die Weiterentwicklung von Sicherheitssystemen zum Schutz von Fahrzeuginsassen und anderen Verkehrsteilnehmern sinnvoll und notwendig ist. Die zum aktuellen Zeitpunkt zur Verfügung stehende Technik wurde in Abschnitt 2.2 erläutert. So sind in den heutigen Fahrzeugen bereits diverse sensorgestützte Systeme verbaut, die direkt in die Fahrt eingreifen können. Weiterhin können diese Systeme den Fahrer auf verschiedenen Kanälen (optisch, akustisch und haptisch) informieren.

Bei haptischer oder akustischer Warnung ist die Weitergabe von Informationen bei aktuell auf dem Markt befindlichen Systemen wenig ausgeprägt und nur durch einzelne Signale realisiert. Beispielsweise ertönt lediglich ein Warnton, oder es erfolgt eine Vibration des Lenkrades, unabhängig von der Art der potentiellen Gefahr. Die Quelle der Gefahr muss vom Fahrer selbst erkannt werden. Optische Informationen können bereits umfangreicher im Fahrzeug dargestellt werden. Von den in Abbildung 2.6[54] dargestellten, beispielhaften Anzeigen von Geschwindigkeitsbegrenzung, über die eine mögliche Auffahrwarnung bis hin zu Abbiegepfeilen der Navigationsanzeige wird auf ein großes Portfolio an Graphiken und Schrift zurückgegriffen.



Abbildung 2.6 Diverse Anzeigen im Innenraum. Viele Systeme vermitteln dem Fahrer während der Fahrt Informationen. Alle gemeinsam lenken sie den Blick des Fahrers weg vom relevanten Bereich: der Straße vor ihm (rotes Oval).

Bild: InfernalInnovations.com

Diese Art von Anzeigen hat aktuell eine Gemeinsamkeit: Der Blick des Fahrers wird in den Innenraum gelenkt, oder, im aktuell besten Fall des HUD, virtuell kurz vor das Fahrzeug. Wird der Blick des Fahrers bei Nacht in den Innenraum des Fahrzeugs gerichtet, so kann die Innenraumbeleuchtung abhängig von der Intensität zu einer subjektiven Blendung und damit zur Reduktion der Konzentration des Fahrers führen [55].

Bei der Weiterentwicklung von Sicherheitssystemen müssen die Erkenntnisse von Riedel [55], die Zahlen des BFS[6] und die Umfrage der Allianz Versicherung[7] berücksichtigt werden, um auch die Gefahren der Erweiterung des Informationspakets im Innenraum des Fahrzeugs miteinzubeziehen.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines passiven Sicherheitssystems, welches den Fahrer frühzeitig auf herausfordernde Fahraufgaben vorbereitet und unterstützt, ohne ihn von vom Straßenverkehr abzulenken. Die hierzu notwendigen Informationen sollen über bereits bekannte Sensorsysteme gesammelt und durch Transmitter an darstellende Medien weitergegeben werden. Eine mögliche Form der Darstellung zur Kommunikation mit dem Fahrer ist auf Basis von vorhandenen Lichtsystemen gegeben: Lichtsymbole, die auf die Straße vor dem eigenen Fahrzeug projiziert werden, können als Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine fungieren. Über definierte Symbole kann der Fahrer frühzeitig auf Hindernisse hingewiesen werden, die zuvor durch die vorhandenen Umfeldsensoren detektiert werden.

Werden die Symbole in, zu definierender, ausreichender Distanz vor das Fahrzeug auf die Fahrbahn projiziert, muss der Fahrer zum Wahrnehmen, Erkennen und Reagieren den Blick nicht von der Fahrbahn abwenden. Weiterhin kann das Erscheinen eines Lichtsymbols vor dem Fahrzeug zu einer aktiven Blickzuwendung in die relevanten Bereiche vor dem Fahrzeug führen und die Aufmerksamkeit des Fahrers bei Bedarf sogar erhöhen. Dem Fahrer stehen damit ohne Blickabwendung zu einem früheren Zeitpunkt mehr Informationen zur Verfügung.

Intuitiv verständliche Projektionsdarstellungen können dem Fahrer ein erhöhtes Sicherheitsempfinden vermitteln und ihm sowohl Informationen zum eigenen Fahrzeug als auch zu den darin verbauten Sensoren geben. Damit kann auch im Hinblick auf autonome Fahrzeuge das Vertrauen in die verbauten (Sensor-)Systeme erhöht werden, ohne den Fahrer aus seiner aktiven Rolle zu nehmen.

Kapitel 3

UMSETZUNG

Im folgenden Kapitel wird die Umsetzung des in Kapitel 2 beschriebenen Assistenzsystems vorgestellt, welches den Fahrer unterstützt, ohne ihn von der Fahraufgabe und dem Straßenverkehr abzulenken. Das System basiert als MMI dabei auf der Kommunikation mit dem Fahrer während der Fahrt.

Für den Erfolg dieser Kommunikation muss sichergestellt werden, dass sie vom Empfänger (in diesem Fall dem Fahrer) verstanden wird. Hierfür muss geprüft werden, ob eine solche Kommunikation während der Fahrt möglich ist und ob Symbole von Testpersonen als Projektion auf der Straße in gleicher Weise interpretiert werden (Abschnitt 3.1). Bei der Auswahl der Symbole müssen sowohl physiologische als auch psychologische Aspekte beim Prozess der Wahrnehmung sowie die technische Machbarkeit berücksichtigt werden (Abschnitt 3.1.1.).

Weiterführend ist der Abgleich zwischen im Simulator erhaltener Ergebnisse mit Feldstudie notwendig (Abschnitt 3.2). Im Feldversuch werden Ergebnisse der Simulator-Studie verifiziert und vertieft. Erhaltene Ergebnisse werden dann zusammen mit Ergebnissen anderer Forscher diskutiert (Abschnitt 3.1.4).

In Abhängigkeit von den im Feldtest erzielten Resultaten können Anforderungen an Scheinwerfer gestellt werden, wie sie im Straßenverkehr mit dem aktuellen Stand der Technik realisierbar wären (Abschnitt 3.3). Potentiale und Schwächen der Umsetzung können anhand einer prototypische Umsetzung in einem Satz Scheinwerfer diskutiert werden (Abschnitt 3.3.2).

3.1 STUDIE 1 – DIE SEMANTIK DES LICHTS: KANN MITTELS LICHTPROJEKTIONEN MIT DEM FAHRER KOMMUNIZIERT WERDEN?

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, für diese Kommunikation Lichtprojektionen vor dem Fahrzeug zu nutzen, die dem Fahrer relevante Informationen zur Verfügung stellen. Da hierbei Licht als Medium der Kommunikation verwendet wird gilt zunächst zu prüfen, welche Ausprägung diese Projektionen haben müssen, um vom Fahrer richtig verstanden zu werden. Im Anschluss muss bewertet werden, ob eine solche Art der Kommunikation erfolgreich ist und Kraftfahrer einheitlich auf diese Projektionen reagieren.

Die Prüfung der Interpretation von Lichtprojektionen im Straßenverkehr wird notwendig, da auch diese Art der Kommunikation bzw. Sprache, wie auch bei verbaler Sprache oder Gestik, kontextabhängig ist. So kann beispielsweise ein erhobener Daumen in Deutschland in Folge auf die Frage nach dem Wohlbefinden bedeuten „alles in Ord-

nung“. Im Mittelmeerraum hingegen kann diese Geste unter Umständen als Beleidigung aufgefasst werden. Unter Wasser, beim Tauchen, wird der nach oben zeigende Daumen sogar gedeutet als: „Irgendetwas ist nicht in Ordnung. Ich muss an die Oberfläche!“ Steht hingegen eine Person mit ausgestrecktem Daumen am Straßenrand, ggf. mit einem Schild in der Hand, ist den meisten wiederrum klar: diese Person bittet um eine Mitfahrgelegenheit [56, 57].

Auch bei Projektionen auf die Fahrbahn muss somit getestet werden, ob die projizierten Symbole von Probanden als Informationsquelle angenommen werden; wie sie bei Annahme interpretiert werden und welche Reaktion die Probanden daraufhin einleiten.

Erste Studien zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern zeigen, dass beispielsweise auch bereits bekannte Symbole nur schlecht erkannt werden und langer Reaktionszeiten bedürfen: So haben Reschke[52] und Stanley Electric Co., Lt. [53] im jeweiligen Kulturkreis bekannte Symbole getestet. Trotz Bekanntheit in anderen Kontexten konnte keines der Symbole hinsichtlich intuitivem Verständnis überzeugen.

Es stellt sich somit die Frage, ob es möglich ist, mit dem Fahrer mittels Projektionen von Symbolen auf die Fahrbahn erfolgreich und eindeutig zu kommunizieren.

3.1.1 VORBEREITUNG UND AUSARBEITUNG

In unserem Alltag existiert eine Vielzahl an Symbolen und Darstellungen, die für eine mögliche Verwendung in Frage kommen. Um eine Auswahl zu treffen, wurden für die vorliegende Arbeit psychologische und physiologische Aspekte der menschlichen Wahrnehmung betrachtet. Zusätzlich wurde im Hinblick auf mögliche gesetzliche Zulassung, v.a. im UNECE-Raum, und technische Machbarkeit (jeweils in den kommenden 5 bis 10 Jahren) eine Schnittmenge an potentiellen Symbolen gebildet.

TECHNISCHE MACHBARKEIT

Zum Stand der Ausarbeitung sind hochauflösende Systeme bei Fahrzeugherstellern wie Mercedes Benz [58] und Audi [59], als auch bei Scheinwerferherstellern wie Hella [60], ZKW [61], Valeo [62] und Automotive Lighting [63] bereits im Gespräch, jedoch noch nicht auf dem Markt. Erste Matrix-Systeme sowie Schwenkmodule sind bereits verfügbar (Audi [64], Mercedes Benz [65], BMW [66]). Die Darstellung einfacher, wenig verzweigter Symbole ist somit bereits möglich. Auch im Hinblick auf das Erkennen von Informationen während der Fahrt, die schnell erfolgen sollte um das Ablenkpotehtial zu minimieren, wird die Auswahl auf sehr einfache Geometrien der Symbole reduziert. Diese können dadurch sowohl von technisch einfach realisierten Scheinwerfersystemen (Segmentleuchten oder Blenden) bis

hin zu komplexen, hochauflösenden oder scannenden Scheinwerfersystemen dargestellt werden.

Bezugnehmend auf die aktuelle Gesetzgebung (Abschnitt 2.2) und Gespräche mit führenden Mitarbeitern gesetzesempfehlender Gremien [67], wird eine Darstellung der Projektionssymbole im Bereich des von der UNECE vorgegebenen Weißspektrums durch Kontrasterzeugung gewählt. Zur Symboldarstellungen stehen damit zwei Optionen zur Verfügung: Entweder das Erzeugen eines Positivkontrasts, bei dem die gewählten Symbole eine höhere Leuchtdichte aufweisen als das zugrundeliegende Abblendlicht. Oder das Erzeugen eines Negativkontrasts, für den die Leuchtdichte an den notwendigen Stellen in der Lichtverteilung reduziert wird.

Aufgrund von in den UNECE[46][68] und der StVO[47] festgelegten Mindestanforderungen an Scheinwerferlichtverteilungen und der Grundidee des Erzeugens einer additiven Lichtfunktion, wurde die Realisierung einer Projektionsdarstellung über Negativkontrast verworfen. Das Entfernen von Licht in einem vordefinierten Bereich widerspricht dem zusätzlichen, sicherheitsrelevanten Nutzen einer Funktion. Gefahrenpotentiale wie z.B. kleine Wildtiere oder Fahrzeugteile können sich bei eingeschalteter Funktion in den nicht-beleuchteten Bereichen befinden und übersehen werden.

Weiterhin kann ein durch Negativkontrast erzeugtes Symbol schneller durch äußere Einflüsse wie bspw. andere Verkehrsteilnehmer oder Straßenbeleuchtung überleuchtet werden, wodurch es nicht mehr

sichtbar wird. Bei Positivkontrast ist dieser Effekt im Allgemeinen geringer.

Aus diesem Grund fiel die Wahl auf die zwar technisch aufwändigere, vom Sicherheitsaspekt her aber vielversprechendere Umsetzung der Symboldarstellung in Positivkontrast.

PSYCHO-PHYSIOLOGISCHE BEWERTUNG

Wie eingangs erläutert, muss ein wirksames, auf MMI basierendes, Assistenzsystem vom Menschen erkannt und richtig verstanden werden. Bei der Entwicklung eines solchen Systems müssen deshalb physiologische als auch psychologische Aspekte der menschlichen Wahrnehmung betrachtet werden.

Physiologische Wahrnehmung

Der Schwellenkontrast ist als der lokale Kontrast einer Projektion zu dem umgebenden Abblendlicht definiert, bei dem ein projiziertes Bild für eine Person bei genauem Betrachten gerade erkennbar wird. Um auch während der Fahrt von jeder zum Führen eines Kraftfahrzeugs befähigten Person gut erkannt zu werden, muss der Kontrast der gewählten Darstellungen im Anwendungsfall deutlich über dem Schwellenkontrast liegen[69].

Psychologische Wahrnehmung

Je näher sich ein Objekt, beziehungsweise eine Projektion, an einem anderen Objekt, beziehungsweise am Fahrzeug befindet, desto wahrscheinlicher wird eine Zugehörigkeit zwischen den beiden Objekten wahrgenommen[14]. Diese Zugehörigkeitswahrnehmung wird durch einen entsprechenden Abstand zwischen Projektion und Fahrzeug beim Fahrer und anderen Verkehrsteilnehmern erzeugt. Abhängig von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs während der Fahrt sollte damit ein Abstand gewählt werden, der den Blick des Fahrers nicht zu nah vor das Fahrzeug lenkt, aber noch eine Zugehörigkeit erkennen lässt. Damit sollte die Projektion einerseits so weit vom Fahrzeug entfernt sein, wie es für die Blickführung des Fahrers nötig ist (vorzugsweise im Fernfeld vor dem Fahrzeug). Andererseits sollte sie so nah am Fahrzeug sein wie möglich um eine Zugehörigkeit zum jeweiligen Fahrzeug darzustellen (bspw. nah vor dem Fahrzeug beginnend, sodass der Beginn der Projektion für den Fahrer durch die Motorhaube verdeckt wird).

Ein weiteres Merkmal, welches unter psychologischen Aspekten betrachtet wird, ist die Art des zu wählenden Kontrasts. Neben den bereits besprochenen Kontraststärken, also den Kantensteilheiten der gewählten Symbole (möglichst steile Kanten zwischen Symbol und Basis und damit Projektionen mit Kontrast weit über dem Schwellenkontrast), spielt auch die Art des Kontrasts eine Rolle. Werden dunkle Symbole in einer hellen Umgebung abgebildet, können diese schnell

abweisend wirken Positive Kontraste, also im Vergleich zu ihrer Umgebung heller beleuchtete Flächen, wirken vorwiegend einladend[70].

Für die Symbole in der vorliegenden Arbeit wird damit aus Gründen der technischen Umsetzbarkeit und psychologischen Aspekten der menschlichen Wahrnehmung eine Darstellung in Positivkontrast gewählt.

Auswahl der Symbole

Die Wahrnehmung der Umgebung ist als subjektiver Prozess beschreibbar: Bestimmte Objekte in Szenen erhalten mehr Aufmerksamkeit als andere und es werden Schlussfolgerungen zur Interpretation aufgrund von erlerntem Wissen gezogen. Die Interpretation der Bedeutung fußt somit auf individuellen Erfahrungen[14]. Symbole, die zur Kommunikation auf die Straße projiziert werden, sollen möglichst frei von Interpretationsfreiräumen und subjektiven Wahrnehmungen sein.

Weiter sollen die gewählten Symbole schnell erfasst werden können um lange Fixationsdauern auf ebendiese zu vermeiden und gleichzeitig früher Reaktionen des Fahrers herbeizuführen.

Je komplexer eine unbekannte Form aufgebaut ist, desto länger dauert der Prozess des Erkennens und somit der Reaktionsprozess[14, 70]. Symbole mit geringerer Komplexität können schneller und intuitiver erkannt werden und benötigen für ein Handeln, wenn überhaupt, nur kurze Lernzeiten. Diese intuitive Verständlichkeit ist in

der Weiterleitungsfähigkeit der rezeptiven Felder des menschlichen Auges begründet[71].

Um sowohl subjektive und in anderem Kontext erlernte, erfahrungsbasierte Wahrnehmung gering zu halten, als auch eine schnelle Verarbeitung der neuen visuellen Reize zu gewährleisten, wird die Symbolauswahl auf sehr einfache Symbole begrenzt. Eine Wertung zur möglichen Interpretation und damit eine weitere Einschränkung werden nicht vorgenommen. Die Auswahl beschränkt sich basierend auf den vorher genannten Einschränkungen auf drei Formgruppen: rund, dreieckig und rechteckig. Bei den rechteckigen Symbolen werden sowohl ein einfaches Rechteck als auch zwei parallele Linien getestet (Abbildung 3.1).

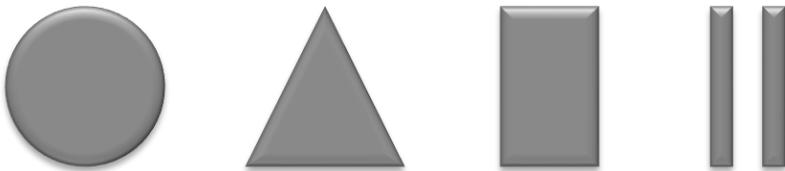


Abbildung 3.1 Die gewählten Symbol-Gruppen zur Untersuchung des intuitiven Verständnisses durch Probanden in der Simulator-Studie.

Es wird zunächst getestet, wie die verschiedenen Symbole in dem neuen Kontext der Kommunikation über Projektionen auf der Fahrbahn während der Fahrt durch eine Probandengruppe interpretiert werden.

Die Symbole der vier Symbol-Gruppen werden in Abhängigkeit der möglichen Aktionen eines Fahrers bei aktiver Fahrt in ihrer Orientierung angepasst. Diese beschränken sich bei bereits begonnener Fahrt

auf aktives Beschleunigen oder Verzögern und die Orientierung nach links oder rechts (beispielsweise durch Spurwechsel oder Abbiegen). Eine weitere, passive Möglichkeit ist es, nichts an der Fahrt zu ändern und damit Geschwindigkeit und Fahrtrichtung beizubehalten.

Tabelle 3.1 fasst die gewählten Symbole mit ihren jeweiligen, den Möglichkeiten des Fahrers während der Fahrt angepassten, Ausprägungen bzw. Ausrichtung zusammen. Die Symbolgruppe der runden Symbolen lässt keine erkennbare Änderung der Ausrichtung zu. Der Kreis wird deshalb als einziges Symbol dieser Gruppe getestet.

Die Gruppe der dreieckigen Symbole lässt sich theoretisch in diversen Ausrichtungen darstellen. Aufgrund geringer Differenzierbarkeit werden in der folgenden Studie nur zwei Symbole getestet: ein vom Fahrzeug weg verjüngendes Dreieck und ein Dreieck, welches sich zum Fahrzeug hin verjüngt.

Mit der angenommenen Auflösung eines später zur Umsetzung verwendbaren Scheinwerfersystems war eine eindeutige Darstellung der nach links und rechts geneigten Dreiecke nicht möglich.

In der rechteckigen Symbol-Gruppe werden Rechtecke und je zwei parallele Linien in den vier Ausrichtungen getestet.

Alle weiteren Symbole, wie bspw. Pfeile, lassen sich als Kombination dieser einzelnen Symbole darstellen und werden hier nicht weiter betrachtet.

Tabelle 3.1 Die Ausrichtung der verschiedenen Symbolgruppen in Abhängigkeit der Reaktionsmöglichkeiten des Fahrers während der aktiven Fahrt. Nicht ausgefüllte Symbole wurden in der Studie nicht verwendet.

	Runde Symbole	Dreieckige Symbole	Rechteckige Symbole	
Parallel zur Fahrtrichtung ($\hat{=}$ Keine Reaktion/ beschleunigen)				
Links geneigt ($\hat{=}$ Orientierung nach links)				
Rechts geneigt ($\hat{=}$ Orientierung nach rechts)				
Quer zur Fahrt- richtung ($\hat{=}$ Geschwindigkeits- reduktion)				

PROBANDENAKQUISE

Um die grundlegende Frage zu klären, ob eine Kommunikation mittels einfacher Symbole prinzipiell möglich ist, wurde das Probandenkollektiv auf Personen mit mindestens zehn Jahren Fahrerfahrung (Alter etwa 28 Jahre) und bis zu einem Maximal-Alter von 40 Jahren beschränkt. Damit sollten auf Alterseffekten basierende Streuungen der Resultate ausgeschlossen werden.

Bei unerfahrenen, und damit meist jungen Fahrern zeigt sich bspw. ein starker Unterschied des Blick- und Fahrverhaltens im Vergleich zu erfahrenen Fahrern (s. Abschnitt 2.2.2, HUD)[37]. Ab einem Alter von etwa 40 Jahren wird ein abnehmendes Sehvermögen angenommen, welches auch mit einer Reduktion der Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung und einer verringerten Fähigkeit des Auges zum Fokussieren auf relevante Informationen einhergeht[72].

Ein weiteres Kriterium bei der Probandenwahl war die lichttechnische Naivität: Es wurden nur Probanden zur Studie zugelassen, die zuvor keinen oder kaum Kontakt zur lichttechnischen Entwicklung hatten. Durch Vorwissen im Bereich der lichttechnischen Entwicklung und mögliche Schnittstellen zum vorliegenden Thema bestand die Gefahr einer Voreingenommenheit bei der Beantwortung der Fragen und damit einer Verzerrung der Studien-Resultate.

AUFBAU DER STUDIE

In dieser ersten Studie musste zunächst die grundlegende Frage nach der Möglichkeit einer Kommunikation mit dem Fahrer mittels auf die Fahrbahn projizierter Symbole geklärt werden. Zur Überprüfung der Wirksamkeit dieser Form der Kommunikation wurden sowohl die potentielle Reaktion des Fahrers als auch dessen Interpretation des projizierten Symbols abgefragt. Um den Einfluss von Umgebungsvariablen gering zu halten, wurde die Studie in einem Nachtfahrssimulator durchgeführt. Hier konnte unter idealisierten Bedingungen eine standardisierte Umgebung geschaffen werden, die zu einer höheren

Reproduzierbarkeit der Studie führt. Streuung der Ergebnisse aufgrund von Umgebungsvariablen wie Lichtintensität, Wetter und Ablenkung wie sie im Realversuch vorkommen können, wurden auf diese Weise minimiert.

Der Studie wurde ein Mixed Design zugrunde gelegt, bei dem sowohl Faktoren des Within-Subject Designs, als auch des In-Between-Subject-Designs berücksichtigt wurden. Konkret wurden hier die Antworten der Probanden untereinander verglichen (In-Between-Subject-Design), als auch die Konsistenz der Antworten der jeweiligen Probanden innerhalb der Wiederholungen (Within-Subject-Design).

In Anbetracht der aktuellen und zukünftig denkbaren Gesetzeslage wurden in den gewählten Bereichen positiv kontrastierte Symbole mit einem Maximalwert von 200 lx in eine idealisierte Abblendlichtverteilung (100 lx im Abblendlicht im für die Projektion gewählten Bereich von ca. 20 m vor dem Fahrzeug) aus LED-Scheinwerfern eingearbeitet. Der Kontrast betrug damit 1:2 zwischen der Abblendlichtbasis und der Projektion und wurde in einer Experten-Studie mit Lichttechnik-Experten aus Forschung und Entwicklung als „gut erkennbar“ evaluiert.

Die mit MatLab simulierten Lichtverteilungen wurden inklusive simulativer Fahrzeugdaten über das Programm LucidDrive auf eine ebenfalls simulierte Fahrstrecke eingepflegt. Die Fahrstrecke war gänzlich gerade gehalten und die Fahrt einer nächtlichen Fahrt auf einer Landstraße ohne andere Verkehrsteilnehmer nachempfunden

(Abbildung 3.2). Die Streckenwahl wurde getroffen, um die möglichen beeinflussenden Variablen zu minimieren und sicherzustellen, dass die Bewertung durch die Probanden nur aufgrund der gezeigten Projektionen erfolgt.

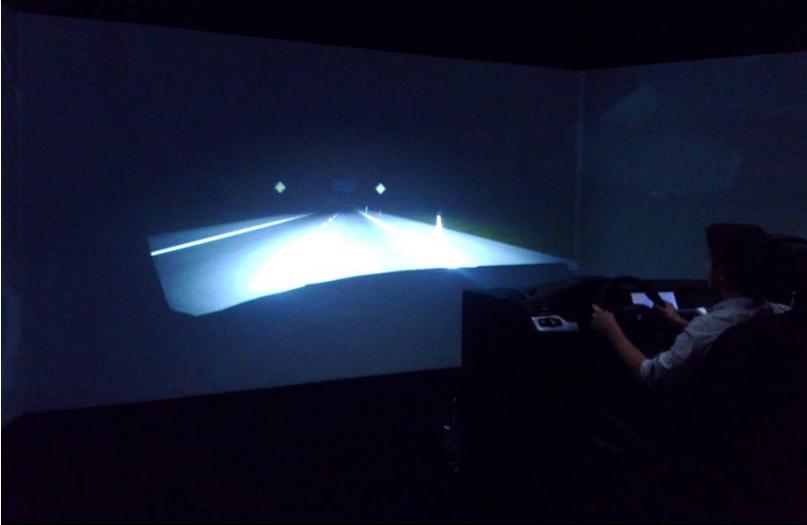


Abbildung 3.2 Fotografie der simulierten Fahrsituation und Position des Probanden während der Studie. Auf 3 Leinwänden werden Catia-Fahrzeugdaten und die simulierten Lichtverteilungen (*hier abgebildet: Abblendlicht*) dargestellt.

Die Abfrage der möglichen Aktionen und Interpretation der Symbole erfolgte über einen interaktiven Fragebogen, der während der simulierten Fahrt neben dem Probanden auf einem zusätzlichen Bildschirm angezeigt wurde. Die Beantwortung durch den Probanden erfolgte über zugeschaltete Bedieneinheiten (Maus, Touchpad und Tastatur). Spontane Äußerungen wurden vom Versuchsleiter notiert.

Weitere Ausführungen der Antworten konnten zudem im Nachgang in einem zusätzlichen Fragebogen geschildert werden (Anhang C.1)

3.1.2 DURCHFÜHRUNG IM FAHRSIMULATOR

Nach der Anmeldung zur Studie erhielten die Probanden einen Vorab-Fragebogen, den sie vor dem ersten von insgesamt zwei Terminen ausfüllten. Hierbei wurden u.a. Alter, Fahrerfahrung und Technikaffinität abgefragt (Anhang C.1).

Vor dem Versuch wurde außerdem die Sehkraft der Probanden getestet, um sicherzustellen, dass keine Einschränkungen bestehen, welche Einfluss auf die Studienergebnisse haben können. Zur Teilnahme war ein Visus von mindestens 1,0 (bei Bedarf auch mit Sehhilfe) vorausgesetzt.

Um Versuchsleitereffekte zu vermeiden, also Effekte, die aufgrund von verschiedenen Versuchsleitern verursacht werden können, wurden die Versuche immer von derselben Person durchgeführt. Weiterhin wurde beim ersten Termin eine schriftliche Probandeninformation ausgehändigt, die zur Eingewöhnung in einem rot beleuchteten Raum gelesen wurde. Das rote Licht diente der Verkürzung der nachfolgenden Adaptationszeit der Probanden auf die dunkle Umgebung im Simulationsraum.

Nach der Adaptationsphase von insgesamt etwa 15 Minuten (abhängig von der Lesezeit der Probanden) im abgedunkelten

Fahrsimulator und richteten sich die die Probanden die Sitzposition im aufgebauten Fahrgastraum entsprechend einer Realfahrt ein.

Die Beleuchtung wurde auf die Straßendarstellung auf den drei angebrachten Projektionswänden reduziert. Über einen zusätzlich angebrachten Bildschirm im Fahrzeuginnenraum vor der Instrumententafel konnten die Probanden bei Erscheinen eines Symbols eine Bewertung abgeben. Die Reihenfolge der angezeigten Symbole erfolgte hierbei randomisiert.

Während der gesamten Versuchsdurchführung hatte der Proband keine Fahraufgabe. Wie schon bei der Wahl der Teststrecke, sollte eine Beeinflussung durch aktives Eingreifen durch den Probanden wie bspw. Lenken oder Bremsen vermieden werden, um eine Verzerrung der Resultate zu vermeiden.

Erkannte ein Proband ein Symbol, erschien auf dem zusätzlichen Bildschirm eine Fragenabfolge (s. Abbildung 3.3). Die passive Fahrt mit dem entsprechenden Symbol wurde so lange fortgesetzt, bis der Proband alle Fragen zu diesem beantwortet hatte.

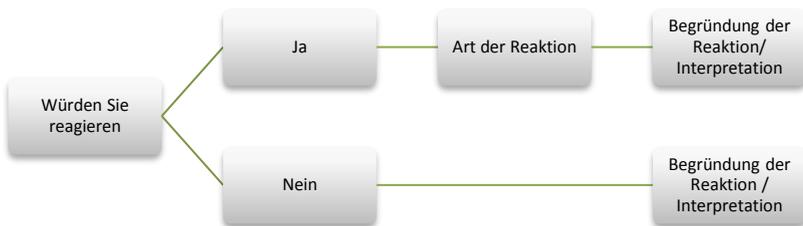


Abbildung 3.3 Befragungsdiagramm mit Antwortstrang während der Simulator-Studie nach Erkennen eines Symbols durch den Probanden.

Die erste Frage an den Probanden war, ob er beim Erscheinen eines solchen Symbols vor sich auf der Straße reagieren würde oder nicht.

Während der fortlaufenden Fahrt, konnte der Proband nur zwischen „ja“ und „nein“ wählen (s. Abbildung 3.3). Abhängig von der Antwort wurde nach der Art der Reaktion und der dafür zugrundeliegenden Interpretation gefragt, bzw. bei der Angabe keiner Reaktion nur nach der Interpretation des Symbols. Im Falle einer Reaktion standen folgende Antwortmöglichkeiten zur Wahl: „Beschleunigen“, „Ausweichen links“, „Ausweichen rechts“ und „Verzögern“ (Abbildung 3.4).

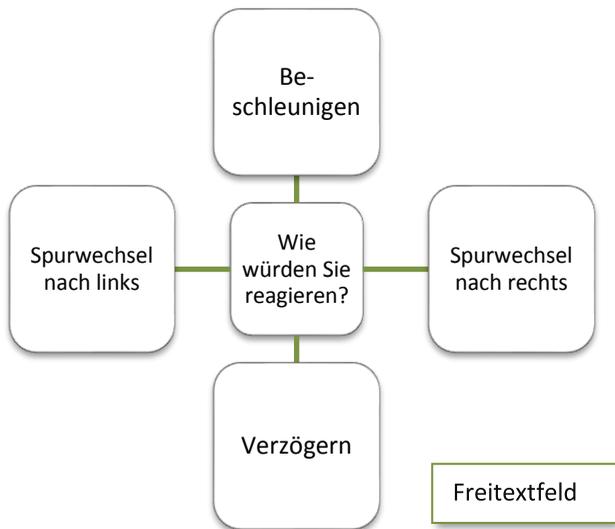


Abbildung 3.4 Zusätzlich zum Freitext vorgegebene Antwortmöglichkeiten bei der Wahl einer Reaktion.

Auf nächster Ebene konnten die Probanden, passend zu diesen Reaktionen, zwischen vorgegebenen Interpretationen wählen (s. Abbildung 3.5).

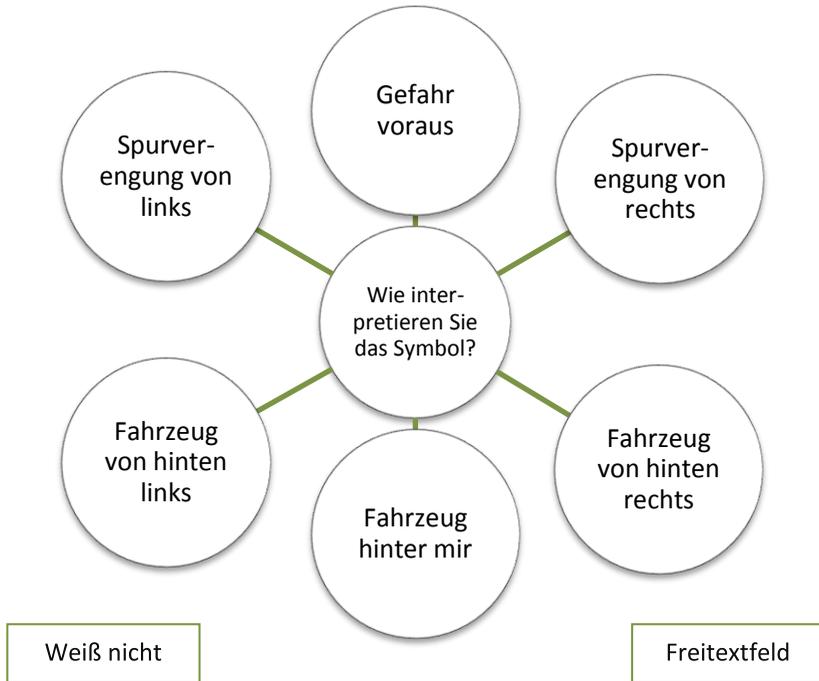


Abbildung 3.5 Bei Wahl einer (jeden) Reaktion vorgegebene Antwortmöglichkeiten bei der Interpretation eines Symbols.

Als Grund zum Beschleunigen kann ein Fahrzeug hinter dem eigenen dienen („Fahrzeug hinter mir“). Ein Ausweichen nach links oder rechts kann sowohl durch ein Fahrzeug von der entsprechend entgegengesetzten Seite hervorgerufen werden, oder durch eine Spurverengung vor dem eigenen Fahrzeug („Fahrzeug von hinten links/

rechts“ bzw. „Spurverengung von vorne links/rechts“). Die Geschwindigkeitsreduktion wurde beispielhaft mit „Gefahr voraus“ begründet.

Bei der Entscheidung für eine Reaktion (Abbildung 3.3., oberer Antwortstrang) wurden damit insgesamt acht Antwortmöglichkeiten vorgegeben. Wurde keine Reaktion gewählt (Abbildung 3.3., unterer Antwortstrang) standen die Antworten „Alles in Ordnung“ und ebenso „Weiß nicht“ zur Verfügung. Neben den vorgegebenen Antwortmöglichkeiten waren jeweils bei der Art der Reaktion und Interpretation auch freie Antworten in Textfeldern möglich.

Als Ankerreize zu den Symboldarstellungen wurden auch je eine Fahrt mit Abblendlicht ohne zusätzliche Projektionen und eine Fahrt ganz ohne Licht (nur geringe Umgebungsbeleuchtung der Szenerie ähnlich einer leicht bewölkten Nacht) zur Bewertung gegeben. Sie dienten der Überprüfung der Validität der Antworten der Probanden.

Wären im Verlauf der Studie die Antworten von einem Probanden willkürlich gegeben worden, so könnte das anhand dieser bekannten Szenerien überprüft werden. Das Abblendlicht diente hier als maximal positive Szenerie, in dem weder Handlungsbedarf noch Einschränkungen wie bspw. Hindernisse angezeigt wurden. Die Szenerie ohne eingeschaltetes Scheinwerferlicht diente als negativste Szenerie dieser Testreihe. Während der Fahrt mit nur geringer Umgebungsbeleuchtung konnte eine Reaktion (wie bspw. Bremsen) erwartet werden.

Nach zweimaligem Durchlauf der Szenerien war der erste Termin im Simulator beendet. Die Probanden erhielten einen Fragebogen zur weiteren Erläuterung der Hintergründe ihrer Antworten während der Fahrt. Hier bot sich ihnen die Möglichkeit, weiter auf ihre Interpretation einzugehen oder die vorher gegebenen Antworten näher zu erläutern.

Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu prüfen, wurden mit jedem Probanden im Abstand von mindestens einer Woche ein weiterer Termin vereinbart. Dieser Zeitraum lässt sich als Kompromiss ansehen: Der Proband vergisst seine intuitiv gegebenen Antworten des ersten Termins und wiederholt sie im zweiten Termin nicht einfach (inkonsistente Antworten werden als eigene Schwäche verstanden und es wird versucht deshalb möglichst konsistent in den eigenen Antworten zu bleiben[73]). Gleichzeitig bleibt die Versuchsdurchführung in Erinnerung und es sind kein erneuter Sehtest und keine wiederholte Einführung notwendig.

Im zweiten Termin wurde daraufhin lediglich der fahrsimulatorische Teil der Studie wiederholt.

3.1.3 ERGEBNISSE UND AUSWERTUNG DER SIMULATIVEN STUDIE

Insgesamt wurden pro Proband und Symbol vier Antwortstränge nach dem in Abbildung 3.3 dargestellten Schema aufgenommen. Der jeweils erste Wert (erster Durchlauf) wurde dabei als Eingewöhnung verwendet und fließt nicht in die Auswertung mit ein.

Bei der Bewertung wurden 35 Probanden mit je drei Antworten berücksichtigt. Von diesen 35 Probanden sind 20 männlich und 15 weiblich. Geschlechterspezifische Unterschiede der Resultate wurden bei der Auswertung nicht festgestellt.

Resultate von Symbolen, die widersprüchliche Reaktionen und Interpretationen hervorriefen und damit für eine weitere Verwendung im Rahmen dieser Arbeiten ausschieden, werden folgend nur zusammenfassend behandelt (detaillierte Ergebnisse s. Abschnitt D.1). Zu den Symbolen mit widersprüchlichen Reaktionen und Interpretationen zählen der Kreis- und beide Dreieck-Symbole.

Die Auswertung des rechteckigen Symbols erfolgt ebenfalls zusammenfassend über alle Ausrichtungen des Symbols (detaillierte Ergebnisse s. Abschnitt D.1).

Zum Abschluss wird die Auswertung der Projektionen paralleler Linien im Detail vorgestellt und im Vergleich zu den obigen Symbolen diskutiert.

A. RUNDES SYMBOL

Wie in Abschnitt 3.1.1 erwähnt, hat der Kreis als einziges der gewählten Symbole keine erkennbare Orientierung (Abbildung 3.6). Es ist deshalb nachvollziehbar, dass die Antworten der Probanden hier stark voneinander abwichen und in sich nicht konsistent waren.

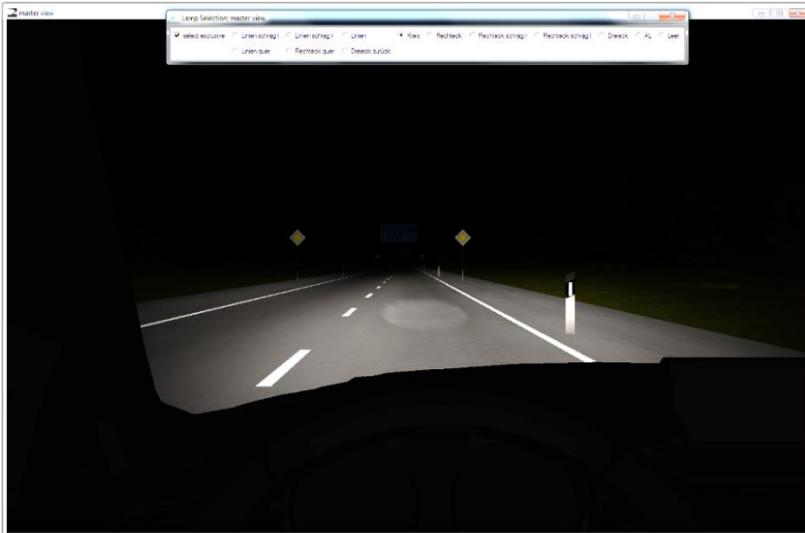


Abbildung 3.6 Darstellung der Kreis-Projektion auf der Fahrbahn während der Simulator-Studie.

Die genannten Antworten bei der Frage nach einer Reaktion waren vor allem „keine Reaktion“ (62%) und „Bremsen“ (36%). Als bedenklich ist dabei zu betrachten, dass die Probanden ihre Meinung innerhalb der Durchgänge wiederholt änderten.

Auch die Antworten bezüglich der Interpretation waren uneindeutig. Der Großteil der Antworten (37%) ergab, dass die Probanden das Symbol nicht verstanden haben und eine eindeutige, intuitive Kommunikation mit diesem Symbol somit nicht möglich ist. Auch „alles in Ordnung“ (28%) und die Warnung vor einer „vorausliegenden Gefahr“ (24 %) waren häufige Interpretationen. Weitere Deutungen des Symbols waren die einer Vorwarnung eines herannahenden Stoppschildes oder eines Kreisverkehrs, die Anzeige vor einer ausstehenden Geschwindigkeitsbegrenzung oder ein sich von hinten näherndes Fahrzeug. Für das zu entwickelnde Assistenzsystem ist der Kreis selbst in dieser, hinsichtlich Alter und Kultur stark begrenzten Probandengruppe, zu uneindeutig und würde vorwiegend Unsicherheit und Unruhe im Straßenverkehr hervorrufen, anstatt den Fahrer in zu unterstützen. Der Kreis als Kommunikationssymbol wurde deshalb für das lichtbasierte Assistenzsystem nicht weiterverfolgt.

B. DREIECKIGE SYMBOLE

Wie in Abschnitt 3.1.1. erläutert, wurde das Dreieck in zwei Ausrichtungen getestet: Ein sich in Fahrtrichtung aufweitendes Dreieck (Abbildung 3.7 A) und ein sich in Fahrtrichtung (vom Fahrzeug weg) verjüngendes Dreieck (Abbildung 3.7 B).

Trotz gegensätzlicher Ausrichtungen ähneln sich die Reaktionen auf beide Dreiecke sehr: Die Antworten teilten sich hier auf zwischen „keiner Reaktion“ (33% bzw. 29%), „Verzögern“ (21% bzw. 39%) und

„Beschleunigen“ (40% bzw. 27%). Wie auch beim Kreis änderten die Probanden ihre Meinung zwischen den Durchgängen und reagierten widersprüchlich.

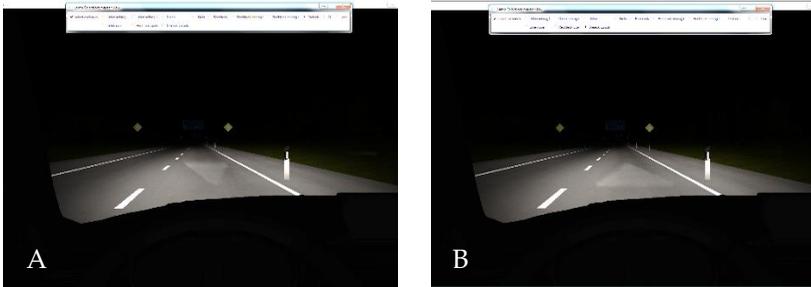


Abbildung 3.7 Darstellung der Dreieck-Projektionen in der Simulator-Studie: Das sich in Fahrtrichtung aufweitende Dreieck (A) und das in Fahrtrichtung verjüngende Dreieck (B).

Auch die Interpretationen sind bei beiden Varianten vielfältig und gegensätzlich. Von den zehn Antwortmöglichkeiten (insgesamt neun vorgegebene mit und ohne Reaktion und ein Freitextfeld) wurde jede Antwort mindestens ein Mal ausgewählt.

Zum Teil wurde das aufweitenden Dreieck (Abbildung 3.7 A) mit dem im Straßenverkehr bekannten Schild „Vorfahrt gewähren“ assoziiert (Abbildung 3.8). Gleichmaßen wurde dieses Dreieck aufgrund seiner in Fahrtrichtung aufweitenden Form auch als Anzeige

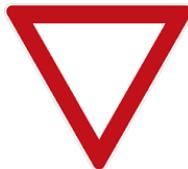


Abbildung 3.8 Verkehrszeichen „Vorfahrt gewähren“.

einer freien Spur interpretiert. Durch Entfernen der Farbe geht die warnende Information dieses Dreiecks als Verkehrszeichen zum Teil wieder verloren.

Bei beiden Dreiecken wurde von den Probanden weiterhin auch auf eine mögliche Fehleinstellung der Scheinwerfer hingewiesen.

In Abhängigkeit von Situation und Person wird das sich in Fahrtrichtung verjüngenden Dreieck (Abbildung 3.7 B) entweder mit einer Gefahrenwarnung ähnlich eines Warn-Dreiecks auf der Straße (Abbildung 3.9)[74] oder aber mit Beschleunigungsdreiecken ähnlich wie beim Videospiel „Mario Kart“ (Abbildung 3.10)[75] assoziiert.

Nichtsdestotrotz sehen viele der Probanden die Dreiecke als „sehr intuitiv“ an (verbale Äußerungen während des Versuchs und Zusatznotizen im Abschlussfragebogen).



Abbildung 3.9 Das Warndreieck als häufig anzutreffendes Symbol im Straßenverkehr: ein rotes, nach oben hin verjüngendes Dreieck zeigt Gefahren im weiteren Fahrbahnverlauf an. *Bild:* ADAC



Abbildung 3.10 Sich in Fahrtrichtung verjüngende Dreiecke als beschleunigende Elemente im Spiel „Mario Kart“. Die Assoziation zum Spiel wurde von vielen Probanden genannt, die sich bei diesem Symbol zum Beschleunigen entschieden. *Bild:* gifer.com

C. RECHTECKIGE SYMBOLE

RECHTECKE

Im Folgenden wird ein Überblick über die vier getesteten Varianten der Kommunikation mittels rechteckiger Symbole gegeben (Abbildung 3.11 A-D). Detaillierte Ausführungen können im Anhang (Abschnitt D.1) eingesehen werden.

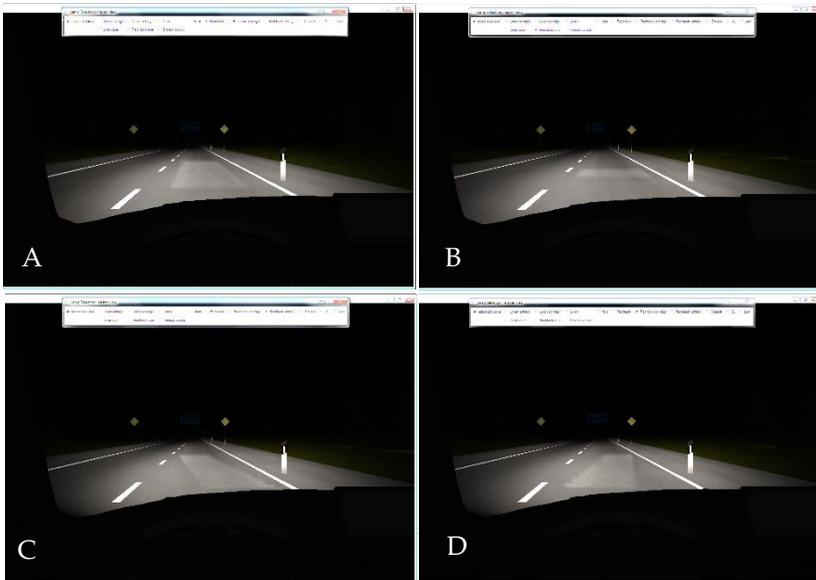


Abbildung 3.11 Darstellung der vier Projektionen eines Rechtecks in der Simulator-Studie: parallel zur Fahrtrichtung ausgerichtet (A), quer zur Fahrtrichtung (B), links- (C) und rechtsgeneigt (D).

Es lässt sich festhalten, dass sich die Reaktion der Probanden nach der Ausrichtung der Projektion richtete. Vor allem bei den links- und rechtsgeneigten Rechtecken (Abbildung 3.11 C bzw. D) reagierten die Probanden mit einem Spurwechsel in die entsprechende Richtung (links: 72% bzw. rechts 66%). Die geringere Bereitschaft der Probanden einen Spurwechsel nach rechts durchzuführen lässt sich mit der Versuchsanordnung erklären: Um keine weiteren Variablen im Versuchsverlauf zu erzeugen, wurde die Fahrt konstant auf der rechten von zwei Spuren gehalten.

Obwohl zu Beginn des Versuchs darauf hingewiesen wurde, dass die durchgezogene Linie am rechten Fahrbahnrand nicht weiter beachtet werden soll, zeigte sich in den Nachbesprechungen und in den Abschlussfragebögen eine Verunsicherung einiger Probanden, sich in dieser Szenerie nach rechts zu orientieren.

Die angegebenen Interpretationen der Rechtecke zeigten, dass die Mehrheit der Probanden eine Gefahr von der jeweils zur Symbol-Orientierung entgegengesetzten Seite erkannte. Dabei hatten Spurverengungen vor dem Fahrzeug eine häufigere Nennung (je 50% „Spurverengung von rechts“ bzw. von links) als sich von hinten annähernde Fahrzeuge („Fahrzeug von hinten rechts“ 18% bzw. von hinten links 15%).

Insgesamt beschränkten sich die Antworten bezüglich möglicher Reaktionen auf die genannten Spurwechsel und Verzögerungen (12% bzw. 13%). Andere Reaktionen wie „Beschleunigen“ (je 4%) waren weniger häufig genannte Antworten. „Keine Reaktion“ wurde in 7%

(linksgeneigtes Rechteck) bzw. 12% (rechtsgeneigtes Rechteck) der Fälle als Antwort gegeben.

Die in Fahrtrichtung weisenden bzw. quer zur Fahrtrichtung projizierten Rechtecke erzielten weniger konkrete Resultate. Das in zur Fahrtrichtung parallele Rechteck (Abbildung 3.10 A) führte in 50% der Fälle zu keiner Reaktion. 35% der Probanden entschieden sich für eine Verzögerung, 12% für eine Beschleunigung. Beim zur Fahrtrichtung quer projizierten Rechteck (Abbildung 3.10 B) ist die Häufigkeit dieser Antworten umgedreht: 55% entschieden sich zur Geschwindigkeitsreduktion, 37% zu keiner Reaktion und 5% zu Beschleunigen. Andere Reaktionen waren bei beiden Ausrichtungen der Rechtecke kaum vorhanden (je 3%).

Das Rechteck parallel zur Fahrtrichtung wurde vorwiegend als bestätigend interpretiert (34% „alles in Ordnung“). Zu 25% auch als Anzeige einer vorausliegenden Gefahr bzw. als Abstandsinformation (2%). Auch das Rechteck quer zur Fahrbahn wurde von 15% der Probanden bestätigend, von einer Mehrheit aber als Gefahrenhinweis (47%) interpretiert.

Beide Projektionen wurden von einem Teil der Probanden nicht verstanden (jeweils 23%) oder als Anzeige eines Fahrzeugs hinter dem eigenen interpretiert (14% beim Rechteck parallel zur Fahrtrichtung bzw. 5% beim Rechteck quer zur Fahrbahn).

Diese Ergebnisse zeigen zwar, dass Kommunikation mit dem Fahrer über einfache Licht-Symbole auf der Straße möglich, im Fall der

Projektionen von Rechtecken jedoch nicht immer eindeutig ist. Gegensätzliche Reaktionen auf die Symbole wie Beschleunigen und Verzögern können zu Gefahrensituationen im Straßenverkehr führen und sollten weitestgehend vermieden werden. Eine Reduktion widersprüchlicher Reaktionen könnte durch Anpassung der Symbole in ihrer Ausprägung (bspw. Einführung von Dynamik in die Darstellung) erzielt werden.

PARALLELE LINIEN

LINIEN PARALLEL ZUR FAHRBAHN

Wie auch das Rechteck zuvor, wurden die Linien in vier verschiedenen, richtungweisenden Darstellungen abgebildet. Zunächst sollen

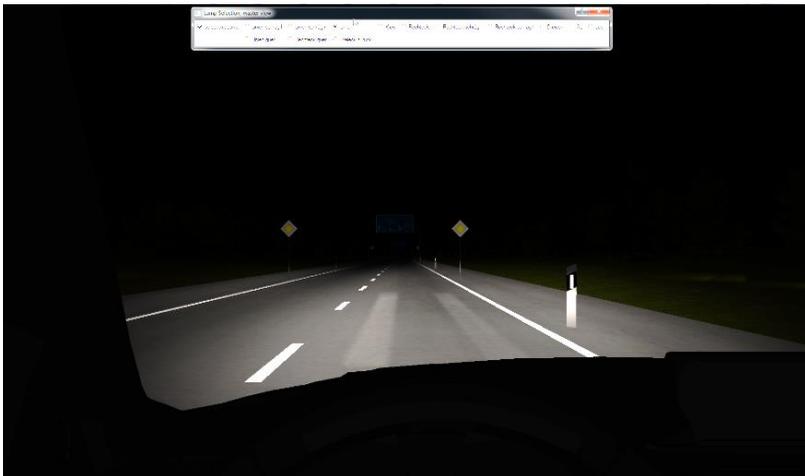


Abbildung 3.12 Darstellung der Linien parallel zur Fahrbahn in der Simulator-Studie.

auf die Linien parallel zur Fahrbahn im Detail eingegangen werden (Abbildung 3.12).

REAKTIONEN AUF PARALLEL ZUR FAHRBAHN AUSGERICHTETE LINIEN

Von den 105 erhaltenen Antworten wäre in 68 % der Fälle keine Reaktion hervorgerufen worden. 27% der Probanden gaben an, in einer Realsituation beim Erscheinen einer solchen Linien-Projektion auf der Straße ihre Geschwindigkeit (leicht) zu erhöhen (Abbildung 3.13). In nur 5% der Fälle wurden andere Reaktionen angegeben: eine gegensätzliche Reaktion (Verzögern) erfolgte nur in 3% der Fälle, 2% fielen auf andere Reaktionen.

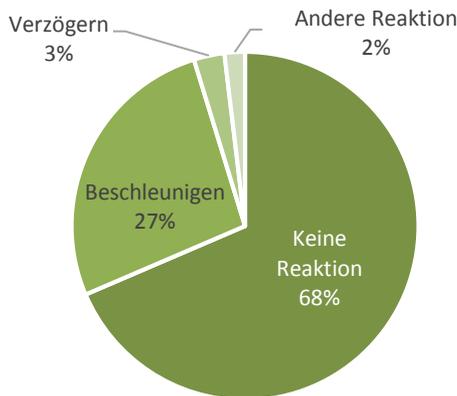


Abbildung 3.13 Interpretationen der Projektion parallel zur Fahrbahn ausgerichteter Linien ohne und mit vorher angegebener Reaktion.

INTERPRETATIONEN DER PARALLEL ZUR FAHRBAHN AUSGERICHTETEN LINIEN

Bei der Interpretation der Linien verstanden insgesamt 62% der Probanden die parallel zur Fahrbahn projizierten Linien als bestätigende Anzeige („Alles in Ordnung“). Nur ein geringer Anteil (insgesamt 8%) der Antworten fand keine passende Interpretation der Linien.

Bei den Probanden, die sich gegen eine Reaktion entschieden, bezogen sich alle weiteren Interpretationen (10%) auf Navigationshinweise oder die Warnung vor Spurrillen. Einige der Probanden sahen die parallel zur Fahrbahn ausgerichteten Linien als Aufforderung die Spur aufgrund eines Überholvorgangs eines anderen Fahrzeugs zu halten (Abbildung 3.14).

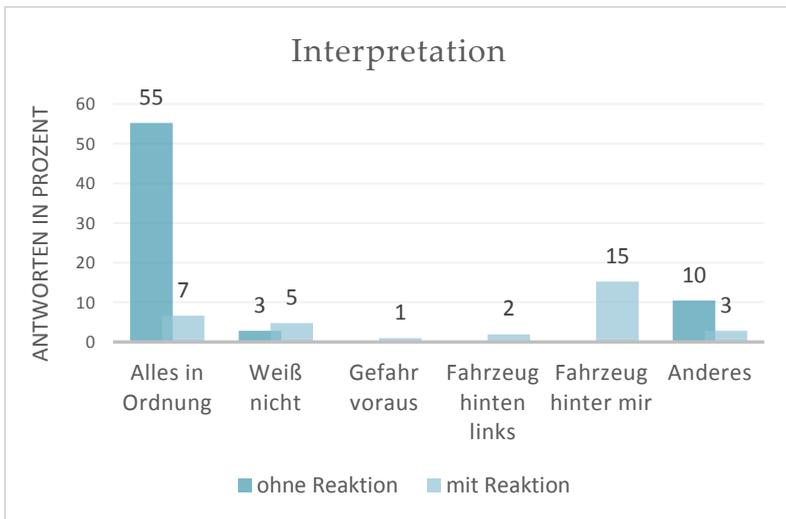


Abbildung 3.14 Verteilung der 105 gegebenen Antworten bei den parallelen zur Fahrbahn projizierten Linien.

Probanden, die sich für eine Reaktion entschieden, sahen in den Linien zu 17% die Warnung vor einem Fahrzeug hinter sich (2% „Fahrzeug von hinten links“, 15% „Fahrzeug direkt hinter mir“). Von 10% wurden die Linien auf eine andere Art interpretiert. Ein Herannahen an eine Gefahr wurde nur ein Mal (1%) als Interpretation genannt.

DISKUSSION DER PARALLEL ZUR FAHRBAHN AUSGERICHTETEN LINIEN

97% der Probanden entschieden sich bei den parallel zur Fahrbahn ausgerichteten Linien gegen eine Reaktion, die einen direkten Einfluss auf andere Verkehrsteilnehmer hätte. Die Probanden entschieden sich entweder gegen eine Reaktion oder zur Erhöhung Reise-Geschwindigkeit. Von den 105 Antworten wurden nur 4 abweichende Antworten gegeben (Geschwindigkeitsreduktion: 3 Mal, Spurwechsel 1 Mal).

Interpretationen wiesen auf eine Spurdarstellung oder durchgezogenen Linien hin, die ein Ausscheren verhindern sollen. Die Probanden gaben an, sich von den Linien geradeaus geleitet oder seitlich beschränkt zu fühlen. Durch die kaum ausgeprägte Gegensätzlichkeit der Antworten kann das Gefahrenpotential im Straßenverkehr als gering eingestuft werden. Auch im Vergleich zum parallel zur Fahrbahn ausgerichteten Rechteck sind die Antworten weniger divers und zeigen eine größere Bestätigung der eigenen Fahrweise und Fahrspur.

LINIEN QUER ZUR FAHRBAHN

Weiterführend werden die Antworten der quer zur Fahrbahn ausgerichteten Linien vorgestellt (Abbildung 3.15).

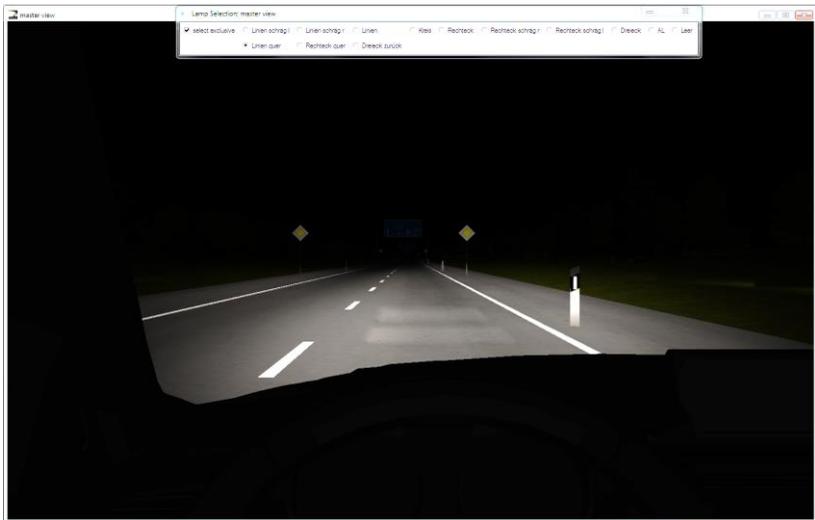


Abbildung 3.15 Darstellung der Linien quer zur Fahrbahn in der Simulator-Studie.

REAKTIONEN AUF QUER ZUR FAHRBAHN AUSGERICHTETE LINIEN

Von den 105 gegebenen Antworten fiel die Wahl in 27% der Fälle darauf, nicht zu reagieren. 73% entschieden sich beim Erscheinen der quer zur Fahrbahn ausgerichteten Linien-Projektion zu reagieren (Abbildung 3.16). 70% der Antworten waren eine Reaktion durch Reduktion der Geschwindigkeit.

Einige Probanden gaben an, bei diesem Symbol stärker zu bremsen als bei dem analogen (quer zur Fahrbahn projizierten) Rechteck. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit (2%) oder ein Spurwechsel nach links (1%) wurden kaum als Reaktionen genannt.

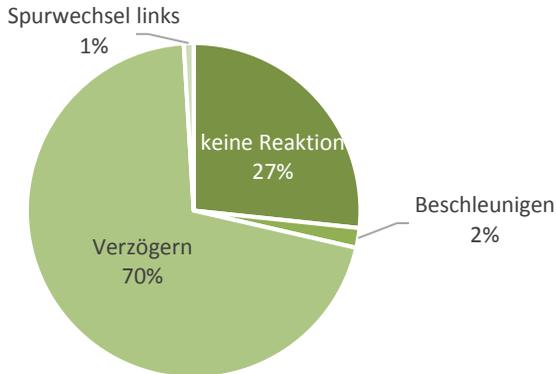


Abbildung 3.16 Verteilung der 105 gegebenen Antworten zur Reaktion bei zur Fahrbahn quer ausgerichteten Linien.

INTERPRETATIONEN DER QUER ZUR FAHRBAHN AUSGERICHTETEN LINIEN

Die zwei quer zur Fahrbahn projizierten Linien waren für 14% der Probanden ein Anzeichen dafür, dass alles in Ordnung ist. Sie entschieden sich infolge dessen gegen eine Reaktion (Abbildung 3.17). 5% der Probanden konnten das Symbol nicht deuten und entschieden sich gegen eine Reaktion. Von 2% wurden die Projektion zwar als frühe Warnung vor einer Annäherung an eine Gefahr interpretiert („Anderes“), sie entschieden sich aber gegen eine Reaktion.

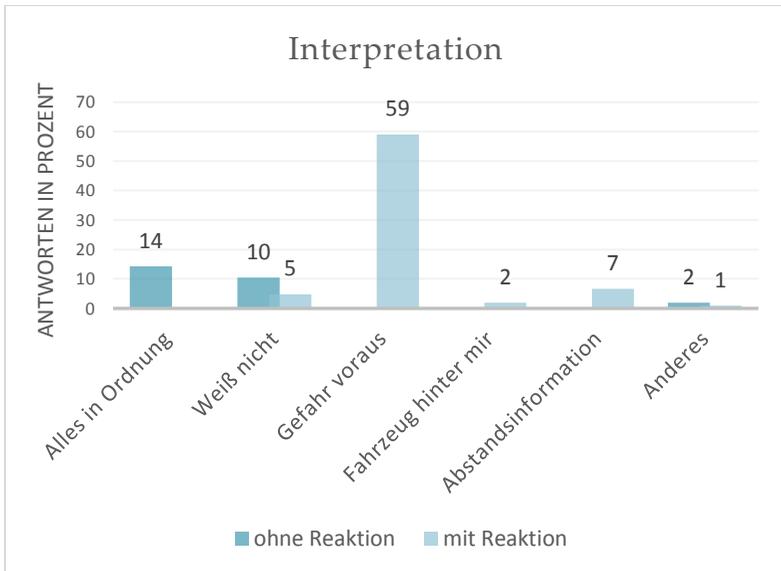


Abbildung 3.17 Interpretationen der Projektion quer zur Fahrbahn dargestellten Linien ohne und mit vorher angegebener Reaktion.

Probanden, die sich für eine Reaktion entschieden, interpretierten die Linien vorwiegend als eine Warnung vor einer Annäherung an eine Gefahr (59%) und entschieden sich mehrheitlich zur Verzögerung. In 7% der Fälle wurde die quer zur Fahrbahn orientierten Linien als Abstandsinformation bspw. zu einem vorausfahrenden Fahrzeug wahrgenommen. Nur 2% interpretierten die Linien als ein Hinweis darauf, dass sich ein Fahrzeug von hinten nähert (ebendiese wählten bei der Reaktion auch das Beschleunigen). Auch Probanden, die sich für eine Reaktion entschieden, konnten dieses Symbol nicht immer deuten („Keine Interpretation“: 5%).

DISKUSSION DER QUER ZUR FAHRBAHN AUSGERICHTETEN LINIEN

Von den insgesamt 105 Antworten wurde in 97% der Fälle angegeben, dass die Geschwindigkeit entweder reduziert oder vorerst nicht reagiert werden würde. Die Äußerungen der Probanden während und nach der Studie lassen jedoch darauf schließen, dass auch die Probanden, die sich gegen eine Reaktion entschieden, nach Erscheinen der Projektion ihre Aufmerksamkeit erhöhten um ggf. reaktionsbereit zu sein.

Nur zwei Mal (jeweils durch eine Person) wurde angegeben, dass die Linien als von hinten herannahendes Fahrzeug interpretiert wurden und damit zum Beschleunigen animierten. Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse zeigt sich, dass sich die genannte Person im weiteren Verlauf ebenfalls für eine Geschwindigkeitsreduktion entschied. Auch ohne positive Bestätigung durch Hindernisse auf der Strecke konnte damit in der Simulation ein Lerneffekt festgestellt werden. Weitere drei Probanden reagierten im zweiten Termin mit Verzögern, nachdem sie im ersten Termin „keine Reaktion“ gewählt hatten.

Basierend auf den gegebenen Antworten bei dieser Symbolausprägung lässt sich kein Gefahrenpotential aufgrund von gegensätzlichen Reaktionen und Interpretationen feststellen.

LINKSGENEIGTE LINIEN / RECHTSGENEIGTE LINIEN

Aufgrund der vergleichbaren Resultaten werden folgend die links- und rechtsgeneigten Linien (Abbildung 3.18) gemeinsam betrachtet. Unterschiede in Reaktionen oder Interpretationen werden, wenn vorhanden, im Text explizit erläutert.

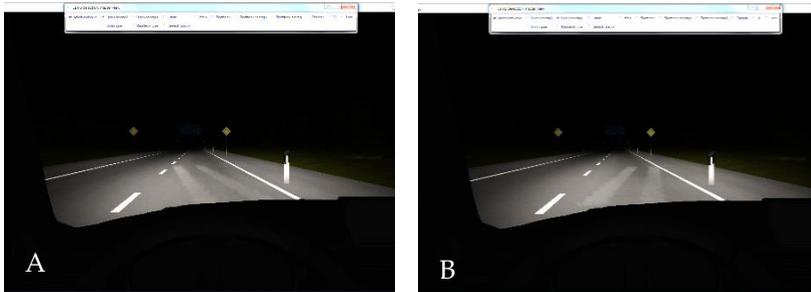


Abbildung 3.18 Darstellung der linksgeneigten (A) und der rechtsgeneigten (B) Linien-Projektionen in der Simulator-Studie.

REAKTIONEN AUF LINKS- UND RECHTSGENEIGTE LINIEN

Die erhaltenen Ergebnisse zeigen eine deutliche Tendenz der Probanden zur Reaktion in entsprechend der Neigungsrichtung der Linien: auf die linksgeneigten Linien wurde mehrheitlich mit einem Spurwechsel nach links (86%), auf die rechtsgeneigten mit einem Spurwechsel nach rechts (79%) reagiert.

Die im Vergleich geringeren Werte beim Spurwechsel nach rechts lassen sich, wie bereits beim rechtsgeneigten Rechteck (Abschnitt 3.1.3 C), mit dem Versuchsaufbau erklären. Zwar wurde den Probanden einführend mitgeteilt, dass sie die durchgezogene Linie am rechten

Fahrbahnrand bei der Wahl einer potentiellen Reaktion nicht berücksichtigen sollen, eine leichte Hemmung zur Reaktion „Spurwechsel rechts“ lässt sich bei den Resultaten dennoch erkennen. (Abbildung 3.19). In den abschließenden Befragungen gaben einige der Probanden auch an, sich aufgrund der durchgezogenen Linie gegen einen Spurwechsel nach rechts entschieden zu haben.

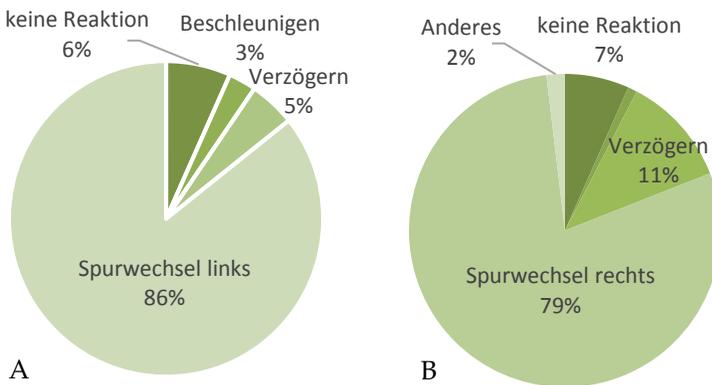


Abbildung 3.19 Verteilung der 105 gegebenen Antworten zur Reaktion auf die nach links- (A) und rechtsgeneigten Linien (B).

Reaktionen, die sich nicht nach der Neigung der Linien richteten wurden selten genannt: Verzögerung in 5% der Fälle bei der links-geneigten Projektion (bzw. 11% bei der Rechtsgeneigten). In 6% der Fälle wurde sich bei linksgeneigten Linien gegen eine Reaktion entschieden (bzw. in 7% bei rechtsgeneigten). Gegensätzliche Reaktionen reduzierten sich bei diesen Symbolen auf einstellige Prozentbeträge (5% Verzögerung bzw. 3% Beschleunigung bei den linksgeneigten Linien).

INTERPRETATIONEN DER LINKS- UND RECHTSGENEIGTEN LINIEN

Die Interpretationen der links- und rechtsgeneigten Linien sind jeweils in Abbildung 3.20 aufgetragen. Vor allem Verengungen der Fahrbahn oder Gefahren auf der Strecke von der jeweils entgegengesetzten Seite wurden genannt als interpretierte Gründe für die jeweiligen Reaktionen genannt („Gefahr von vorne rechts“: 52% bzw. „Gefahr von vorne links: 48%). Auch nicht ortsgebundene Gefahren vor dem Fahrzeug, die zum Ausweichen oder Bremsen führen, wurden in je 15% der Fälle genannt.

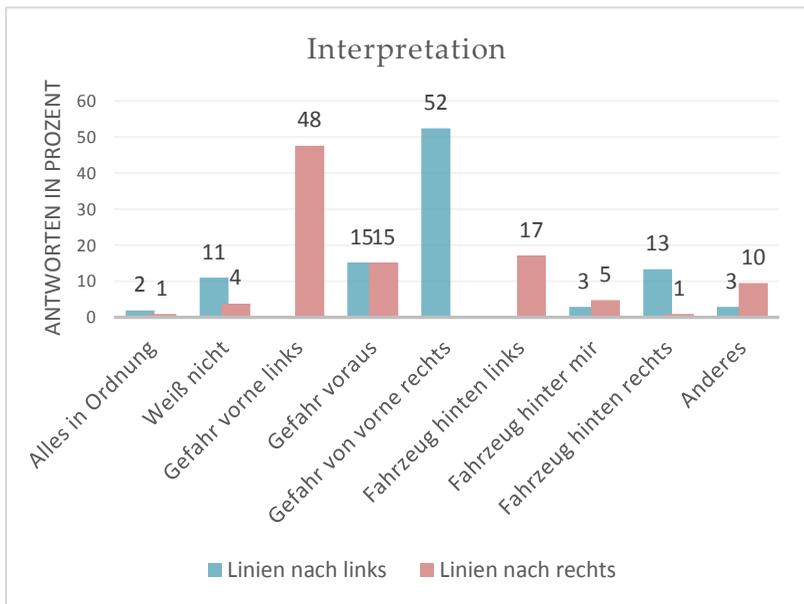


Abbildung 3.20 Angaben zur Interpretation der links- (jeweils links) und rechtsgeneigten (jeweils rechts) Linien in der Simulator-Studie.

Wie auch bei den Rechtecken waren bei den geneigten Linien Gefahren hinter dem Fahrzeug (aus der entsprechend entgegengesetzten Richtung) Interpretationen, die eine Reaktion hervorriefen. Nur wenige Probanden gaben an, die Symbole nicht zu verstehen (insgesamt 11% bei den linksgeneigten bzw. 4% bei den rechtsgeneigten Linien).

DISKUSSION DER LINKS- UND RECHTSGENEIGTEN LINIEN

Die Orientierung der Linien beeinflusst sowohl die Reaktion als auch Interpretation der Symbole und findet sich in den Antworten der Probanden wieder. Nur einzelne Angaben zeigten eine Tendenz zum Beschleunigen oder Verzögern an Stelle einer Orientierung nach links bzw. rechts.

Die Interpretationen der nicht-reagierenden Probanden decken sich zum großen Teil mit den Interpretationen der reagierenden Probanden (Navigationshinweis oder überholendes Fahrzeug). Ob hier direkt eine Reaktion durchgeführt wird oder nicht hängt von der subjektiven Einstellung des jeweiligen Probanden ab. Aus den Antworten lässt sich jedoch erkennen, dass die Majorität der Probanden über die Botschaft, die sich hinter den geneigten, parallelen Linien befindet, übereinstimmt. Ob eine Person beschleunigt, bremst oder ausweicht, wenn sich ihr ein Fahrzeug von hinten nähert, ist sowohl abhängig von der Situation als auch der jeweiligen Einstellung.

Ein Gefahrenpotential liegt in der Projektion des Symbols zu einem Zeitpunkt, an dem das Wechseln der Fahrspur nicht gefahrlos gewährleistet werden kann. Wird die Projektion dann vom Fahrer nicht als Information, sondern als Aufforderung wahrgenommen, kann das zu Zusammenstößen im Straßenverkehr führen. Die Lösung hierfür ist die Verbindung des lichtbasierten Assistenzsystems mit bereits vorhandenen Sensoren (bspw. diejenigen des sog. „Tote-Winkel-Warners“). Die links- und rechtsgeneigten Projektionen werden dann nur bei freier Fahrbahn angezeigt.

D. RESULTATE ABBLENDLICHT UND AUSFALL ABBLENDLICHT

Im Sinne der Vollständigkeit sollen hier auch die Ergebnisse der Tests mit reinem Abblendlicht und ohne Fahrzeug-Licht besprochen werden. Detaillierte Resultate können dem Anhang (Abschnitt D.1) entnommen werden.

ABBLENDLICHT

Bei den Durchläufen mit reinem Abblendlicht, wurde in 102 von 105 Fällen angegeben, dass keine konkrete Reaktion getätigt werden würde. In 101 von diesen 102 Fällen mit der Begründung, dass alles in Ordnung sei. Nur eine Antwort bezog sich auf die Erhöhung der Aufmerksamkeit, jedoch ohne aktive Reaktion. Weitere Reaktionen

waren ebenfalls eine Erhöhung der Aufmerksamkeit (1 Mal) oder die Prüfung des Fernlichts (2 Mal).

KEIN FAHRZEUG-LICHT

Der Ausfall des Abblendlichts wurde pro Proband und Runde nur je ein Mal abgefragt, um als Vergleichswert zu dienen. Hier wurden pro Proband somit 2 Antworten aufgenommen, womit insgesamt 70 Antworten ausgewertet wurden. Von diesen 70 Antworten wurde in 65 Fällen ein Reaktionsbedarf erkannt. Diese Probanden reagierten mit „Bremsen“ (55 Mal) bzw. „Rechts ranfahren“ (1 Mal), aber auch mit „Licht einschalten“ (10 Mal). Die Interpretation war in 47 Fällen ein Systemfehler bzw. Lichtausfall.

Nur 5 Antworten zeigten eine Entscheidung gegen eine Reaktion. Begründet wurde die Wahl mit „Alles in Ordnung“ (4 Mal) oder „Weiß nicht“ (1 Mal).

Die zusammengefassten Ergebnisse aller Symbole sind in Anhang D.1.1. in tabellarischer Form einsehbar.

3.1.4 DISKUSSION DER KOMMUNIKATIONSMÖGLICHKEIT MITTELS LICHTPROJEKTIONEN

Unter Berücksichtigung aller Ergebnisse lässt sich festhalten, dass richtungsweisende Symbole auch richtungsweisende Interpretationen veranlassen und damit Reaktionen in die entsprechende Richtung hervorrufen. Hat ein Symbol keine eindeutige Ausrichtung wie bspw. der Kreis, führt das bei den Probanden zu widersprüchlichen Interpretationen und Reaktionen.

Ähnlich verhält es sich mit den Dreiecken. Diese sind im Straßenverkehr zwar bereits bekannt, führten bei den Probanden jedoch ebenso wie der Kreis zu Unstimmigkeiten hinsichtlich Interpretation und Reaktion. In beiden hier getesteten Ausprägungen fungieren die Dreiecke im europäischen Raum als Gefahrenwarnung: sowohl als Vorfahrt-Gewähren-Symbol (Abbildung 3.8) als auch, gespiegelt, in Form eines Warndreiecks (Abbildung 3.9).

Werden die Dreiecke als Pfeilspitzen erkannt, kann sich die Interpretation direkt umkehren. Das „Warndreieck“ wird somit zum Beschleunigungspfeil, wie es vielen Probanden aus Spielen wie „Mario Kart“ bekannt ist (Abbildung 3.10). Das „Vorfahrt-Gewähren“-Symbol, also eine in Fahrtrichtung aufweitende Lichtverteilung, wird als Anzeige einer freien Spur interpretiert und suggerierte den Probanden „Freie Fahrt“. Auch diese Probanden reagieren mit Beschleunigen.

Den im Straßenverkehr verwendeten, warnenden Symbolen ist gemein, dass sie nur mit dem entsprechenden Farbcode bekannt sind: Rote Farbe warnt den Verkehr.



Abbildung 3.21 Ersatz-Warndreieck: Ein 2016 liegengebliebener Fahrer nutzte zur Warnung rote Paprika, als kein Warndreieck zur Hand war. Die Polizei verzichtete auf ein Bußgeld. Bild: *twitter/Polizei Magdeburg*.

Im Jahr 2016 konnte ein Autofahrer deshalb bei einer Panne eine Schüssel roter Paprika als Ersatz für ein Warndreieck verwenden (Abbildung 3.21) [76]. Zwar war das nicht regelkonform, doch die Polizei entschied sich gegen eine Strafe, da die warnende Wirkung durch die rote Signalfarbe des Gemüses gegeben war.

Wird jedoch, wie in der vorliegenden Studie, die Information des jeweiligen dreieckigen Symbols auf dessen Form reduziert, zeigt sich, dass die intuitive, oder zum Teil erlernte, Information verloren geht. Da die Projektion roter Farbinformationen nicht zulässig ist (Abschnitt 2.3), kann die, zum Teil benötigte, warnende Wirkung durch die dreieckigen Symbole nicht erzielt werden.

Durch die fehlende, intuitive Information der Dreiecke, ebenso wie des Kreises, ist eine Gefährdung im Straßenverkehr durch ihre Einblendung zu erwarten. Kreise und Dreiecke wurden deshalb in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet.

Im Vergleich zu den obigen Symbolen waren die Ergebnisse der Rechtecke und Linien in allen getesteten vier Varianten eindeutiger: Bei den geneigten Symbolen orientierten sich die Probanden sowohl bei den Rechtecken als auch bei den parallelen Linien in die Richtungen, in die die entsprechenden Symbole zeigten. Dabei war der Effekt bei den Linien jeweils etwas größer als beim Rechteck.

Bei genauerer Betrachtung der Daten lässt sich erkennen, dass die intuitive Erfassbarkeit der Probanden, die sich in der Konsistenz der Antworten einzelner Probanden widerspiegelt, bei den Linien ebenfalls höher war. Abhängig von der Darstellung änderten nur maximal vier der insgesamt 35 Probanden ihre Meinung bezüglich ihrer Reaktion zwischen den einzelnen Durchgängen. Lediglich bei den quer zur Fahrbahn ausgerichteten Linien konnten sich acht der 35 Probanden nicht entscheiden, ob sie mit Bremsen reagieren, oder lediglich achtsamer sind. Bei den rechteckigen Symbolen waren bis zu 13 Probanden unschlüssig und machten unterschiedliche Angaben. Eine Ausnahme hier war das nach linksgeneigte Rechteck, welches bei nur drei der 35 Probanden zu unterschiedlichen Angaben führte.

Die Entschlossenheit der einzelnen Teilnehmer, wie auch die Gesamtzahl der Antworten über das Probandenkollektiv hinweg, zeigen,

dass die Linien eine intuitivere Möglichkeit der Kommunikation mit dem Fahrer darstellen, als alle anderen getesteten Symbole.

Im Gegensatz zu den Studien von Reschke[52] und der Stanley Electric Co. Lt.[53], bei denen Symbole zur Kommunikation mit Personen außerhalb des Fahrzeugs untersucht wurden, konnten damit in der vorliegenden Arbeit Symbole gefunden werden, die sich für einen Großteil der Probanden als intuitives Kommunikationsmittel eignen (Durch Veränderung des Empfängers von Personen im Fahrzeugumfeld zum Fahrer des kommunizierenden Fahrzeugs ändert sich auch die verstandene Botschaft hinter den Symbolen. Symbole, die für einen Empfänger im Fahrzeug intuitiv wirken, können im Kontext der Kommunikation an andere Empfänger außerhalb des Fahrzeugs ihre Bedeutung verlieren.). Ohne zusätzliche Farbinformation in der Projektion oder Bewegung der Darstellung, konnten den Probanden während der Fahrt Informationen übermittelt werden. In allen vier Orientierungen wurden die einfachen Linienprojektionen von der Mehrheit der Probanden einheitlich verstanden und auf sie reagiert.

Auch hinsichtlich der technischen Machbarkeit sind die parallelen Linien den rechteckigen Symbolen gegenüber zu bevorzugen. Die Arbeiten von L. Siebel[69] und I. Cristea[77] zeigen, dass für die Erkennbarkeit und angenehmes Wahrnehmen durch den Fahrer von parallelen Linien geringere Helligkeiten beziehungsweise Kontraste notwendig sind, als zum Erkennen von größeren beleuchteten Flächen wie bspw. Rechtecken (Nach I. Ozhawa [78] nimmt das Kon-

trastempfinden beim Betrachten von beleuchteten rechteckigen Symbolen mit zunehmender Ortsfrequenz bis zu einem bestimmten Wert von etwa acht Linienpaaren pro Grad zu und danach wieder ab). Dies führt dazu, dass zwei parallele Linien bereits bei höherer Umgebungsbeleuchtung erkannt und damit häufiger genutzt werden können, als es bei schlechter erkennbaren Symbolen der Fall ist, die nur bei sehr geringer Umgebungshelligkeit erkannt werden können.

Die mögliche, erreichbare Helligkeit ist technologisch (und physikalisch) begrenzt. Eine erkennbare Erhöhung des Kontrasts zum zugrundeliegenden Abblendlicht benötigt deutlich stärkere Lichtquellen, damit mehr Material und Bauraum, und verursacht somit wiederum höhere Kosten.

Auch der Faktor des geringeren notwendigen Kontrasts für ein angenehmes Empfinden durch den Fahrer spielt für die Nutzung eines Projektionssystems zur Assistenz eine Rolle. Wird der Kontrast durch den Nutzer als angenehm empfunden, steigt auch die Akzeptanz des Fahrers gegenüber einem solchen Assistenzsystem.

Insgesamt lassen sich damit parallele Linien als Mittel zur Kommunikation nebst dem intuitiven Verständnis durch die Probanden auch hinsichtlich technischer und ökonomischer Aspekte als vielversprechend einstufen. In allen Bereichen zeigten sie das größte Potential bei der Nutzung in einem lichtbasierten Assistenzsystem. Bei der weiteren Entwicklung des Assistenzsystems wurden die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit deshalb mit den parallelen Linien durchgeführt.

3.2 STUDIE 2 – KOMMUNIKATION MIT LICHTPROJEKTIONEN UNTER REALITÄTSNAHEN BEDINGUNGEN

Im folgenden Abschnitt wird der Feldtest zur Kommunikation mit Lichtprojektionen beschrieben. Zur Validierung der Erkenntnisse der Simulator-Studie (Abschnitt 3.1) bei realer Fahrt wurde ein Versuchskonzept entwickelt (Abschnitt 3.2.1) auf welches folgend näher eingegangen wird. Für die Durchführung der Studie (Abschnitt 3.2.2) sollte eine Umgebung geschaffen werden, die einer Fahrt auf realen Landstraßen entspricht.

Die Auswertung dieser Fahrten (Abschnitt 3.2.3) erfolgt in Bezug auf im Straßenverkehr möglicher Gefahrensituationen. Die Ergebnisse werden im Anschluss im Hinblick auf den möglichen Einsatz eines solchen Systems diskutiert (Abschnitt 3.2.4).

3.2.1 VORBEREITUNG UND AUSARBEITUNG

Im Feldversuch soll reproduzierbar getestet werden, inwieweit sich Reaktionen aus der simulierten Umgebung bei einer Realfahrt unterscheiden. Dazu werden zunächst die zu erhebenden Parameter festgelegt die Aussagen hinsichtlich Wirksamkeit des projektionsbasierten Fahrerassistenzsystems ermöglichen (s. 3.2.1.B). Das dafür nötige Fahrzeug und die für den Versuch im Fahrzeug zusätzlich benötigte

Technik werden definiert (s. 3.2.1.C). Basierend auf den Anforderungen an die Studie (keine Gefährdung Unbeteiligter, Reproduzierbarkeit, Vergleichbarkeit zum Straßenverkehr, u.W.) wird ein passender Versuchsort ausgewählt (s. 3.2.1.D) und eine Versuchsdurchführung mit passenden Szenerien (s. 3.2.1.E) am Versuchsort konzipiert. Die zu testenden Projektionen basieren auf der Simulator-Studie; die detaillierten Ausprägungen werden in einer Expertenstudie (s. 3.2.1.F) festgelegt. Um die Resultate unabhängig von persönlichen Fahrstilen zu halten, wird durch Within-Subject-Design (s. 3.2.1.G) eine Form der Probandenstudie gewählt, in der den Probanden jeweils verschiedene Ausprägungen der gewählten Darstellungen gezeigt werden.

A. TESTSZENERIEN

In der Realstudie werden alle Ausprägungen der im Simulator ausgewählten Projektionsdarstellung (zwei parallele Linien) getestet. Damit ergeben sich vier Szenarien mit den Darstellungen: Linien parallel zur Fahrtrichtung, quer zur Fahrtrichtung und jeweils nach links und rechts geneigte Ausprägungen (Abbildung 3.22).



Abbildung 3.22 In Studie 1 gewählten, parallelen Linien (eingerahmte Symbole wurden in der Feldstudie verwendet).

Aufgrund des gewählten Within-Subject Designs der Studie (s. Abschnitt 3.2.1 C), bei welchem die Anzahl der Variablen direkten Einfluss auf die Versuchsdauer pro Proband hat, wurden die aus Abschnitt 3.1.3 bekannten Ergebnisse genutzt, um die Anzahl der Varianten zu reduzieren. In der Simulator-Studie wurde festgestellt, dass die Reaktion auf nach links geneigte Linien analog zu nach rechts geneigten Linien gewertet werden kann. Zur Varianten- und damit Zeitreduktion wurden im Feldversuch darauf basierend nur nach links geneigte Linien getestet (Abbildung 3.22 C). Die Anzahl an Szenarien konnte damit von insgesamt vier auf drei reduziert werden, womit sich die Dauer der Studie für die jeweiligen Probanden um ein Viertel der Zeit reduzierte.

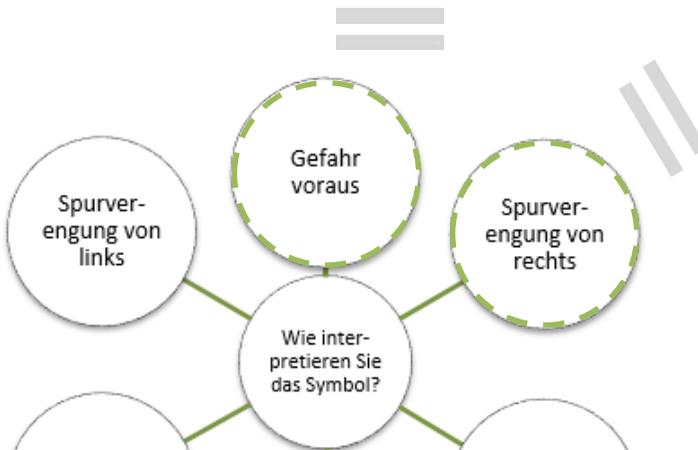


Abbildung 3.23 Ein Teil der aus der Simulator-Studie bekannten Interpretationsmöglichkeiten der verschiedenen Symbole bei Wahl einer Reaktion, die als Grundlage zur Erstellung der Hindernisse in der Feldstudie dienen. Umrandet gekennzeichnet: die verwendeten Szenarien mit den entsprechenden Symbolen.

Für den Einsatz der Projektionen wurden Szenerien gewählt, die den Interpretationen in der vorangegangenen Studie entsprechen (Abbildung 3.23). So war es möglich, die im Simulator genannten, theoretischen Reaktionen, mit realen Reaktionen in der Feldstudie vergleichbar zu machen und auf ihre praktische Wiederholbarkeit zu testen. Zusätzlich zu den in Abbildung 3.23 gezeigten Symbolen wurden parallel zur Fahrbahn ausgerichtete Linien verwendet, die von den Probanden in der Simulator-Studie mehrheitlich als „Alles in Ordnung“-Anzeige interpretiert wurden (Abbildung 3.22 A).

Szenerie 1:

In der Simulator-Studie wurden die parallel zur Fahrbahn ausgerichteten Linien als Zeichen für „Alles in Ordnung“ bzw. „Freie Fahrt“ und „Spur halten“ interpretiert. Für die Evaluierung dieser Linien wird entsprechend eine Szenerie gewählt, in welcher der Fahrer Unterstützung in der Längsführung des Fahrzeugs benötigt und in welcher ein Ausscheren vermieden werden soll. Dabei soll dem Fahrer suggeriert werden, dass „Alles in Ordnung“ ist, so lange er den angezeigten Linien folgt. Hierfür eignet sich eine Engstelle wie bspw. eine Baustelle, die vom Fahrer ein präzises Befolgen der Fahrspur erfordert.

Szenerie 2:

Die quer zur Fahrbahn ausgerichteten Linien wurden in der Simulator Studie mehrheitlich als abbremsendes Symbol verstanden. Um

diese Assoziation in der Feldstudie zu überprüfen wird eine Szenerie gewählt, welche den Probanden zum Bremsen animieren soll. Eine im Straßenverkehr denkbare Situation ist dabei ein großes Hindernis über die gesamte Fahrbahn, an welchem ein zügiges Vorbeifahren nicht möglich ist (Abbildung 3.23: „Gefahr voraus“).

Szenerie 3:

Die nach links geneigten Linien wurden von den Probanden vorwiegend als Aufforderung zum Spurwechsel nach links verstanden. Auch diese Assoziation sollte auf ihre Validität bei realer Fahrt überprüft werden. Eine Szenerie, welche einen Spurwechsel nach links hervorrufen kann, ist bspw. ein kleineres Hindernis auf dem rechten Teil der eigenen Spur (bspw. ein liegengebliebenes Fahrzeug am Straßenrand, Abbildung 3.23.: „Spurverengung von rechts“).

In den drei gewählten Szenerien sollte überprüft werden, ob die von den Probanden in der Simulator-Studie gegebenen Antworten in der Realfahrt bestätigt werden können. Die Engstelle dient dabei als herausfordernde Situation, in der die Probanden Unterstützung benötigen, die Hindernisse dienen der Positiv-Bestätigung der Probanden.

Um die Erkennbarkeit und das intuitive Verstehen noch weiter zu erhöhen werden die Linien für weiteren Untersuchungen zusätzlich zur statischen Anzeige auch dynamisch dargestellt. Wie bereits in der Arbeit von Kranstöver[48] untersucht, kann die dynamische Ausbreitungsrichtung einer Darstellung einen Einfluss auf die Reaktion von fahrenden Probanden haben (hier wurden u.a. Grätenmuster in einer

dynamischen Darstellung projiziert um das Fahrverhalten des Fahrers im jeweiligen Moment zu beeinflussen, ihn bspw. zum Beschleunigen oder Bremsen animieren).

Die Auswahl der Ausprägungen der Linien in statischer wie auch in dynamischer Form erfolgt in einer Expertenstudie (3.2.1. G).

B. ZU ERHEBENDE DATEN

Für die drei verschiedenen Szenarien werden entsprechende Daten zur Erfassung gewählt und gesamtheitlich über den Fahrversuch erfasst. Die zur Auswertung der einzelnen Szenarien im Detail herangezogenen Parameter werden an den entsprechenden Stellen im Verlauf der vorliegenden Arbeit definiert (Abschnitt 3.2.3).

Insgesamt wird primär auf Daten aus dem sog. „Controller Area Network“ (*kurz: CAN*) zurückgegriffen, in dem ein Großteil der fahrdynamikspezifischen Daten verarbeitet wird. Die gesamtheitliche Erfassung der CAN-Daten ermöglicht auch eine spätere Auswertung von weiteren Parametern, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet wurden.

Weiterhin wird ein sogenanntes differentielles globales Positionierungssystem (*kurz: dGPS*) in das Fahrzeug integriert. Dieses ermöglicht eine Positionserfassung mit einer Genauigkeit von bis zu 2 cm. Mit präzise positionierten Szenarien kann somit eine Vergleichbarkeit der Probanden auch untereinander gewährleistet werden.

Zusätzlich ist eine Kamera im Fahrzeug installiert und über einen „Universal Serial Bus“ (*kurz*: USB) verbunden um eine Nachvollziehbarkeit der Daten gewährleisten zu können. Damit kann auch nachträglich geprüft werden, ob Reaktionen von den gewählten Symbolen verursacht wurden oder gegebenenfalls doch von etwaigen ungeplanten Versuchsteilnehmern wie Kaninchen u.Ä.

C. TESTFAHRZEUG

Bei der Wahl des Testfahrzeugs sind zwei maßgebliche Kriterien zu beachten: Zum einen soll das Fahrzeug eine hohe Gesamtfahrzeugbreite aufweisen. Dies ist vor allem für die Erprobung des Engstellenlichts in der nach RSA 95 ([79] s. Abschnitt 3.2.1. E) aufgebauten Engstelle relevant. Gleichzeitig soll das Fahrzeug möglichst häufig auf den Straßen vertreten sein, um die Reproduzierbarkeit der Studie zu ermöglichen und eine Ablenkung der Probanden durch ein zu unbekanntes („exotisches“) Fahrzeug (bspw. „Hummer“) zu verhindern. Die Entscheidung fiel deshalb auf den BMW 5er Touring (F11): Eine Gesamtfahrzeugbreite (inkl. Seitenspiegeln) von 2,16 m trifft auf ein zum Zeitpunkt der Auswahl beliebtes Fahrzeug (Neuzulassungen 1. Quartal 2017: F10 + F11: 8.012 Fahrzeuge entspricht 25,8% der Neuzulassungen in der oberen Mittelklasse [80]).

Zur Umsetzung der Projektionen wurde ein handelsüblicher Beamer (Acer P7280) gewählt, bei dem zur Erhöhung der Lichtstärke und, damit auch höheren Leuchtdichte auf der Fahrbahn, das integrierte

STUDIE 2 – KOMMUNIKATION MIT LICHTPROJEKTIONEN

Farbrad entfernt wurde. Der Projektor wurde in ein passendes Gestell eingespannt (Abbildung 3.24, A), welches eine spätere Montage am Fahrzeug ermöglicht. Um die Versuchspersonen nicht durch grobe Anbauten vor dem Fahrzeug abzulenken und damit ggf. im Realverkehr nicht reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten, wird der Projektor während des Versuchs außerhalb des Sichtfelds des Fahrers montiert. Hierzu wurden der Kühlergrill des Fahrzeugs sowie Teile der Karosserie entfernt bzw. angepasst und der Projektor in dem angefertigten Gerüst zwischen den zwei Serien-Scheinwerfern eingebaut (Abbildung 3.24, B). Damit wurde eine Anbauposition gewählt, die zu einer späteren Realisierung in einem Serienfahrzeug vergleichbar ist und die nach Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (§ 50 StVZO) die Maximalanbauhöhe von Leuchten von 1,20 m nicht überschreitet[47].



Abbildung 3.24 Acer Projektor in einem angepassten Rack zur Montage im Testfahrzeug (A, hier kopfüber gelagert) und Versuchsfahrzeug mit im Rack eingebundenem Projektor (B).

Die Bedienung und Stromversorgung des Projektors wird durch im Fahrzeuginnenraum verlegte Kabel gewährleistet. Die Stromversorgung erfolgt dabei über einen Wechselrichter, der über die Fahrzeugbatterie betrieben wird. Eine zusätzlich eingebaute Batterie dient als Reserve-Versorgung im Falle einer zu starken Entladung der Primärversorgung.

Über ein „Video Graphics Array“ (*kurz: VGA*)-Kabel konnten die notwendigen Bilder von einem Laptop an den Projektor gesendet werden. Hierzu wurde eigens ein Anzeigeprogramm basierend auf dem Programm „Visual Studio“ erstellt.

Die notwendige Verzerrung der Projektionsgraphik wurde via „MatLab“ konfiguriert. Die Korrektur der Verzerrung wurde in Abhängigkeit von der Anbauhöhe des Projektors am Fahrzeug und der Projektionsdistanz errechnet und stellt die Parallelität der gewählten Linien auf der Projektionsfläche sicher.

Das zur genauen Positionserkennung des Fahrzeugs zur Nachverfolgbarkeit der Ergebnisse benötigte dGPS-Gerät wurde, wie auch der Projektor, außerhalb des Sichtbereichs des Fahrers hinter dem Beifahrersitz angebracht.

Über das Programm „Automotive Data and Time-Triggered Framework“ (*kurz: ADTF*) werden während der Studie CAN-Daten, dGPS-Daten und das Bildmaterial der installierten Webcam synchronisiert und aufgezeichnet (Abbildung 3.25).

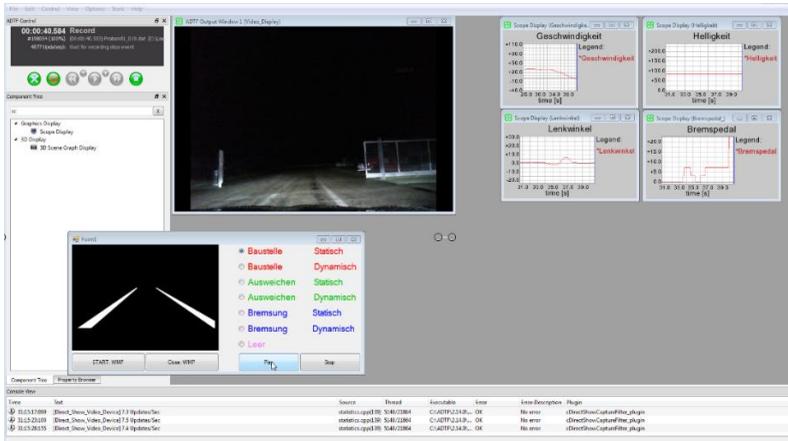


Abbildung 3.25 Erstellte Oberfläche zur Bedienung des Projektors und Synchronisierung der Messwerte während der Fahrt. Über Visual Studio (kleines Fenster im Vordergrund) werden die Projektionen gewählt. In ADTF (Hintergrund) werden die zur Synchronisation gewählten Daten inklusive des Kamerabilds in Echtzeit dargestellt und aufgezeichnet.

D. STRECKE

Zum Zeitpunkt der Durchführung der vorliegenden Studie waren keine Forschungsergebnisse zum Ablenkpotential anderer Verkehrsteilnehmer durch projektionsbasierte Assistenzsysteme bekannt. Es konnte somit nicht ausgeschlossen werden, dass eine Ablenkung vom Fahrer oder anderen Verkehrsteilnehmern durch diese Projektionen stattfindet. Um eine Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer zu vermeiden, wurde eine Erprobung auf öffentlichen Straßen ausgeschlossen und eine private Teststrecke gewählt.

Die Erprobung auf einer privaten Teststrecke erhöht zudem die Reproduzierbarkeit der Studienergebnisse, da äußere Einflüsse durch andere Verkehrsteilnehmer auf dem zutrittsbeschränkten Gelände reduziert werden können.

Um intuitive Reaktionen erfassen zu können und früh eintretende Gewöhnungseffekte der Probanden zu vermeiden sind lange und schlecht einsehbare Fahrwege notwendig.

Der Hockenheimring erfüllt mit den vorhandenen Bedingungen die gestellten Anforderungen: Fahrbahnbelag und -breite sowie stellenweise Fahrbahnmarkierungen haben eine hohe Vergleichbarkeit zu öffentlichen Straßen. Durch einen kurvenreichen Streckenverlauf und einige Sichtschutzelemente kann die Einsehbarkeit der Gesamtstrecke als gering eingeordnet werden (Abbildung 3.26[81]).

E. HINDERNISSE/SZENERIEN

Auf der Geraden (Abbildung 3.26, Stelle A) wurde eine Baustellenbegrenzung (*ab hier im weiteren Text: „Baustelle“*) mit einer Gesamtlänge von 100 m aufgebaut. Der Aufbau richtet sich nach den „Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen“ (kurz: RSA 95)[79], genauer genommen nach Regelplan C I / 5,. Hierfür sind Schraffenbaken mit Reflexfolien der Klasse RA 2 verwendet worden.

Aufgrund der Verschwenkung der jeweils ersten fünf Baken auf beiden Seiten der Baustelle wurden diese mit Warnleuchten vom Typ WL1 ausgestattet.



Abbildung 3.26 Luftaufnahme des Hockenheimrings mit gewählter Streckenführung für den Feldtest. Die Kreuze kennzeichnen die Positionen der Positionen der Hindernisse. *Aufnahme: webbaviation.de*

Beidseitig wurden insgesamt 40 Baken und 10 Warnleuchten verbaut (Abbildung 3.27). Durch die Verschwenkung an den jeweils ersten 5 Baken entsteht eine Verjüngung der Fahrbahn von zu Beginn 3 m auf

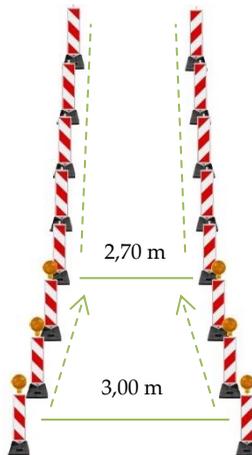


Abbildung 3.27 Schematische Darstellung der Engstellen-Situation.

2,70 m. Der Abstand zwischen den Baken auf einer Seite beträgt, gemäß RSA 95, 5 m. Die sehr eng angelegte Strecke mit 1 m hohen Leitbaken sollte ein erhöhtes Engegefühl und damit eine Verunsicherung bei den Probanden während der Durchfahrt hervorrufen.

Neben der Baustelle wurden zwei weitere Szenerien aufgebaut: eine Szenerie mit Brems- und eine mit einem Ausweichhindernis. Um den Gewöhnungseffekt weiter zu reduzieren und ein Vorab-Reagieren zu verhindern, wurden diese Hindernisse im Lauf des Versuchs in randomisierter Reihenfolge vertauscht. Ein frühzeitiges Erkennen der Hindernisse sollte durch einen geringen Reflektionsgrad verhindert werden. Dafür wurde die Oberfläche der Hindernisse mit einem dunklen Malerflies bedeckt. Der Reflektionsgrad des Malerflies' ist gut mit demjenigen von Asphalt vergleichbar (s. Abbildung 3.28 [82]) wodurch sich die Hindernisse optisch nicht stark vom Untergrund abhoben. Als Hindernisse dienten gespritzte Schaumstoffteile um im Fall des Nicht-Erkennens konnte somit ein Verletzungs- und Beschädigungsrisiko reduziert werden.

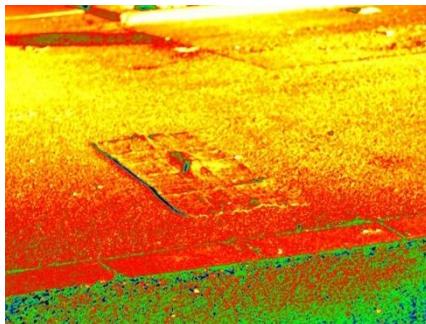


Abbildung 3.28 Leuchtdichteaufnahme eines Stücks Malerflies auf Straßenasphalt.
Bild: P. Jahn

Die Positionen der Hindernisse befanden sich an den Stellen B und C des in Abbildung 3.26 dargestellten Streckenverlaufs. Damit wurden beide Hindernisse auf einer langen Geraden hinter einer Kurve positioniert. Durch die Positionierung der jeweiligen Hindernisse auf der Strecke waren die Probanden gezwungen entweder auszuweichen (kleines Hindernis am rechten Fahrbahnrand) oder zu bremsen (großes Hindernis).

F. EXPERTENSTUDIE ZUR AUSWAHL DER DARSTELLUNG DER LINIEN

Für die aus Studie 1 entwickelten Linien-Symbole wurden in einer Expertenstudie die Position der Projektion relativ zum Fahrzeug, die Breite der einzelnen Linien und deren Dynamik, für den Fall einer bewegten Darstellung, ausgewählt. Die Expertengruppe umfasste lichttechnischen Experten aus der Industrie (genauer von BMW) und vom Lichttechnischen Institut des Karlsruher Instituts für Technologie. Die Gruppe bestand aus 14 Männern und Frauen im Alter zwischen 25 und 61 Jahren. Die Durchführung fand im Stand am Versuchsträger und jeweils in abgedunkelten Räumen statt (Lichtkanal der BMW AG in München bzw. Tiefgarage am Lichttechnischen Institut des Karlsruher Instituts für Technologie).

Folgend werden die Ergebnisse der Expertenstudie für die einzelnen Darstellungen vorgestellt.

LINIEN PARALLEL ZUR FAHRBAHN

Für die zur Fahrbahn parallel ausgerichteten Linien wurde eine Positionierung gewählt bei dem der Beginn der Linien für den Fahrer nicht sichtbar ist („Linien beginnen unter dem Fahrzeug“). Linien, die einen weiteren, sichtbaren Abstand zum eigenen Fahrzeug haben (Abbildung 3.29) wurden abgelehnt.

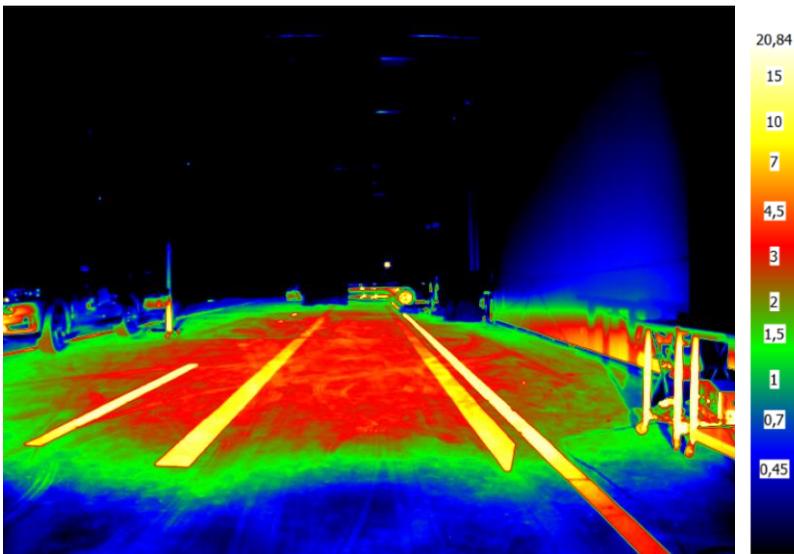


Abbildung 3.29 Leuchtdichteaufnahme des Engstellenlichts auf LED-Abblendlicht. Die Werte sind rechts in Cd/m^2 angegeben und stehen im Vergleich zum Abblendlicht in einem Kontrast von bis zu 1:3. Hier dargestellt sind die schmalen, parallelen Linien, die mit sichtbarem Abstand zum Fahrzeug projiziert werden.

Breite Linien (350 mm) wurden fälschlicherweise mit der ungefähren Breite der Reifen des Fahrzeugs assoziiert und wiederholt als „Spuranzeigen“ missverstanden.

Um die absolute Fahrzeugbreite darzustellen wurde deshalb auf die schmalere Darstellung (190 mm breite Linien) zurückgegriffen.

Als Alternative zu den in der Simulator Studie getesteten, statisch dargestellten Linien, wurden auch Linien mit einer Dynamik betrachtet. Für eine dynamische Darstellung wurde ein fließender Aufbau der Linien gegenüber einer blinkenden Darstellung gewählt. Die Geschwindigkeit der Dynamik lag hier in etwa bei 1,5 Hz, der üblichen Frequenz eines Fahrtrichtungsanzeigers und wurde stetig vom Fahrzeug hin in Fahrtrichtung aufgebaut.

LINKSGENEIGTE LINIEN

Wie auch bei den Linien parallelen zur Fahrtrichtung wurden die schmaleren Linien gegenüber breiten Darstellungen bevorzugt. Als Dynamik-Variante wurde ebenfalls eine sich langsam vom Fahrzeug weg aufbauende Graphik gewählt. Der Abstand der Linien wurde sowohl in der statischen, als auch in der dynamischen Ausprägung sichtbar vor das Fahrzeug gelegt. Bei Linien, die direkt vor dem Fahrzeug projiziert wurden, gaben viele Experten an, sich in diesem Fall zu einer raschen Reaktion gedrängt zu fühlen. Ein plötzliches Reagieren sollte bei diesen Funktionen unbedingt vermieden werden. Die Wahl fiel deshalb auf die Darstellung, bei der die Linien erst 7 m vor dem Fahrzeug beginnen.

LINIEN QUER ZUR FAHRBAHN

Bei den quer zur Fahrbahn ausgerichteten Linien fiel die Entscheidung der Experten ebenfalls auf eine langsam aufbauende Dynamik. Im Gegensatz zu den zur Fahrtrichtung parallelen und linksgeneigten Linien wurde hier jedoch eine zum Fahrzeug hin aufbauende Dynamik gewählt. Sowohl in der statischen als auch dynamischen Variante wurden eine breitere Darstellung der Linien bevorzugt. Die erhöhte Breite diente der besseren Erkennbarkeit auf der Straße. Der Abstand zum Fahrzeug wurde zunächst auf 15 m vor dem Fahrzeug gewählt, um den Blick des Fahrers weiter in die Ferne zu richten.

G. VERSUCHSKONZEPT

Für die Probandenstudie wurde ein Within-Subject-Design gewählt. Hierbei hat die Anzahl der zu testende Variablen direkten Einfluss auf die Dauer des Tests für jedes Individuum (*Vergleich*: beim Between-Subjects-Design nimmt mit der Anzahl der Variablen die Anzahl der Probandengruppen zu. Die individuelle Gesamtdauer des Versuchs bleibt unverändert).

Mit zunehmender Dauer erhöht sich das Risiko der Ermüdung der Probanden. Ermüdung kann sich bei Studien auf die Resultate auswirken und sollte, um eine gesonderte Betrachtung zu vermeiden, in der hier folgenden Studie ausgeschlossen werden (s. Varianten-Reduzierung in Abschnitt 3.2.1 A).

Auf der Teststrecke wurden an drei Positionen Szenerien (s. Abschnitt 3.2.1 E) aufgebaut (Abbildung 3.26). Pro Runde auf der Teststrecke passierte jeder Proband damit drei Szenerien. Das gewählte Studienmodell sah vor, dass jeder Proband insgesamt vier Runden auf der Strecke absolvierte und damit je vier Mal mit jeder Szenerie konfrontiert wurde. Jede Szenerie wurde dabei je zwei Mal unter zwei verschiedenen Bedingungen (*hier*: Lichtverteilungen) angefahren. Ziel war es, zu untersuchen, ob ein Unterschied der Fahrten unter den jeweiligen Bedingungen festgestellt werden kann. Effekte durch Unterschiede im individuellen Fahrverhalten als auch Effekte durch äußere Umstände (bspw. verschiedene Lichtverhältnisse durch unterschiedliche Bewölkungsdichten an den Versuchstagen) wurden durch das Within-Subject Design reduziert. Um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden wurden die Bedingungen randomisiert angeordnet.

Die Einbringung einer dynamischen Entwicklung der Projektionen (Abschnitt 3.2.1 F) basiert auf der Möglichkeit einer Aufmerksamkeitssteigerung der Probanden aufgrund der bewegten Darstellung [14] und einer verbesserten Beeinflussung des Fahrverhaltens der Probanden an den entsprechenden Szenerien [48]. Der Mehrwert einer dynamischen Darstellung gegenüber einer statischen Darstellung, wie sie in Studie 1 getestet wurde, sowie gegenüber Abblendlicht, wurde in separaten Probandengruppen untersucht.

Die Wahl des Projektionszeitpunktes der Linien wurde in Abhängigkeit von der jeweiligen Distanz zum Hindernis gewählt. Die konkrete Distanz betrug 200 m zum Hindernis und basiert auf Berechnungen

der Anhaltewege im Fall einer Normalbremsung auf deutschen Bundesautobahnen: Bei einer vorgegeben Richtgeschwindigkeit von 130 km/h beträgt der Anhalteweg (bei vorausgesetzter trockener Fahrbahn) 208 m.

In der vorliegenden Studie wurde zwar eine Richtgeschwindigkeit von 80 km/h vorgegeben (Anhalteweg von 88 m bei Normalbremsung), es wurde jedoch auch mit zwischenzeitlich höheren Geschwindigkeiten gerechnet. Die Distanz zum Hindernis bei Aufleuchten der Projektionen wurde abhängig vom Anhalteweg bei 130 km/h gewählt und für eine bessere Darstellung im weiteren Verlauf auf 200 m festgelegt.

Die gewählte Distanz ermöglicht im Fall von Gefahrenbremsungen auch Anhaltewege für Geschwindigkeiten bis 170 km/h wie sie auf deutschen Bundesautobahnen anzutreffen sind (Anhalteweg bei Gefahrenbremsung: 195,5 m). Die hierzu notwendigen Detektions-Distanzen sind durch LIDAR- und RADAR- Systeme bereits realisierbar.[83] [84, 85].

Das Probandenkollektiv, akquiriert aus einem Probandenpool des Lichttechnischen Instituts des Karlsruher Instituts für Technologie und der BMW AG, bestand aus unbefangenen Personen, die den Querschnitt der Kraftfahrzeugführer der Bundesrepublik möglichst gut widerspiegeln. Eine Einschränkung hinsichtlich Fahrerfahrung, Alter oder Geschlecht wurde dafür nicht durchgeführt. Lediglich die

Sehkraft der Probanden wurde als normal, beziehungsweise mit Sehhilfe zu normal korrigiert, vorausgesetzt. Eine weitere Voraussetzung war der Besitz eines Führerscheins der Klasse B.

In die Auswertung der Studie flossen Daten von insgesamt 82 Probanden im Alter zwischen 20 und 68 Jahren ein. Das durchschnittliche Alter betrug dabei 35 Jahre. Von den 82 Probanden waren 66 männlich und 16 weiblich.

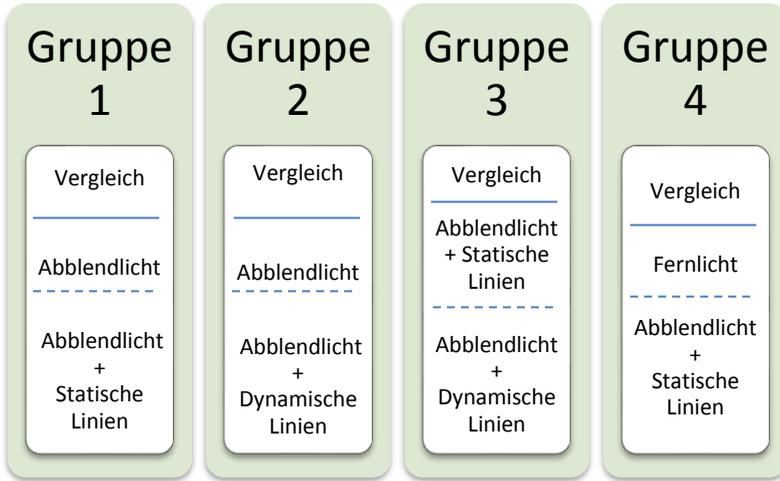
Die Probanden wurden zufällig in vier Gruppen eingeteilt (Tabelle 3.2). Entsprechend der Gruppenzugehörigkeit wurde jeder Proband im Anschluss an den fahrdynamischen Teil der Studie zu den zwei Bedingungen (*im Folgenden: Varianten*) befragt, mit denen er auf der Strecke konfrontiert wurde.

In **Gruppe 1** wurde der Unterschied zwischen Fahrten bzw. Reaktion auf Hindernisse mit handelsüblichem LED-Abblendlicht (*kurz: AL*) und mit Abblendlicht und zusätzlichen Linien in statischer Ausprägung (*weiter: „statisch“*) untersucht.

Probanden der **Gruppe 2** wurde auf der Strecke entweder LED-Abblendlicht oder Abblendlicht mit zusätzlichen Linien in dynamischer Ausprägung (*weiter: „dynamisch“*) zur Verfügung gestellt.

In einer weiteren Gruppe (**Gruppe 3**) wurde der Einfluss auf das Fahrverhalten durch statische und dynamische Linien mit jeweils zugrundeliegendem LED-Abblendlicht verglichen.

Tabelle 3.2 Definition der Gruppen und der darin untersuchten Einflüsse unterschiedlicher Varianten. Die Zuordnung zu den Gruppen erfolgte zufällig.



Probanden der **Gruppe 4** führen die Strecke entweder mit Fernlicht oder mit Abblendlicht und zusätzlichen statischen Linien ab. Hier sollte ein direkter Vergleich des entwickelten Assistenzsystems zur aktuell besten Möglichkeit der Sichtweitenerhöhung, und damit früheren Reaktion, gezogen werden.

Eine fünfte Gruppe, in der ein Vergleich zwischen Fernlicht und dynamischen Liniendarstellungen gezogen werden sollte, wurde im Verlauf der Durchführung der Studie verworfen, da keine zusätzlichen Erkenntnisse erwartet wurden.

3.2.2 DURCHFÜHRUNG AUF DEM TESTGELÄNDE

A. VORBEREITUNG DER PROBANDEN

Nach Eintreffen der Probanden wurde zunächst ein Sehtest durchgeführt um ihren Visus zu ermitteln und ihr Kontrastsehen zu testen. (Die Teilnahme von Probanden, die aufgrund von schlechtem Sehvermögen gezeigte Projektionen nicht (rechtzeitig) erkennen, kann zur Verfälschung der Messergebnisse führen). Die Sehkraft wurde inklusive der im Führerschein vermerkter Sehhilfe gemessen und richtete sich nach den gesetzlichen Vorgaben für Tagessehschärfe. Laut Fahrerlaubnisverordnung (*kurz: FeV*) Anlage 6 des Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz gilt ein Sehtest als bestanden, wenn eine Tagessehschärfe von 0,8 erreicht ist[86]. Erreichte ein Proband diesen Visus beim Sehtest für die vorliegende Studie nicht, wurde er vom weiteren Experiment ausgeschlossen.

Um Versuchsleitereffekte zu vermeiden, erhielt der Proband nach erfolgreich absolviertem Sehtest, einen schriftlich formulierten Informationsbogen. Hier wurde der weitere Versuchsablauf geschildert sowie der Kontext des Versuchs erläutert. Anschließend wurde der Proband zum Versuchsfahrzeug geführt um sich den Fahrerbereich nach eigenem Bedarf einzustellen und sich mit den Funktionen des Fahrzeugs vertraut zu machen.

Vor dem Auffahren auf die Teststrecke wurden dem Probanden die möglichen Projektionen aufgezeigt, die ihm im Verlauf des Versuchs

begegnen könnten. Dies geschah unter der Annahme, dass ein potentieller Nutzer einer solchen, optisch auffälligen, Funktion zuvor in der Werbung, im Autohaus beim Kauf des Fahrzeugs o.Ä. bereits mit der Funktion konfrontiert wurde. Um eine Beeinflussung der späteren Reaktionen des Probanden zu vermeiden, fand keine Erläuterung der Bedeutungen der einzelnen Projektionen statt. Auch hier wurde sich am Kaufverhalten von Kunden orientiert: nicht immer ist Kunden die Funktionsweise und die genaue Bedeutung von gekauften Funktionen im eigenen Fahrzeug bekannt[87].

Funktionen wie das „Elektronische Stabilitätsprogramm“ (*kurz*: ESP) oder der Bremsassistent sind Kraftfahrern laut der Studie von Bosch [87] oft nicht bekannt, obwohl sie im eigenen Fahrzeug verbaut sind. Im Gegensatz dazu sind die hier getesteten Projektionen im eingeschalteten Zustand nur schwer zu übersehen. Die Existenz dieser Funktion im einen Fahrzeug sollte dem Fahrer damit bekannt sein. Das Wissen um die genaue Bedeutung kann jedoch nicht vorausgesetzt werden. Eine Erläuterung der Bedeutung erhielten die Probanden auch während der Fahrt nicht. Die Kommunikation zwischen dem Fahrer und dem Versuchsleiter beschränkte sich auf der Strecke auf Navigationsangaben.

Alle Fahrten wurden bei Nacht und damit bei geringer Umgebungsleuchtdichte durchgeführt. Eine Überprüfung von abweichenden Lichtverhältnissen fand durch zusätzliche Aufnahme der Umgebungsleuchtdichte mittels im Fahrzeug verbauter Sensoren statt.

B. AUF DER STRECKE

Zu Beginn der Fahrt wurde die Datenaufzeichnung durch den Versuchsleiter gestartet. Dieser war hinter dem Fahrer im Fond des Fahrzeugs positioniert und bediente das Programm zur Auswahl der Projektionen. An vordefinierten Positionen wurden die, zuvor randomisiert hinterlegten, Projektionen eingeschaltet. Der im Versuchsverlauf aufgezeichnete Streckenverlauf ist Abbildung 3.30 zu entnehmen. Die Positionen der Szenarien sind dort mit „X“ gekennzeichnet.

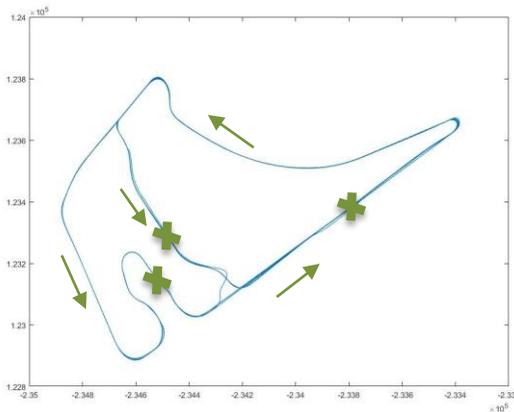


Abbildung 3.30 Aufgezeichnete GPS-Daten einer Gesamtdurchfahrt eines Probanden.

Die Probanden wurden darauf hingewiesen, die Fahrt auf einer unbekanntem Landstraße anzunehmen, mit einer Geschwindigkeit von etwa 80 km/h zu fahren und sich der rechten Seite der Fahrbahn zu halten. Die Reise-Geschwindigkeit richtete sich nach dem individuellen Sicherheitsempfinden der Probanden. Bei Unsicherheit wurde

den Probanden offen gestellt zunächst mit geringerer Geschwindigkeit zu fahren.

Im Folgenden soll näher auf die einzelnen Szenarien eingegangen werden. Die Baustelle war für den Versuch einleitend und wurde während der gesamten Dauer des Versuchs nicht verändert. Die Reihenfolge der anderen Szenarien (Bremsen und Ausweichen) wurde zur Verringerung des Gewöhnungseffekts randomisiert und die Hindernisse im Verlauf der Durchführung entsprechend durch Mitarbeiter dynamisch angepasst. Durch die Randomisierung konnte es damit vorkommen, dass ein Proband bis zu vier Mal hintereinander eine Ausweichsituation antraf, bevor er zum ersten Mal mit einer Bremssituation konfrontiert wurde.

SZENERIE 1: BAUSTELLE

Die Baustellensituation wurde am Ende einer langen Geraden positioniert. 200 m vor der ersten Bake wurde, je nach Gruppe eine der Lichtverteilungen eingeblendet: Abblendlicht, Abblendlicht + statische Linien, Abblendlicht + dynamische Linien oder Fernlicht.

Der Aufbau ist gemäß RSA 95 (s. Abschnitt 3.2.1 E [79]) erfolgt (Abbildung 3.31). Die zu Beginn mit 3 m Breite aufgebaute Baustelle verjüngte sich nach 25 m auf 2,70 m. Bei einer Fahrzeugbreite des Versuchsträgers von insgesamt 2,16 m (Abmessungen inklusive Außenspiegeln) blieben den Probanden damit pro Seite je 0,27 m Platz um eine Kollision mit den Baken zu vermeiden.

Wurde während der Durchfahrt eine zusätzliche Lichtprojektion genutzt, wurde diese mit Passieren der letzten Bake ausgeschaltet und der Proband setzte die Fahrt mit Abblendlicht fort.



Abbildung 3.31 Aufbau der Baustelle am Tag (A) und während der Probandenstudie bei Nacht (B).

SZENERIE 2 & 3: AUSWEICHEN UND BREMSEN

Im Gegensatz zum Aufbau der Baustellen konnten die Hindernisse der Ausweich- und Bremsszenarie während des laufenden Versuchs umgebaut werden. Wie eingangs erwähnt wurden die Hindernisse zur Verringerung des Lerneffekts randomisiert auf zwei vorher zugewiesenen Positionen auf- und umgebaut. Auch wenn sich der Proband nach einigen Runden die Position der Szenarien einprägen konnte, war ein vorgreifendes Reagieren nicht möglich. Der Proband musste die Situation bei jedem Annähern wiederholt erkennen und

bewerten, ob er nach links ausweicht, oder die Geschwindigkeit reduziert.



Abbildung 3.32 Hindernisse zum Ausweichen (A) und Bremsen (B) während der Probandenstudie mit statischer Projektion vor dem Fahrzeug.

Der Unterschied der zwei Szenarien lag in der Größe des jeweiligen Hindernisses. Das Hindernis in der Ausweich-Szenerie wurde in etwa der Breite eines Mittelklassewagens nachempfunden und nahm nur die halbe Fahrbahn ein (Abbildung 3.32 A), weshalb ein Ausweichen bei konstanter Geschwindigkeit gefahrlos möglich war. Das Brems-Hindernis hingegen erstreckte sich über die gesamte Fahrbahnbreite (Abbildung 3.32 B) und konnte nur mit stark reduzierter Geschwindigkeit passiert werden. Beide Hindernisse hatten eine Höhe von 1,20 m. Ein direktes Überfahren war somit nicht möglich. Aufgrund der zuvor angegebenen, vorausgesetzten Vergleichbarkeit zwischen einem Ausweichszenario nach links und einem selbigen nach rechts, wurden die Hindernisse hier nur auf dem rechten Teil der Fahrbahn aufgebaut.

Auch bei diesen Szenarien wurde, je nach Gruppe, 200 m vor dem Hindernis die entsprechende Lichtverteilung angezeigt: Abblendlicht, Abblendlicht + statische Linien, Abblendlicht + dynamische Linien oder Fernlicht. Zusätzlich projizierte Linien wurden bei Erreichen des Hindernisses (Bremsen) oder bei Erreichen der vorgegebenen Ausweich-Spur (Ausweichen) wieder ausgeschaltet.

Die Gesamtversuchsdauer pro Proband betrug, abhängig von der Fahr-Geschwindigkeit, 30-45 Minuten. Ermüdungseffekte waren somit nicht zu erwarten. Spontane Meinungsäußerungen des Probanden zu den Funktionen wurden in diesem Zeitraum vom Versuchsleiter notiert.

C. ABSCHLUSSFRAGEBOGEN

Um die subjektiven Empfindungen der Probanden quantifizieren zu können, wurde jedem Probanden im Anschluss an die Fahrt ein Abschlussfragebogen ausgehändigt. Hier wurde das individuell empfundene Fahrgefühl in den Situationen mit Projektionen abgefragt (s. Anhang B.2).

Interessant ist hier vor allem der Vergleich der subjektiven Empfindungen zu den objektiv erhobenen CAN- und dGPS-Daten, welcher im Abschnitt 3.2.3 jeweils im Anschluss an die objektiven Resultate betrachtet wird.

3.2.3 ERGEBNISSE UND AUSWERTUNG DES FAHRVERSUCHS

Im Folgenden sollen die im Rahmen der Fahrten erhaltenen Ergebnisse vorgestellt und ausgewertet werden. Hierzu wird in Abhängigkeit der Gruppen auf die einzelnen Szenarien eingegangen und ein Vergleich zwischen den verschiedenen Lichtverteilungen gezogen. Neben den objektiv erhobenen CAN-Daten und dGPS-Daten werden auch die Antworten der Probanden im abschließenden Fragebogen vorgestellt. Ein Vergleich zwischen objektiv erfassten Daten und subjektiv gegebenen Antworten der Probanden soll sowohl den möglichen Nutzen als auch die Akzeptanz von potenziellen Nutzern bewerten.

Die Resultate der ersten Gruppe (Vergleich AL zu AL+statisch) werden hier zunächst im Detail beschrieben. Dafür werden sowohl die Messwerte des jeweils ersten Kontakts mit den einzelnen Situationen („Erste Runde“), als auch die Mittelwerte über die gesamten vier Runden der Probanden („Vier Runden“) aufgezeigt. Bei der Betrachtung der ersten Runden kommt das Between-Subject-Design zum Tragen, da die einzelnen Probanden mit jeder Szenerie nur ein Mal zum ersten Mal konfrontiert werden konnten. Zur Überprüfung der statistischen Signifikanz wird der unabhängige t-Test verwendet.

Die Resultate der vier Runden fallen unter das Within-Subject Design und werden durch den t-Test mit abhängigen Parametern auf statistische Signifikanz überprüft.

Die Null-Hypothese bei der Prüfung auf Signifikanz lautet hier: „Es besteht kein Unterschied bei Fahrten mit und ohne zusätzliche Lichtprojektionen“. Wird eine Signifikanz des Ergebnisses festgestellt, wird die Null-Hypothese abgelehnt und die Gegenhypothese angenommen („Es besteht ein Unterschied bei Fahrten mit und ohne zusätzliche Linienprojektionen“).

Bei vorhandener Signifikanz wird die Effektstärke r berechnet nach (I).

$$r = \sqrt{\frac{t^2}{t^2 + df}} \quad (I)$$

Mit r = Korrelationskoeffizient; t = Testprüfgröße des t-Tests und df = Anzahl der Freiheitsgrade (*engl.* degrees of freedom)

Die Einstufung in schwach, mittel und starken Effekt erfolgt dabei nach den auf Cohen basierenden, von Gignac & Szodorai 2016 empirisch ermittelten, Schwellen[88].

Die Resultate der Gruppen 2 bis 4 werden an dieser Stelle nicht im Detail besprochen. Es erfolgt lediglich eine Übersicht über die relevanten Erkenntnisse der Studie aus diesen Gruppen. Die detaillierten Ergebnisse können jeweils im Anhang D.2 eingesehen werden.

A. BAUSTELLE

Für die Auswertung des Engstellen-Versuchs wurden Messwerte herangezogen, die ein Sicherheitsempfinden des Fahrers widerspiegeln können: Es wurde angenommen, dass ein souveräner Fahrer in einer herausfordernden Situation seltener und weniger plötzlich lenkt (damit das Lenkrad nicht „verreißt“). Dies sollte zusätzlich anhand der Antworten der Probanden im Fragebogen verifiziert werden. Zur Quantifizierung der gemessenen Daten wurden die im Baustellenbereich getätigten Lenkbewegungen (*genauer genommen*: die Differenzen der Lenkwinkelschläge zwischen je zwei Messpunkten) aufsummiert und die durchschnittliche Geschwindigkeit dieser Bewegungen ermittelt.

Weiterhin wurde angenommen, dass ein erfolgreiches Assistenzsystem die Durchschnittsgeschwindigkeit in und vor der Baustelle positiv beeinflusst. Eine Fahrt mit einer Geschwindigkeit näher an der vorgegebenen Richtgeschwindigkeit von 80 km/h kann als Indiz dafür gewertet werden, dass der Fahrer die Strecke souveräner passierte, als ein Fahrer mit einer sehr geringen Geschwindigkeit.

An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass kein Effekt der Projektionen auf die Geschwindigkeit vor dem Eintritt in die Baustelle im Vergleich zu den konventionellen Lichtfunktionen (Ablend- und Fernlicht) festgestellt werden konnte. Aus diesem Grund wird nicht weiter auf diese Untersuchung eingegangen.

GRUPPE 1: ABBLENDLICHT ↔ ABBLENDLICHT + STATISCHE LINIEN

In Gruppe 1 wurde ein Vergleich zwischen LED-Abblendlicht und Abblendlicht mit zusätzlich zugeschalteten Linien-Projektionen als Fahrzeugbreitendarstellung gezogen (Tabelle 3.3).

Probanden, die beim ersten Kontakt mit der Baustelle nur mit Abblendlicht fuhren, waren im Schnitt mit 45 km/h deutlich langsamer, als Probanden, die bei ihrer ersten Runde in der Baustelle zusätzliche Linien eingeblendet bekamen. Diese waren mit rund 60 km/h deutlich näher an der vorgegebenen Richtgeschwindigkeit von 80 km/h. Auch die Lenkbewegung wurde mit zusätzlichen Projektionen von insgesamt 6,37 ° auf 2,02 ° um rund 70% reduziert.

Tabelle 3.3 Ergebnisse der Gruppe 1 mit 32 Teilnehmern: Vergleich von Abblendlicht zu Abblendlicht mit statischen Fahrzeugbreitendarstellungen (AL+ statisch) in der jeweils ersten Runde. Insgesamt fließen in jeden Wert etwa 16 Messergebnisse ein. Statistische Signifikanz ist mit (*) gekennzeichnet. Δ beschreibt die jeweilige numerische Differenz zwischen den zwei Gruppen, % die prozentuale Differenz.

32	ABBLENDLICHT	AL + STATISCH	Δ	%
V	45,15 km/h	59,78 km/h	+15 km/h	+ 32 %*
\sum°	6,37 °	2,02 °	- 4,35 °	- 68 %
V(°)	0,39 °/s	0,29 °/s	- 0,10 °/s	- 26 %

Die Probanden mit Linienprojektionen vor dem Fahrzeug fuhren somit insgesamt mit weniger Lenkbewegungen durch die Baustelle und passierten diese auch schneller. Die Geschwindigkeit der einzelnen getätigten Lenkbewegungen reduzierte sich dabei ebenfalls um 26%. Die im Bereich der Baustelle getätigten Bewegungen geschahen damit also weniger plötzlich als mit reinem Abblendlicht.

Anhand des t-Tests für unabhängige Parameter lässt sich die Verbesserung der Geschwindigkeit in der ersten Runde mit einem Wert von $0,027 < 0,05$ als statistisch signifikant bewerten. Die Effektstärke mit $r = 0,4$ zeigt einen starken Effekt der statischen Linien auf das Fahrverhalten der Probanden in der Baustellensituation im Vergleich zum reinen Abblendlicht.

Betrachtet man die Ergebnisse über die gesamten vier Runden stellt sich ein ähnliches Bild ein (Tabelle 3.4). Die Differenz zwischen den Resultaten mit und ohne zusätzliche Linien ist zwar verringert, nach dem gepaarten t-Test für abhängige Stichproben aber weiterhin signifikant. Die Effektstärke kann mit $r = 0,5$ als stark angesehen werden. So ist die Annäherung der Probanden an die Richtgeschwindigkeit ebenso wie die verringerte Lenkbewegung als signifikant einzuordnen. Auch bei der Lenkgeschwindigkeit ist eine leichte, jedoch nicht signifikante, Verringerung zu beobachten.

Betrachtet man bei dieser Gruppe die Ergebnisse der einzelnen Runden, lässt sich die Annäherung der Ergebnisse genauer erklären: bereits nach der ersten Runde beginnt ein Gewöhnungseffekt bei den Probanden einzusetzen.

Tabelle 3.4 Ergebnisse der Gruppe 1 mit 32 Teilnehmern: Vergleich von Abblendlicht zu Abblendlicht mit statischen Fahrzeugbreitendarstellungen (AL+ statisch) gemittelt über alle vier Runden. Insgesamt fließen in jeden Wert 64 Messergebnisse ein. Statistische Signifikanz ist mit (*) gekennzeichnet. Δ beschreibt die jeweilige numerische Differenz zwischen den zwei Gruppen, % die prozentuale Differenz.

32	ABBLEND- LICHT	AL + STATISCH	Δ	%
V	55,43 km/h	63,71 km/h	+ 8 km/h	+ 15%*
\sum°	4,86 °	3,27 °	- 1,58 °	- 32%*
V(°)	0,36 °/s	0,32 °/s	-0,04 °/s	- 12 %

Der Gewöhnungseffekt ist am Beispiel der Geschwindigkeitsdifferenzen der Probanden in der Baustelle zwischen den einzelnen Runden erkennen (Abbildung 3.33). Zwar steigt die durchschnittliche Geschwindigkeit in der Baustelle mit jeder Runde, die Geschwindigkeitserhöhung ist aber mit jeder Runde weniger ausgeprägt. Es ist davon auszugehen, dass bei einer Erhöhung der Rundenzahlen der Lerneffekt und damit die Erhöhung der Geschwindigkeiten stagnieren und die mittleren Geschwindigkeiten bei Fahrten mit und ohne zusätzliche Linien vergleichbar werden.

Wie in Tabelle 3.5 erkennbar ist die Erhöhung der Geschwindigkeit zwischen zwei Runden abhängig von der Reihenfolge der zur Verfügung stehenden Lichtverteilungen.

Tabelle 3.5 Darstellung des Lerneffekts abhängig von Reihenfolge der Lichtverteilung am Beispiel der durchschnittlichen Geschwindigkeit in der Baustelle.

GESCHWINDIGKEITSÄNDERUNGEN

Vorangegangene Lichtverteilung	AL	AL	Statisch	Statisch
	↓	↓	↓	↓
Folgende Lichtverteilung	AL	Statisch	AL	Statisch
Änderung der Geschwindigkeit in der Baustelle	+ 2,64 km/h	+ 11,42 km/h	+ 0,53 km/h	+ 6,91 km/h

Probanden, die in zwei aufeinanderfolgenden Runden die Baustelle mit Abblendlicht passierten, fuhren in der zweiten Runde im Durchschnitt 3 km/h schneller durch die Baustelle, als in der vorausgegangenen Runde. Bei zwei aufeinanderfolgenden Runden mit statischen Linienprojektionen betrug die Geschwindigkeitserhöhung im Schnitt 7 km/h. Wurde nach einer Runde mit Abblendlicht die projizierte Fahrzeugbreitendarstellung zur Verfügung gestellt, erhöhte sich die Geschwindigkeit sogar um 11 km/h.

Wurde den Probanden nach einer Fahrt mit statischen Linienprojektionen wieder nur Abblendlicht zur Verfügung gestellt, erhöhte sich die Geschwindigkeit zwar noch, allerdings nur um einen geringen Wert (1 km/h).

Diese generelle Steigerung der Geschwindigkeit von Runde zu Runde lässt sich auch in Abbildung 3.33 erkennen: Mit jeder Runde wurde die Geschwindigkeit des Probanden in der Baustelle höher. Die Geschwindigkeitszunahme variierte auch hier in Abhängigkeit von der Reihenfolge der zur Verfügung stehenden Lichtverteilungen.

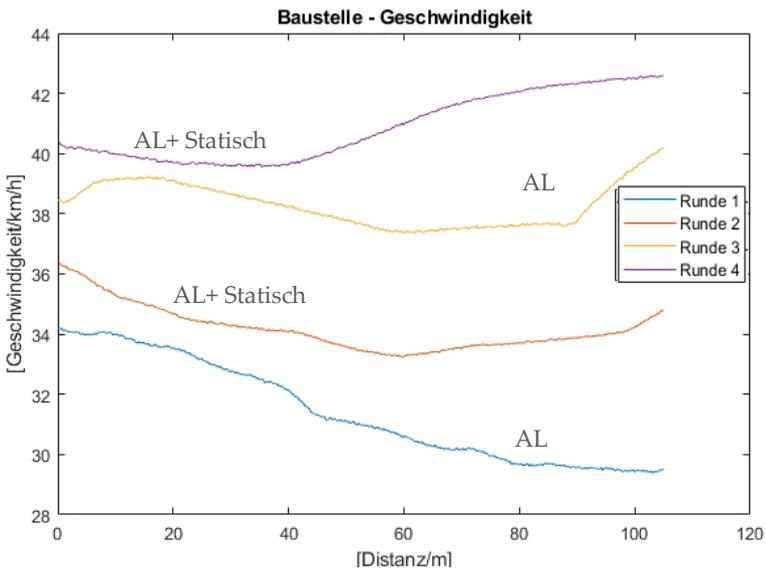


Abbildung 3.33 Geschwindigkeitsverlauf eines Probanden in der Baustellen-Situation ohne (Runde 1 und 3) und mit Linien (Runde 2 und 4).

Der Proband fuhr zunächst mit Ablendlicht in die Baustelle. Die Geschwindigkeit betrug dabei 34 km/h und fiel bis zum Ende der Baustelle stetig ab. In Runde 2 wurden zusätzlich statische Linien eingeblendet. Die Geschwindigkeit erhöhte sich im Schnitt um 2 km/h. Der

Proband fuhr bereits schneller in die Baustellensituation ein und begann, nach kurzer Reduktion der Geschwindigkeit wieder zu beschleunigen (ab 60 m). In der dritten Runde war die Einfahrtgeschwindigkeit, auch ohne Linien noch weiter erhöht, fiel jedoch zunächst ab. Erst kurz vor Ende der Baustelle (nach 95 m) ist eine Geschwindigkeitssteigerung zu erkennen. Auch in der vierten Runde ist eine schnellere Eingangsgeschwindigkeit erkennbar. Mit zugeschalteten Linien beginnt die Beschleunigung, nach kurzem Geschwindigkeitsabfall, bereits nach 40 m der Baustellen-Situation.

Mit der Fahrzeugbreitendarstellung durch projizierte Linien ist vermehrt ein Beschleunigen in der Baustelle nach kurzer Orientierung erkennbar, welche bei Fahrten mit Abblendlicht in der Regel nicht auftritt. Der Fahrer konnte damit die Situation schneller einschätzen und fühlte sich sicher genug, um noch in der Baustelle zu beschleunigen.

Die aufgezeichneten dGPS-Daten zeigen, dass auch die Spurführung durch die zugeschalteten Linien beeinflusst wird. Probanden fuhren mit den Projektionen mittiger in der vorgegebenen Spur als bei Fahrten mit Abblendlicht (Abbildung 3.34). In der dargestellten Aufnahme hatte der Proband in der ersten und vierten Runde lediglich Abblendlicht zur Verfügung. Die Fahrspur ist in diesen Runden weiter rechts orientiert und weicht voneinander ab. In den Runden mit statischen Linien sind die jeweiligen Fahrspuren als überlappend und mittig zwischen den Baken erkennbar. Mit zugeschalteten Projektionen konnte somit das Gefühl des Probanden für die Breite des

Fahrzeugs, auch zur vom Fahrer entfernten Seite (Beifahrerseite), verbessert werden.

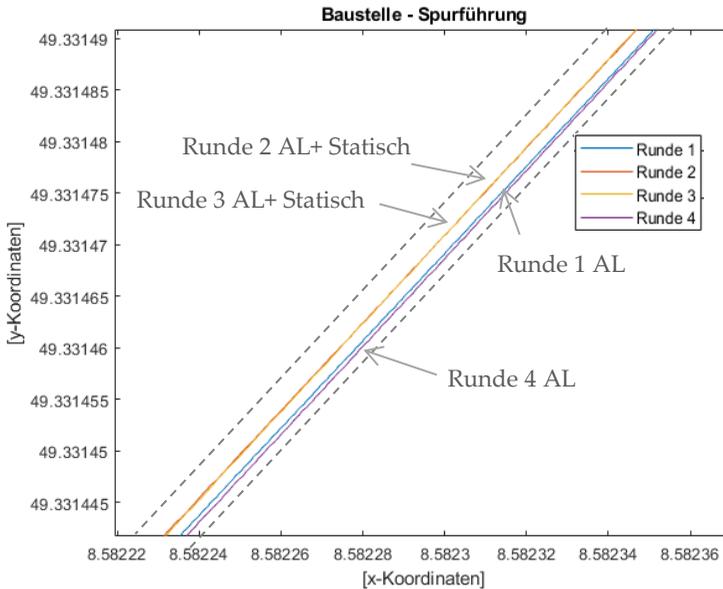


Abbildung 3.34 Ausschnitt der Spurführung eines Probanden in der Baustelle ohne (Runde 1 und 4) und mit statischen Linien (Runde 2 und 3). Die gestrichelte Linie stellt schematisch die befahrbare Spur dar.

GRUPPE 2: ABLENDLICHT ↔ ABLENDLICHT + DYNAMISCHE LINIEN

Der zweiten Probandengruppe wurden insgesamt sechs Probanden zugewiesen (Nach Bestätigung der Ergebnisse der ersten Gruppe sollte mit dieser Gruppe auch der Vorteil von dynamischen Linien zu

Abblendlicht verifiziert werden. Dies konnte anhand der verbesserten Resultate bei der Durchschnittsgeschwindigkeit, bereits nach sechs Probanden bestätigt werden). Im Schnitt erhöhte sich die Geschwindigkeit der Probanden um 18% auf 66 km/h. Anhand des gepaarten t-Tests mit $0,036 < 0,05$ konnte eine statistische Signifikanz des Resultates mit einer hohen Effektstärke von $r = 0,3$ festgestellt werden.

Lenkbewegung und -geschwindigkeit sanken um jeweils 36% bzw. 20%. Hier konnte keine Signifikanz nachgewiesen werden.

In der jeweils ersten Runde betrug der Geschwindigkeitszuwachs mit dynamischen Projektionen 20%, die Summe der Lenkbewegungen sowie die Lenkgeschwindigkeiten verringerten sich jeweils um 45% bzw. 33% mit dynamischen Linien im Vergleich zu Fahrten mit Abblendlicht. Statistische Signifikanz konnte bei diesen Ergebnissen nicht festgestellt werden.

GRUPPE 3: STATISCHE LINIEN ↔ DYNAMISCHE LINIEN

Insgesamt war diese Gruppe, bestehend aus 28 Probanden, mit einer geringeren Gesamtgeschwindigkeit auffällig. Dies lässt sich mit den geänderten Randbedingungen zum Zeitpunkt der Durchführung erklären: Auf der Teststrecke wurden Bauarbeiten durchgeführt, die zwar keinen direkten Einfluss auf die Studie und die Streckenführung hatten, die Probanden durch die anderen Verkehrsteilnehmer jedoch achtsamer fahren. Hier bestätigte sich die Wahl des Within-

Subject-Designs für die vorliegende Studie. Betrachtet man die Differenzen zwischen den Fahrten mit statischen und dynamischen Linien, so spiegeln sich die in dieser Gruppe aufgenommenen Werte in den Einzelmessungen der Gruppen 1 und 2 wieder. Signifikante Unterschiede zwischen Fahrten mit statischen und dynamischen Linien konnten jedoch nicht festgestellt werden.

Die Differenz der Durchschnittsgeschwindigkeit von Fahrten mit statischen Linien und dynamischen Linien betrug 3 km/h. Probanden mit dynamischen Linien waren somit um 7% schneller unterwegs, als Probanden mit statischen Linien. Mit dynamischen Linien verringerte sich die Summe der Lenkbewegungen um 6%, die Lenkgeschwindigkeiten blieben gleich.

Im Verlauf der Studie äußerten die Probanden jedoch häufig, dass die dynamischen Linien eine zu geringe Anzeige-Zeit haben und damit subjektiv einen geringeren Sicherheitsgewinn erzielen, als die statischen Linien.

Auch in der jeweils ersten Runde zeigten die dynamischen Linien tendenziell bessere Resultate als die statischen Linien. Diese Verbesserungen können jedoch auch zufällig sein.

GRUPPE 4: FERNLICHT ↔ ABBLENDLICHT + STATISCHE LINIEN

In der vierten Gruppe wurde das statische Assistenzsystem mit Fernlicht verglichen. In der Gruppe, bestehend auf 5 Probanden, wurden

in randomisierter Reihenfolge Runden mit Fernlicht bzw. mit Abblendlicht und statischen Linien absolviert.

Sowohl bei Geschwindigkeit, als auch bei Lenkbewegungen und –geschwindigkeit schnitten Fahrten mit statischen Linien vergleichbar mit den Fahrten mit Fernlicht ab. Eine leicht reduzierte Geschwindigkeit von 4 km/h bei statischen Linien im Vergleich zu Fernlicht stand geringeren Lenkbewegungen Lenkgeschwindigkeiten der statischen Linien im Vergleich zum Fernlicht gegenüber. Statistische Signifikanz konnte bei den Ergebnissen nicht festgestellt werden.

SUBJEKTIVER FRAGEBOGEN

Nach der Fahrt wurde allen Probanden ein Fragebogen ausgehändigt, in dem sie das Assistenzsystem subjektiv bewerten sollten. Die Antwortmöglichkeiten beschränkten sich hierbei auf „ja“ und „nein“.

In Abbildung 3.35 sind die Ergebnisse dieser Befragung für die Baustelle von insgesamt 82 Probanden aufgeführt. Antworten von Probanden, deren fahrdynamische Daten aufgrund technischer Ausfälle oder ähnlichem nicht gewertet werden konnten, flossen trotzdem in die Auswertung der subjektiven Fragebögen ein.

Insgesamt zeichnet sich eine positive Einstellung der Probanden gegenüber des Engstellenassistenten ab: Auf die Frage, ob sie sich in der Baustellensituation sicherer gefühlt haben, wenn die Linien eingeblendet waren, antworteten 97% der Probanden mit „ja“. Ebenso viele gaben an, dass sie die Funktion verwenden würden, wenn diese

ihnen zur Verfügung stünde und sich beim ersten Erscheinen der Linien nicht erschreckt haben. Keiner der Probanden fühlte sich von der Funktion abgelenkt und alle Probanden angaben, sie Freunden und Kollegen weiterzuempfehlen.

DISKUSSION DER RESULTATE DER BAUSTELLEN-SITUATION

Unabhängig von der Art der Projektion, konnte durch die zusätzlichen Lichtprojektionen eine signifikante Annäherung der durchschnittlichen Geschwindigkeit an die vorgegebene Richtgeschwindigkeit von 80 km/h bei Fahrten durch die sehr eng konzipierte Baustelle beobachtet werden. Die Lenkbewegungen in diesem Abschnitt waren insgesamt geringer und weniger plötzlich. Der Großteil der Probanden gab an, sich mit den Projektionen in der Baustelle sicherer zu fühlen und diese Funktion auch weiter nutzen zu wollen.

Weiterhin erzielten die Linienprojektionen eine führende Funktion: Probanden fuhren im Vergleich zum reinen Abblendlicht zentraler durch die Baustelle. Anhand der Linien war es ihnen möglich, den genauen Abstand des Fahrzeugs zu beiden Seiten der Baustelle zu erkennen und damit mittig zwischen den Baken zu manövrieren.

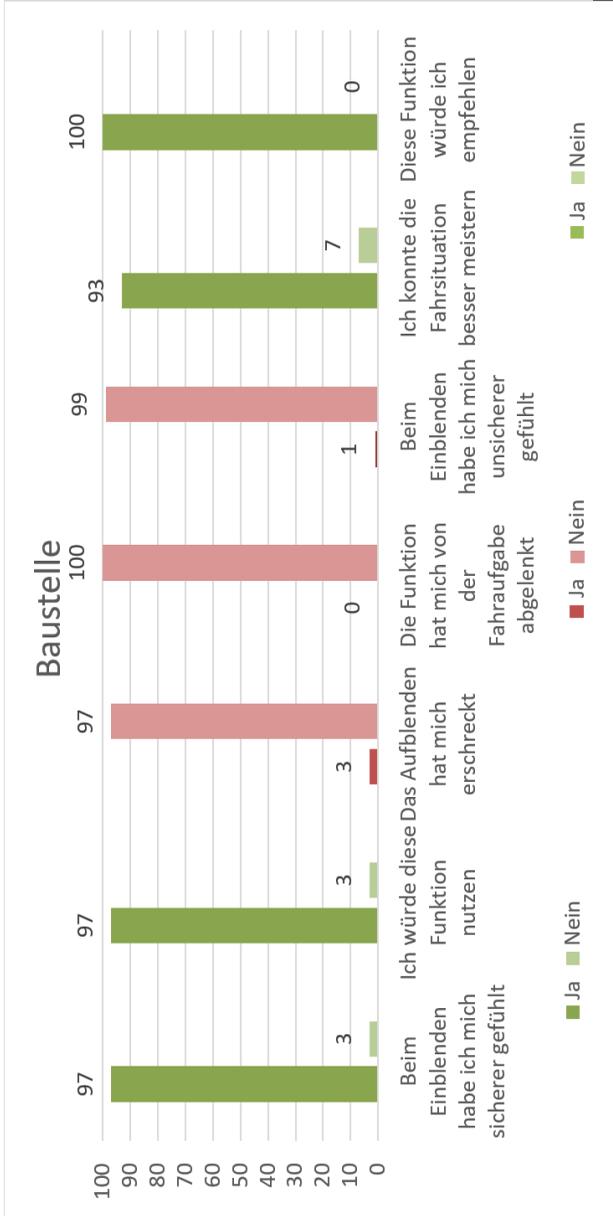


Abbildung 3.35 Antworten der Probanden aus dem subjektiven Fragebogen nach der Probandenstudie. Angaben in Prozent.

Ohne die projizierte Fahrzeugbreitendarstellung waren mehr Lenkbewegungen auf der engen Strecke erkennbar und die Fahrt wurde meist auf den rechten Bereich der Baustelle verlagert. Durch die dezentralisierte Position des Fahrers im Fahrzeug, fiel es den Probanden bei Fahrten mit Abblendlicht schwer, den Abstand zu den Baken links und rechts zum Fahrzeug gleichwertig einzuschätzen.

Sowohl statische als auch dynamische Linien erzielten in der Baustellensituation vielversprechende Resultate. Im direkten Vergleich konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Ausprägungen festgestellt werden. Spontane Äußerungen der Probanden zeigen in der Engstellensituation jedoch eine Bevorzugung der statischen Linien. Bei statischer Anzeige sind die Linien für den Fahrer permanent verfügbar, wohingegen die dynamischen Linien zeitweise nicht sichtbar waren, bevor sie sich erneut aufbauten. Die Probanden empfanden das Verschwinden oft als unangenehm („Blindflug“) und sahen in den statischen Linien einen größeren Mehrwert hinsichtlich der subjektiv empfundenen Sicherheit.

Im Vergleich zum Fernlicht erzielten die Linien vergleichbar positive Ergebnisse. Weder in der ersten Runde noch im Durchschnitt der vier Runden konnten signifikante Unterschiede hinsichtlich Geschwindigkeit und Lenkbewegungen gemessen werden. Damit bieten die projizierten Fahrzeugbreitendarstellungen für den Anwendungsfall einen Mehrwert gegenüber Fernlicht: Fernlicht kann zur Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führen und kann damit in vielen Fällen nicht angewendet werden. P Jahn und C. Neumann[50] konnten bei Untersuchungen zu Lichtfunktionen, die zu den hier beschriebenen

parallelen Linien vergleichbar sind, kein Ablenkpotehtial anderer Verkehrsteilnehmer feststellen. Bei gleichwertigen Messergebnissen der Fahrten mit Fernlicht und der Fahrten mit dem untersuchten Assistenzsystem, kann das Assistenzsystem damit eine häufigere Möglichkeit zur Nutzung (*engl.*: Use Case) aufweisen, ohne andere Verkehrsteilnehmer abzulenken.

Insgesamt decken sich die gemessenen Daten sich mit den subjektiv gegebenen Antworten aus den Fragebögen und den spontanen Äußerungen der Probanden während der Fahrt. In beiden Ausführungen (statisch und dynamisch) sind damit sowohl die objektiven als auch die subjektiven Daten vielversprechend hinsichtlich einer Nutzung im Straßenverkehr.

B. BREMSSEN

Um den Nutzen eines Frühwarnsystems basierend auf Projektionen zu testen, wurden Zeitpunkt beziehungsweise Ort und Intensität des Bremsvorgangs betrachtet. Hierfür wurde festgestellt, an welcher Stelle der Strecke der Proband das Bremsmanöver einleitete, bzw. ab welcher Distanz zum Hindernis eine Geschwindigkeitsreduktion festzustellen war. Die Hindernisse befanden sich je auf einem geraden Streckenabschnitt nach einer Kurve. Deshalb wurde auch gewertet, wenn der Proband die Beschleunigung nach der Kurve einstellte und die Verzögerung passiv von Statten ging (Motorbremsung und Geschwindigkeitsreduktion durch allgemeine Fahrwiderstände).

Weiterhin wurde betrachtet, wie stark der Vorgang der Verzögerung durchgeführt wurde. Dafür wurde die Verzögerung in m/s^2 von dem Einleiten des Bremsvorgangs bis zum Erreichen einer minimalen Geschwindigkeit betrachtet. Beim Erreichen der minimalen Geschwindigkeit entschieden sich die Probanden mehrheitlich dafür, langsam an dem großen Hindernis vorbeizufahren. Ein volles abbremsen auf 0 km/h wurde hier nicht verlangt.

Wie auch bei der Baustelle wurden durchschnittliche Werte aus den vier Runden wie auch Ergebnisse des Erst-Kontakts ausgewertet.

Folgend werden zunächst die Resultate der Gruppe 1 (Vgl. Abblendlicht zu Abblendlicht und statischen Linien) im Detail besprochen. Aufgrund der Analogie der Auswertung der einzelnen Gruppen, werden die Resultate der übrigen drei Gruppen hier nur zusammenfassend erläutert. Details zu den Resultaten der Gruppen 2-4 sind im Anhang (Abschnitt D.2) einsehbar.

GRUPPE 1: ABBLENDLICHT ↔ ABBLENDLICHT + STATISCHE LINIEN

In der ersten Testgruppe wurde ein Vergleich zwischen LED-Abblendlicht und Abblendlicht mit zusätzlich zugeschalteten, zur Fahrtrichtung quer angeordneten, Linien-Projektionen als Frühwarnsystem gezogen (Abbildung 3.32 B).

Wie in Tabelle 3.6 aufgezeigt, reagierten Probanden mit Lichtprojektionen vor dem Fahrzeug bei Erstkontakt im Schnitt 45 m früher als Probanden, die nur Abblendlicht zur Verfügung hatten. Die erhöhte

Reaktionsdistanz ist nach dem t-Test für unabhängige Stichproben mit einer Effektstärke von $r = 0,8$ als stark signifikant einzuordnen.

Zum Zeitpunkt des Bremsens waren die Probanden in der ersten Runde im Schnitt mit 72 km/h unterwegs, wenn sie mit Abblendlicht fuhren. Probanden mit statischen Linien trafen ihre Entscheidung zum Verzögern bei einer Geschwindigkeit von durchschnittlich 66 km/h. Sie hatten zum Zeitpunkt der Reaktion damit bereits eine geringere Geschwindigkeit. Es kann davon ausgegangen werden, dass dies mit den Linien-Projektionen zusammenhängt. Bereits vor der eigentlichen Reaktion findet damit eine geringere Beschleunigung statt.

Tabelle 3.6 Ergebnisse der Gruppe 1 mit 29 Teilnehmern:

Im Vergleich mit Abblendlicht zu Abblendlicht mit statischem Frühwarnsystem („AL + statisch“) in der jeweils ersten Runde. Insgesamt fließen in jeden Wert etwa 15 Messergebnisse ein. Statistische Signifikanz ist mit (*) gekennzeichnet. Δ beschreibt die jeweilige numerische Differenz zwischen den zwei Gruppen, % die prozentuale Differenz.

29	ABBLEND- LICHT	AL + STATISCH	Δ	%
REAKTIONS- DISTANZ	74,57 m	119,94 m	+ 45,37 m	+ 61%*
VERZÖGER- UNG	1,53 m/s ²	1,42 m/s ²	- 0,11 m/s ²	- 7%*

Die Bremswege bei angenommener Normalbremsung betragen bei einer Geschwindigkeit von 72 km/h 55 m bzw. 44 m bei einer Geschwindigkeit von 66 km/h. Die Distanz zum Hindernis zum Zeitpunkt der Reaktion bei Fahrten mit Abblendlicht betrug in der ersten Runde im Durchschnitt 75 m (Abbildung 3.36).

Es blieb somit ein Abstand von 20 m zum Hindernis nach Beenden der Verzögerung. Mit statischen Linien reagierten Probanden etwa 120 m vor dem Hindernis. Zusammen mit den geringeren Geschwindigkeiten konnten sie damit fast 76 m vor dem Hindernis zum Stehen kommen, ohne eine Gefahrenbremsung einleiten zu müssen.

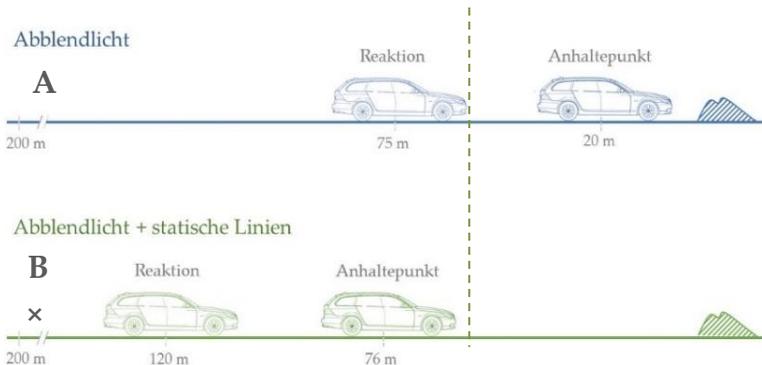


Abbildung 3.36 Schematische Darstellung der Reaktions- und Anhaltepunkte in der ersten Runde bei Fahrt mit Abblendlicht (A) und mit zusätzlichen statischen Linien (B). Im Fall B wird am mit (x) markierten Punkt die Lichtprojektion eingeschaltet. Die eingezeichnete Linie illustriert, dass zum Zeitpunkt der Reaktionsinitiierung mit im Fall A (Abblendlicht) das Fahrzeug im Vergleichsfall B (mit projektionsbasiertem Assistenzsystem) die Reaktion bereits beendet hat.

Die durchschnittliche Reaktionsdistanz in der ersten Runde mit Abblendlicht (75 m) lässt sich mit einer Erwartungshaltung der Probanden erklären, die trotz Versuchsaufbau nicht vollständig eliminiert werden konnte: Aufgrund der Randomisierung der Abfolge der Hindernisse im Versuch war es möglich, dass ein Proband zunächst mehrmals ein Ausweich-Hindernis absolvierte, bevor er das erste Mal in eine Brems-Situation kam. Mit 2 Hindernissen pro Runde, war es im Extremfall möglich, dass die erste Brems-Situation erst in der dritten Runde eintrat. Hinsichtlich des Brems-Hindernisses wurde diese Situation hier dennoch als Erstkontakt gewertet.

Der Proband lässt sich nach den absolvierten Runden (wenn auch ausschließlich mit anderen Hindernissen) nicht mehr als vollständig naiv bezeichnen und kann die Erwartungshaltung hinsichtlich einer Reaktionsbereitschaft aufgebaut haben. Da in der vorliegenden Studie der Unterschied im Fahrverhalten einzelner Probanden unter verschiedenen Bedingungen (Within-Subject-Design) untersucht wurde, wurde bezüglich der möglichen Vorprägung des Probanden durch das jeweils andere Hindernis keine Unterscheidung in der Auswertung vorgenommen. Als Erstkontakt wurde immer der eigentliche Erstkontakt mit dem jeweiligen Hindernis gewertet. Hinsichtlich dieser spezifischen Situation (*hier*: großes Hindernis) und der entsprechenden Reaktion (*hier*: Bremsen) galt der Proband weiterhin naiv und nicht vorgeprägt.

An dieser Stelle ist zudem anzumerken, dass, auch im weiteren Verlauf der Studie, die Anzeige des Frühwarnsystems ab 200 m vor dem

Fahrzeug bei Geschwindigkeiten unter 80 km/h oft als zu früh angegeben wurde. Probanden bremsen früh ab, konnten kein Hindernis erkennen und beschleunigten deshalb wieder, bis das Hindernis vor ihnen erschien und erkannt wurde. Die Gesamtgeschwindigkeit war nach dem Aufleuchten der Projektionen dabei aber verringert und es konnte eine gesteigerte Aufmerksamkeit der Fahrer beobachtet werden (spontane Äußerungen in dieser Situation zeigten, dass die Probanden die Strecke stärker fokussierten um Hinweise für die Ursache des Aufleuchtens der quer zur Fahrbahn ausgerichteten Linien zu finden).

Die gemessenen Verzögerungen reduzierten sich von Abblendlicht zu Abblendlicht mit zugeschalteten Linien in der ersten Runde um 7% auf 1,42 m/s². Die verringerte Verzögerung über die Distanz zwischen Reaktionsbeginn und Ende ist nach dem t-Test für unabhängige Stichproben als signifikant einzuordnen und hat mit $r = 0,7$ einen starken Effekt. Probanden bremsen mit der Frühwarnung nicht nur früher, sondern auch sanfter ab und kamen dennoch früher zum Stehen (bzw. zum Ende der Verzögerung).

Auch unter Berücksichtigung des Lerneffekts war die Reaktionsdistanz zum Hindernis über die vier Runden noch um 29% gegenüber Abblendlicht erhöht, wenn den Probanden zusätzlich statische Linien zur Verfügung standen (Tabelle 3.7). Probanden, die sich dem Hindernis nur mit Abblendlicht näherten, zeigten im Durchschnitt 35 m später eine Verzögerungsreaktion, als im Vergleichsfall mit projektionsbasiertem Fahrerassistenzsystem zur Frühwarnung.

UMSETZUNG

Der Vergleich der Messwerte des Erstkontakts mit dem Brems-Hindernis und der durchschnittlichen Werte aller vier Runden (Tabelle 3.6 und Tabelle 3.7) zeigt: Die Werte zur Reaktionsdistanz mit Abblendlicht vergrößern sich mit zunehmender Rundenzahl. Die geringere Erhöhung der durchschnittlichen Reaktionsdistanzen im Durchschnitt der vier Runden lässt sich mit der erfahrungsbasierten Verbesserung der Reaktionen erklären. Mit jeder Runde reagieren die Probanden früher auf das Hindernis, da sie, basierend auf ihrer Erfahrung, ein Hindernis erwarten.

Tabelle 3.7 Ergebnisse der Gruppe 1 mit 29 Teilnehmern:
Vergleich von Abblendlicht zu Abblendlicht mit statischem Frühwarnsystem („AL+statisch“) über vier Runden. Insgesamt fließen in jeden Wert 58 Messergebnisse ein. Statistische Signifikanz ist mit (*) gekennzeichnet. Δ beschreibt die jeweilige numerische Differenz zwischen den zwei Gruppen, % die prozentuale Differenz.

58	ABBLEND- LICHT	AL + STATISCH	Δ	%
REAKTIONS- DISTANZ	85,01 m	119,92 m	+ 34,91 m	+ 29%*
VERZÖGER- UNG	1,52 m/s ²	1,46 m/s ²	- 0,06 m/s ²	- 4 %

Im Fall der Reaktionsdistanzen mit dem statischen, projektionsbasierten Assistenzsystem sind die Werte im Mittel über die vier Runden vergleichbar mit der durchschnittlichen Reaktionsdistanz bei

Erstkontakt und liegen bei konstant 120 m. Dies entspricht einer Strecke von 80 m nach Einschalten der Funktion. Nimmt man die gemessene Durchschnittsgeschwindigkeit dieser vier Runden zum Zeitpunkt der Reaktion von 70 km/h an, so werden 21 m dieser Strecke während der Reaktionszeit zurückgelegt. Die übrigen 49 m bis zum Einleiten der Reaktion lassen sich mit der zurückgelegten Strecke während der Dauer von Wahrnehmung und Erkennen des Symbols begründen.

Durch die konstanten Werte der Reaktionsdistanzen bei Fahrten mit den statischen Linien lässt sich bestätigen, dass die Probanden die Hindernisse nicht vor Erscheinen der Projektion erkannten oder Reaktionen frühzeitig einleiteten. Wären das Hindernis oder die Projektionsanzeige erwartet worden, so ist davon auszugehen, dass die während der Reaktionszeit zurückgelegten Distanzen reduziert worden wären (Reaktionszeit und damit zurückgelegte Distanz wird durch Erwartung eines Signals reduziert [89]. Dieser Effekt lässt sich anhand der gemessenen Werte hier nicht feststellen.).

Auch die geringe Annäherung der Werte der Reaktionsdistanzen bei Abblendlicht an die Reaktionsdistanzen mit statischen Linien lassen keinen direkten Gewöhnungseffekt an die Situation erkennen. Die Signifikanz der Reaktionsdistanzen wurde anhand des gepaarten t-Tests für abhängige Stichproben bestätigt. Mit $r = 0,7$ lässt sich dieser Effekt als stark klassifizieren.

Die Stärke der Verzögerung verringert sich mit statischen Linien nicht-signifikant um 4% gegenüber den Fahrten mit Abblendlicht.

In Abbildung 3.37 ist beispielhaft die Fahrt eines Probanden mit wechselweise Abblendlicht bzw. Abblendlicht und statischen Linien dargestellt. Wie eingangs erwähnt, sind die Geschwindigkeiten ab 200 m vor dem Hindernis auch bei diesem Probanden in beiden Runden mit statischen Linien (Runde 2 und 4) geringer, als bei den Runden mit Abblendlicht (Runde 1 und 3).

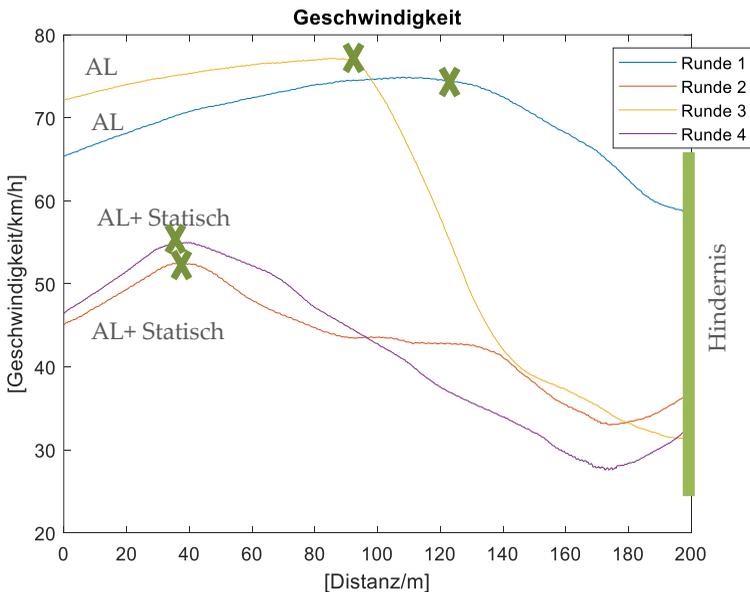


Abbildung 3.37 Geschwindigkeit vor dem Brems-Hindernis am Beispiel eines Probanden mit reinem Abblendlicht (Runde 1 & 3) und mit AL + statischen Linien (Runde 2 & 4). Die Reaktionspunkte sind hier mit „X“ gekennzeichnet.

Die Geschwindigkeitsreduktion tritt mit statischen Linien bei diesem Probanden etwa 40 m nach der Einblendung der Linien auf (160 m Distanz zum Hindernis). Bei Fahrten mit Abblendlicht beträgt die

Distanz zum Hindernis zum Zeitpunkt der Reaktion in der ersten Runde 70 m bzw. 100 m in der dritten Runde. Zwar ist in Runde 3 bei der Fahrt mit reinem Abblendlicht bereits ein Lerneffekt erkennbar, der Proband reagiert allerdings bereits in Runde 2 (und später auch Runde 4) jeweils bereits 160 m vor dem Hindernis, wenn ihm das Frühwarnsystem zur Verfügung steht.

Der Geschwindigkeitsverlauf von Runde 2 zeigt ein Defizit des zu frühen Anzeigens auf: Ohne Erfahrung mit dem Frühwarnsystem verzögert der Proband die Fahrt zunächst nach Erkennen der Projektion. Erhält er zeitnah die positive Bestätigung eines sichtbaren Hindernisses nicht, stagniert die Verzögerung (zum Teil mit beschleunigenden Abschnitten), bis das Hindernis später doch erkannt wird.

Bereits bei zweitem Kontakt mit dem projektionsbasierten Assistenzsystem (Runde 4) reagiert der Proband frühzeitig und verzögert kontinuierlich. Durch die erfolgte positive Bestätigung durch das Hindernis (in Runde 2) entsteht ein schneller Lernprozess des zuvor naiven Probanden.

GRUPPE 2: ABBLENDLICHT ↔ ABBLENDLICHT + DYNAMISCHE LINIEN

Wie auch bei der Baustelle fielen auch hier die Ergebnisse der zweiten Gruppe ähnlich den der ersten Gruppe aus.

Im Vergleich zum Abblendlicht begannen die Probanden hier im Durchschnitt über die vier Runden signifikant früher zu bremsen, wenn sie dynamische Linien als Frühwarnsystem zur Verfügung

hatten (frühere Reaktion um 35 % bei 128 m Abstand zum Hindernis). Auch die Verzögerung an sich war moderater und weniger rasch als bei Fahrten mit Abblendlicht. Die Bremsbeschleunigung verringerte sich signifikant um 51 % auf $0,99 \text{ m/s}^2$. Die Effektstärke ist hier mit $r = 0,4$ (Distanz) bzw. $r = 0,5$ (Verzögerung) als stark anzusehen.

Auch die Geschwindigkeiten bei Initiierung der Reaktion waren geringer, wenn dynamische Linien angezeigt wurden (durchschnittlich 68 km/h mit Abblendlicht, 63 km/h mit dynamischen Linien).

GRUPPE 3: STATISCHE LINIEN ↔ DYNAMISCHE LINIEN

Der Vergleich zwischen statischen und dynamischen Anzeigen bei Reaktionen auf große Hindernisse brachte keine signifikanten Resultate. Mit statischen Linien wurde im Vergleich etwa 2 m früher eine Reaktion eingeleitet, die eine geringere Verzögerung um 9 % bis zur Minimalgeschwindigkeit aufwies (147 m Distanz zum Hindernis mit einer Verzögerung von $0,83 \text{ m/s}^2$ bei statischen Linien im Vergleich zu 145 m Distanz mit einer Verzögerung von $0,90 \text{ m/s}^2$ mit dynamischen Linien).

Aus spontanen Äußerungen der Probanden ließ sich eine mögliche Kombination der Anzeigen erkennen. So sprachen sich einige Versuchsteilnehmer dafür aus, dynamische Linien bei weniger akuten Fällen, statische Linien bei sofortigem Handlungsbedarf anzuwenden. Dynamische Linien wurden hier vorwiegend mit einer Aufforderung zum Reduzieren der Geschwindigkeit assoziiert, statische

Linien mit einer akuten Bremsaufforderung (vergleichbar einer Gefahrenbremsung). Eine Gefahrenbremsung als Reaktion auf eine der Projektionsarten konnte allerdings im gesamten Versuchsverlauf nicht aufgezeichnet werden.

GRUPPE 4: FERNLICHT ↔ ABBLENDLICHT + STATISCHE LINIEN

Auch der Vergleich zwischen Fernlicht und statischen Linien bei der Brems-Szenerie ergab keinen signifikanten Unterschied. Das Fernlicht hatte eine Reichweite von 200 m und bot den Probanden damit die Möglichkeit, die Hindernisse bei dieser Distanz bereits mit bloßem Auge zu erkennen. Dennoch unterschieden sich die Reaktionsdistanzen von Fahrten mit Fernlicht nicht signifikant zu denen mit Abblendlicht und statischen Linien, bei welchen das Hindernis erst ab etwa 80 m erkennbar war.

Tendenziell reagierten Probanden mit dem Frühwarnsystem sogar etwas früher, als bei Fahrten mit Fernlicht. Vor allem in der ersten Runde betrug dieser Effekt eine Distanzerhöhung von 50%.

Auf vier Runden gemittelt war die Reaktionsdistanz mit statischen Linien nur um 4 m (3%) größer, als mit Fernlicht. Der Lerneffekt war hier deutlich stärker ausgeprägt, als bei den anderen Gruppen. Auch die Verzögerung verringerte sich mit statischen Linien um 55% auf 0,59 m/s² im Vergleich zu Fahrten mit Fernlicht.

Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass die Projektionen eine die Aufmerksamkeit lenkende Funktion einnehmen. Dem Fahrer stehen

bei Fahrten mit Fernlicht sehr viele visuelle Informationen zur Verfügung. Die Aufmerksamkeit liegt dann nicht zwangsläufig in den für die Verkehrssituation relevanten Bereichen vor dem Fahrzeug.

Das Aufleuchten einer Lichtprojektion vor dem Fahrzeug, lenkt die Aufmerksamkeit und damit Wahrnehmung des Fahrers in diesen relevanten Bereich. Während der Blick des Fahrers auf die Straße vor ihm gelenkt wird, werden ihm gleichzeitig Informationen zur Situation vermittelt. Die einfachen Symbole können schnell wahrgenommen und erkannt werden. Reaktionen können so früher eingeleitet werden.

SUBJEKTIVER FRAGEBOGEN

Allen Probanden wurde nach der Fahrt, unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit, ein Fragebogen zum subjektiven Empfinden in der Brems-Szenerie mit den Projektionen ausgehändigt. Aus den Fragebögen zeichnete sich ein insgesamt positives Meinungsbild der Probanden ab (Abbildung 3.38). Von den 82 ausgewerteten Antworten wurde in 91% der der Fälle angegeben, dass der Proband diese Funktion im Straßenverkehr gerne nutzen würde.

Negative Aspekte wie Erschrecken, Ablenkung oder Verunsicherung beim ersten Erscheinen der Funktion (in Abb. 3.36 rot markiert) wurden in nur 7%, 11% bzw. 12% erwähnt. Diese Reaktionen bezogen sich auf den ersten Kontakt bei aktiver Fahrt mit den Projektionen und waren bei wiederholtem Erscheinen nicht mehr zu beobachten.

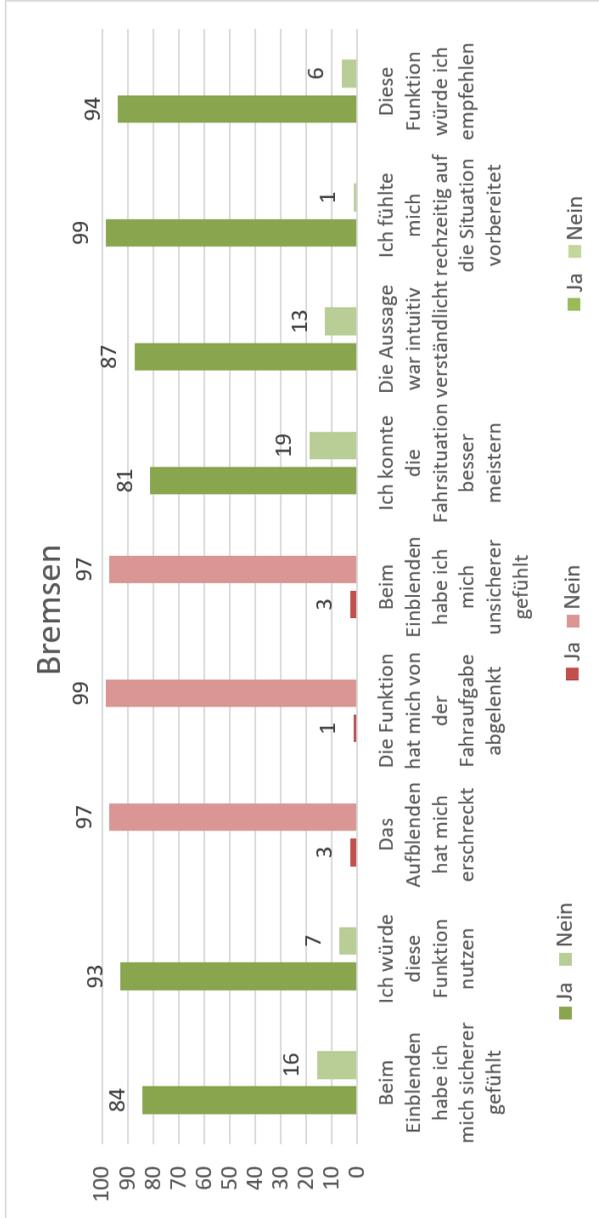


Abbildung 3.38 Antworten von insgesamt 82 Probanden nach der fahrdynamischen Untersuchung zum subjektiv empfundenen Wert des Frühwarnsystems zum Ausweichen über Projektion von schrägen Linien.

Dafür fühlten sich 94% der Probanden durch die Linien auf die Situation rechtzeitig vorbereitet und 87% empfanden die Information der Linien als intuitiv verständlich. Ein Großteil gab an, die Situation mit den Linien besser meistern zu können (78%) und würde diese Funktion anderen Verkehrsteilnehmern, Freunden und Bekannten weiterempfehlen (83%).

DISKUSSION DER RESULTATE DER BREMS-SZENERIE

Bezüglich der Darstellung eines Frühwarnsystems mittels Projektionen auf der Straße zeigen sich die Linien als sehr einfache, gleichermaßen vielversprechende Möglichkeit.

Sowohl subjektive Empfindungen als auch die objektiven Mess-Daten bestätigen den Mehrwert der quer zur Fahrbahn projizierten Linien als lichtbasiertes Assistenzsystem zur Frühwarnung vor Gefahren auf der Strecke. Wenn Probanden statistische bzw. dynamische Linienangezeigt wurden, reagierten sie signifikant früher und mit signifikant geringerer Verzögerung bzw. Reaktionsvehemenz, als wenn sie sich einem Hindernis nur mit Abblendlicht näherten. Ein starker Lerneffekt bezüglich der Bedeutung der Projektion war bereits nach einmaliger, positiver Bestätigung erkennbar. Probanden erkannten intuitiv die Botschaft der Querlinien als Hinweis zur Geschwindigkeitsreduktion und fuhren langsamer. Nach Erkennen der Ursache der Anzeige wurde der Verzögerungsvorgang beim zweiten Kontakt nicht mehr durch erneutes Beschleunigen unterbrochen.

Dieses schnelle Verstehen und Anpassen ist, neben den positiven Antworten aus Fragebögen und spontanen Äußerungen der Probanden während der Fahrt, ein vielversprechender Hinweis auf die spätere Akzeptanz und damit den Nutzen dieses projektionsbasierten Fahrerassistenzsystems.

Ein Unterschied zwischen statischen und dynamischen Darstellungen konnte nicht festgestellt werden. Äußerungen von Probanden zeigen eine mögliche Verwendung beider Varianten in Abhängigkeit von der Dringlichkeit der Reaktion. Ähnlich der Interpretationen aus Abschnitt 3.1 kann eine Abfolge verschiedener Darstellungen gewählt werden. In der Simulator-Studie empfanden Probanden das quer zur Fahrbahn projizierte Rechteck als Aufforderung zum leichten Verzögern, während sie sich von den analogen Linien zu einem stärkeren Bremsen animiert fühlten. Auch die Äußerungen der Probanden in der Feldstudie zeigen eine Abstufung: statische Linien wurden als bestimmender wahrgenommen, als die dynamische Darstellung. In die statischen Linien interpretierten Probanden eine größere Dringlichkeit zur Reaktion, als bei dynamischen Linien.

Die erhobenen, objektiven Daten können diese Tendenz nicht bestätigen. Auch bei den Verzögerungen konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Probanden reagierten mit den statischen Linien zwar etwas früher, aber gleichermaßen auch weniger rasch als mit den Linien in dynamischer Ausführung.

Im Vergleich zu Fernlicht zeigt sich eine gleichwertige Reaktion mit Abblendlicht und statischen Linien. Unter der Voraussetzung, dass

die Linien quer zur Fahrbahn keine größere Ablenkung darstellen, als zur Fahrbahn parallele Linien, ist auch hier die Häufigkeit der Verwendbarkeit im Vergleich zu den Use-Cases des Fernlichts erhöht: Wenn andere Verkehrsteilnehmer nicht abgelenkt oder geblendet werden, kann das System häufiger genutzt werden als Fernlicht.

Da sich beim Zuschalten vom Fernlicht zum Abblendlicht die Lichtintensität im Bereich der Projektion nicht ändert, kann die Funktion auch zusätzlich zum Fernlicht betrieben und genutzt werden.

Im Laufe der Studie konnte eine Aufmerksamkeitslenkung der Probanden durch die Projektionen beobachtet werden. Das Aufleuchten der Linien erregte die Aufmerksamkeit der Fahrer und führte zu einer höheren Aufmerksamkeit im für die Fahrt relevanten Bereich. Die Lenkung der Aufmerksamkeit der Projektion kann bei Verbindung mit Fernlicht mit dem vollen visuellen Umfang an Informationen kombiniert werden, die das Fernlicht bietet. Damit wird der Fahrer auf Hindernisse aufmerksam gemacht und kann diese durch das Fernlicht auch frühzeitig erkennen.

C. AUSWEICHEN

Vergleichbar zur Brems-Szenerie wurde das projektionsbasierte Frühwarnsystem zur Warnung vor kleinen Hindernissen hinsichtlich Zeitpunkt und Art des eingeleiteten Ausweichvorgangs getestet. Hierfür wurde festgestellt, an welcher Stelle der Strecke der Proband das Ausweichmanöver einleitete, bzw., da ein Ausweichen nach

rechts nicht möglich war, ab welcher Distanz zum Hindernis eine zielgerichtete Lenkung nach links festzustellen war. Kleine Lenkbewegungen die nur der Korrektur der Fahrlinie dienten wurden dabei nicht beachtet.

Lenkbewegungen werden abhängig von der Null-Stellung (Geradeaus-Fahrt), in positive Werte (Lenkbewegung links) und negative Werte (Lenkbewegung nach rechts) in Grad angegeben (Abbildung 3.39).

Da die Hindernisse jeweils nach Rechtskurven angebracht waren, wurde das Einleiten eines Ausweich-Manövers ab einem kontinuierlich steigenden Winkel-Wert (kontinuierliche Linkslenkung) nach einem Nullübergang gewertet. Im Sinne der vorliegenden Studie hatten die Probanden nach den Rechtskurven damit eine gerade Ausgangsposition (Null-Stellung) erreicht und lenkten dann zum Ausweichen nach links aus.

Außerdem wurde, wie beim Bremsen, betrachtet wie steil sich die Lenkkurve abbildet. Je stärker und plötzlicher die Lenkbewegung, desto größer die Steigung der gemessenen Kurve, die die Änderung des Lenkwinkels pro Sekunde darstellt.

Als Ausweichvorgang wurde die Lenkkurve bis zum Maximum der abgebildeten Werte betrachtet. Das Sinken zeigte die Absicht an, das Fahrzeug wieder in die neutrale Position zu bringen und war damit ein Hinweis auf das Abschließen des Ausweichvorgangs.

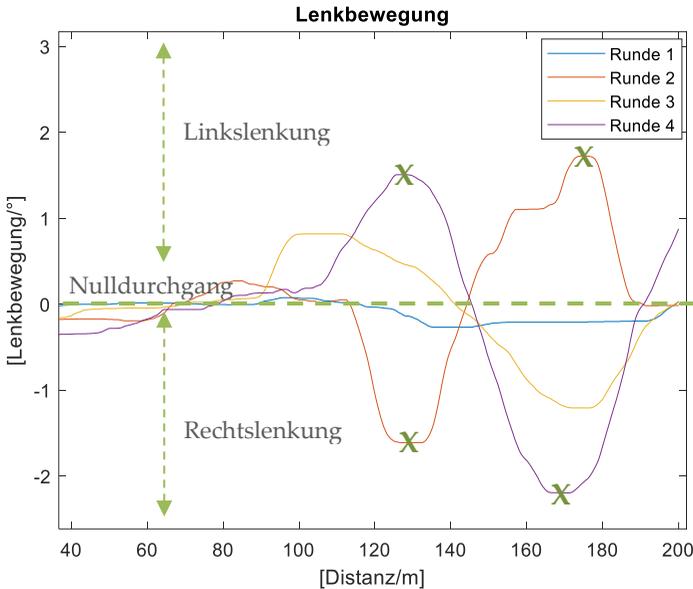


Abbildung 3.39 Beispielhafte Darstellung der Lenkbewegungen an den Hindernissen. Lenkmanöver nach links werden beginnend ab dem Null-Übertritt gewertet. Das Ende eines Ausweich-Manövers nach links (rechts) ist das Maximum (Minimum) der Kurve zu sehen. Die Extrema sind mit X gekennzeichnet.

Wie auch bei den vorangegangenen Situationen wurden durchschnittliche Werte aus 4 Runden wie auch Ergebnisse des Erst-Kontakts ausgewertet. Hier werden zunächst die Resultate der Gruppe 1 im Detail besprochen (Vergleich Abblendlicht zu Abblendlicht und statischen Linien). Die Resultate der Gruppen 2 - 4 werden zusammenfassend erläutert. Details zu diesen Resultaten sind in Anhang (Abschnitt D.2) einsehbar.

GRUPPE 1: ABBLENDLICHT ↔ ABBLENDLICHT + STATISCHE LINIEN

Den insgesamt 27 Probanden der ersten Gruppen standen, in randomisierter Reihenfolge, Abblendlicht bzw. Abblendlicht mit statischen Linien bei Konfrontation mit dem Hindernis zur Verfügung.

Bei Erstkontakt initiierten Probanden mit statischem Frühwarnsystem durchschnittlich 32 m früher ein Ausweichmanöver als Probanden mit Abblendlicht. Die signifikant frühere Reaktion konnte anhand eines t-Tests für unabhängige Variablen mit einer Effektstärke von $r = 0,7$ als stark bestätigt werden.

Abbildung 3.40 zeigt, dass Probanden, die statische Linien als Frühwarnsystem zur Verfügung hatten, im Durchschnitt bereits 98 m vor dem Hindernis ein Ausweichmanöver einleiteten. Probanden, die sich nur mit Abblendlicht dem Hindernis näherten, begannen erst etwa 32 m später nach links auszuweichen.

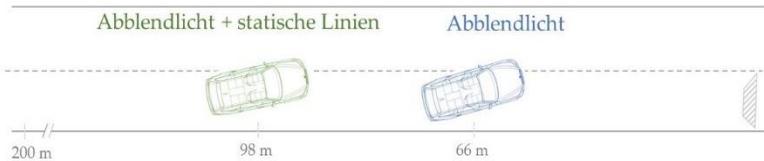


Abbildung 3.40 Reaktionspunkte der Ausweich-Situation mit Abblendlicht (rechts) und bei Abblendlicht und statischen Linien (links).

Wie in Abschnitt 3.2.3.B (Bremsen) erläutert, wurden die Hindernisse in randomisierter Reihenfolge befahren. So konnte auch hier im Extremfall ein Proband zwei Runden auf der Strecke absolvieren, bevor er zum ersten Mal ausweichen statt bremsen musste. In diesem Fall

werden diese Reaktionen weiterhin als Erstkontakt mit der Ausweich-Szenerie gewertet, ohne dass der Proband hinsichtlich Hindernissen auf der Strecke gänzlich naiv war (er konnte bereits erwartete, ein Hindernis auf der Strecke vorzufinden).

Die Resultate von im Durchschnitt 66 m Distanz zum Hindernis bei Beginn des Ausweichens mit Abblendlicht zeigen jedoch, dass die Reaktion auf die Hindernisse nicht vor dem direkten Erkennen des Hindernisses stattfand. Ein präventives Reagieren basierend auf der Erwartung eines Hindernisses kann anhand der vorliegenden Daten nicht identifiziert werden.

Auch nahm die Lenkgeschwindigkeit der Probanden nahm ab, wenn sie durch statische Linien auf das Ausweichen vorbereitet wurden (Tabelle 3.8). Hier konnte keine Signifikanz nachgewiesen werden.

Tabelle 3.8 Ergebnisse der Gruppe 1 mit 27 Teilnehmern: Vergleich von Abblendlicht bzw. Abblendlicht mit statischem Frühwarnsystem („AL + statisch“) in der jeweils ersten Runde. Insgesamt fließen in jeden Wert etwa 13 Messergebnisse ein. Statistische Signifikanz ist mit (*) gekennzeichnet. Δ beschreibt die jeweilige numerische Differenz zwischen den zwei Gruppen, % die prozentuale Differenz.

27	ABBLEND- LICHT	AL + STATISCH	Δ	%
REAKTIONS- DISTANZ ZUM HINDERNIS	66,28 m	98,47 m	+ 32 m	+ 49 %*
LENK- GESCHWIN- DIGKEIT	0,16 °/s	0,13 °/s	- 0,03 °/s	-18 %

Bei der Betrachtung der über vier Runden gemittelten Resultate (Tabelle 3.9) zeigt sich ein ähnliches Bild: Probanden reagieren signifikant früher (29 %, $r = 0,5$), wenn sie durch schräg gestellte Linien auf ein Hindernis auf der Strecke vor ihnen hingewiesen werden, als wenn sie mit Abblendlicht fahren. Im Vergleich zu den Ergebnissen der ersten Runde (Tabelle 3.8) nehmen die Reaktionsdistanzen insgesamt zu. Probanden reagieren früher auf die nach links geneigten Linien, nachdem sie erste Erfahrungen mit ihnen gesammelt haben oder bereits gelernt haben, dass es auf der Strecke Hindernisse gibt, denen sie ausweichen müssen.

Tabelle 3.9 Ergebnisse der Gruppe 1 mit 27 Teilnehmern: im Vergleich mit Abblendlicht zu Abblendlicht mit statischem Frühwarnsystem („AL + statisch“) über vier Runden. Insgesamt fließen in jeden Wert 54 Messergebnisse ein. Statistische Signifikanz ist mit (*) gekennzeichnet. Δ beschreibt die jeweilige numerische Differenz zwischen den zwei Gruppen, % die prozentuale Differenz.

54	ABBLEND- LICHT	AL + STATISCH	Δ	%
REAKTIONS- DISTANZ ZUM HINTERNIS	92,81 m	119,68 m	+ 27 m	29% *
LENK- GESCHWIN- DIGKEIT	0,17 °/s	0,16 °/s	-0,01°/s	-4%

Auch mit Abblendlicht finden diese Reaktionen im Verlauf der Studie früher statt. Das lässt sich ebenfalls auf einen Lerneffekt zurückführen: Probanden wissen um die Existenz der Hindernisse und beginnen vermutlich bereits frühzeitig auszuweichen, da dies zunächst

für beide Hindernisse (Hindernis 1: Bremsen mit späterem, langsamen Ausweichen und Hindernis 2: direktes Ausweichen) als richtige Reaktion erscheint.

Abbildung 3.41 stellt beispielhaft den Rundenverlauf eines Probanden dar, der bei Erstkontakt (Runde 1) statische Linien zusätzlich zum Abblendlicht als Frühwarnsystem zur Verfügung hatte.

Die erste Ausweich-Reaktion findet in dieser Runde bereits kurz nach Aufleuchten der Linien bei 180 m Distanz zum Hindernis (20 m nach Aufleuchten) statt (Abbildung 3.41 A). Ohne positive Bestätigung durch ein reales Hindernis, dem ausgewichen werden muss, reagiert der Proband mit einem Zurücklenken in die Neutralposition.

Anhand des Geschwindigkeitsverlaufs (Abbildung 3.40 B) ist erkennbar, dass die initiale Beschleunigung nach der Kurve hier eingestellt wurde und bis zum Schluss eine konstant niedrige Geschwindigkeit (etwa 56 km/h bei eingangs 67 km/h) gehalten wird, bis das Hindernis bei einer Distanz von etwa 60 m wahrgenommen und erkannt wird.

Auf den Lenkverlauf wirkt sich aus, dass in den Runden 2 und 3 die Hindernisse an anderen Stellen positioniert wurden (Position C in Abbildung 3.27, Abschnitt 3.2.1.D), als in den Runden 1 und 4 (Position B, in Abbildung 3.27, Abschnitt 3.2.1.D). Die deutlich später erkennbare Ausweichbewegung in Runde 2 (Abblendlicht) im Vergleich zu Runde 3 (Abblendlicht + statische Linien) zeigt bei gleichem Streckenverlauf und Position des Hindernisses weiter einen Mehrwert der Projektionen gegenüber reinem Abblendlicht

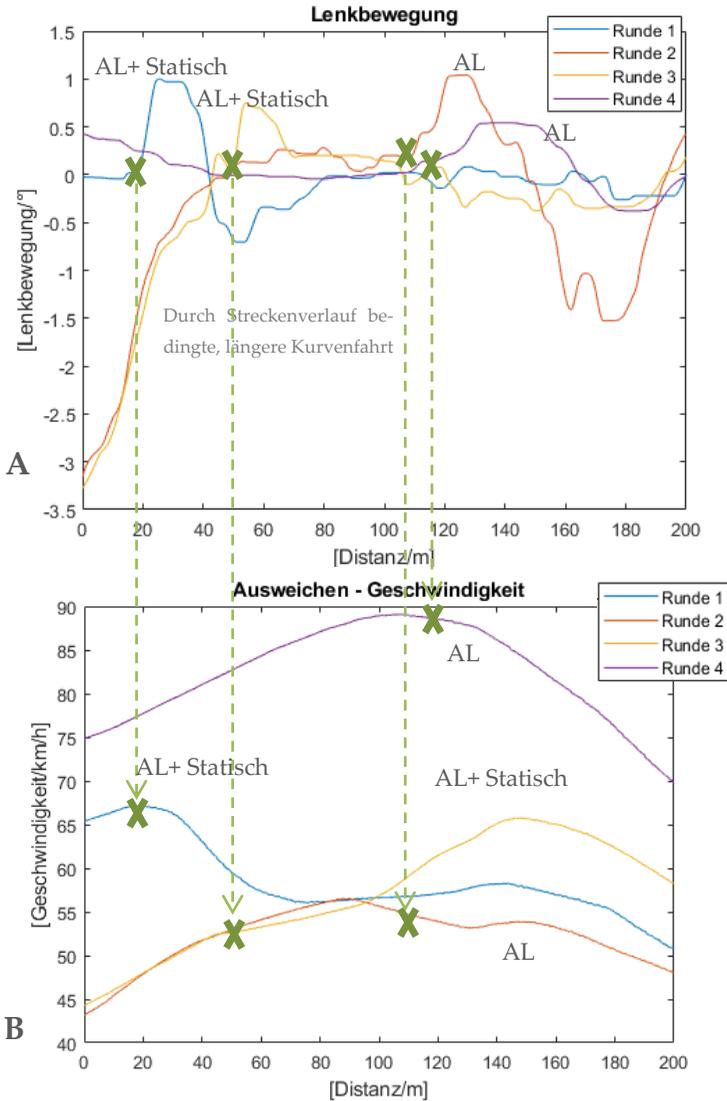


Abbildung 3.41 Lenkbewegungen (A) und Geschwindigkeiten (B) vor dem Ausweich-Hindernis am Beispiel eines Probanden mit statischen Linien (Runde 1 & 3) und ohne (Runde 2&4). Die Reaktionspunkte sind hier mit „X“ gekennzeichnet.

(*hier*: initiales Ausweichen mit Abblendlicht bei 77 m vor dem Hindernis gegenüber Ausweichen ab 150 m Distanz mit zusätzlicher Projektion statischer Linien).

Der direkte Vergleich zwischen der ersten Runde mit statischen Linien zur vierten Runde, in der dem Probanden nur Abblendlicht zur Verfügung stand (beide Hindernisse an der selben Position) zeigt: Trotz Lerneffekt wurde in der vierten Runde erst etwa 70 m vor dem Hindernis das Ausweichen eingeleitet. Nach erstem Kontakt mit der Funktion findet in Runde 3 der zweite Kontakt mit zusätzlichen Linien beim Ausweich-Hindernis statt. Nach dem Ausweichen (etwa 150 m vor dem Hindernis) beschleunigt der Proband zunächst zaghaft, dann, noch vor dem Hindernis, stärker. Der Proband hat gelernt, dass die Darstellung verschwindet, sobald er sich auf der vorgegebenen Fahrspur befindet. Etwa 90 m vor dem Hindernis verstärkt sich die Beschleunigung: Hier hat der Proband in der Ferne das Hindernis bereits erkennen können, nachdem er aufgrund der Projektions-Darstellung und seiner Erfahrung eine Erwartungshaltung aufgebaut hat.

In der vierten Runde steht dem Proband wieder nur Abblendlicht zur Verfügung. Hier ist zunächst eine konstante Beschleunigung zu erkennen. Erst etwa 85 m vor dem Hindernis stagniert die Beschleunigung. An diesem Punkt ist ein Auslenken des Probanden nach links zu erkennen. Bis nach dem Passieren des Hindernisses ist hier keine Beschleunigung mehr festzustellen. Der Proband reduziert seine, eingangs im Vergleich zu den anderen Runden hohe, Geschwindigkeit konstant.

Ein plötzliches Verzögern ist in diesem Beispiel in keiner Runde erkennbar. Die stärkste Bremsverzögerung findet in der ersten Runde (AL + statisch) statt, beträgt aber auf eine zurückgelegte Distanz von 60 m eine Geschwindigkeitsreduktion von etwa 10 km/h und damit eine Verzögerung von 6 m/s². An diesem Streckenabschnitt wären aufgrund trockener, asphaltierter Fahrbahn Verzögerungen von bis 8 m/s² möglich[90]. In den weiteren Runden sind die Verzögerungen, wie in Abbildung 3.41 B erkennbar, geringer

Ein signifikanter Unterschied der Lenkgeschwindigkeiten konnte in dieser Gruppe nicht festgestellt werden.

GRUPPE 2: ABBLENDLICHT ↔ ABBLENDLICHT + DYNAMISCHE LINIEN

In Gruppe 2 wurden Reaktionen auf Abblendlicht Reaktionen auf Abblendlicht mit dynamischen Linien gegenübergestellt. Die Resultate dieser Gruppe sind mit den Resultaten der Gruppe 1 vergleichbar. Im Vergleich zu Fahrten mit reinem Abblendlicht reagierten Probanden innerhalb der vier Runden mit dynamischem Fahrerassistenzsystem um 25% (25 m) früher. Die Lenkgeschwindigkeit reduzierte sich mit dynamischen Linien um Vergleich zum Ausweichen mit Abblendlicht um 54% (0,24 °/s).

Bei Fahrten mit dynamischen Linien konnte bei jeweils erstem Kontakt ebenfalls eine Verringerung der Lenkgeschwindigkeit beobachtet werden. Die Lenkgeschwindigkeit nahm um 50% (0,15 °/s) ab, wenn die dynamischen Projektionen den Probanden anzeigten, dass

sie ein Hindernis auf der eigenen Spur erwartet. Die Reaktionsdistanz zum Hindernis war bei der ersten Begegnung im Durchschnitt jedoch nur um 10 m (17%) größer, als bei Fahrten ohne Frühwarnsystem mit zusätzlichen Linien.

Insgesamt konnte aufgrund der gering ausgefallenen Probandengruppe keine Signifikanz der Resultate festgestellt werden. Angelehnt an die anderen beiden Szenarien (Baustelle und Brems-Szenarie) lässt sich vermuten, dass bei einer größer gewählten Probandengruppe signifikante Ergebnisse erreicht würden.

Auffällig ist hier, dass die dynamische Anzeige in der ersten Runde mit 10 m nur eine sehr geringe Verbesserung der Reaktionsdistanz aufweist und dennoch ein weniger plötzliches Ausweichen ($-0,15 \text{ }^\circ/\text{s}$) unterstützt.

GRUPPE 3: STATISCHE LINIEN ↔ DYNAMISCHE LINIEN

In der Ausweich-Situation konnte, wie auch bei den vorherigen beiden Szenarien kein signifikanter Unterschied zwischen Reaktionen mit statischen und dynamischen Linienprojektionen festgestellt werden. In der jeweils ersten Runde waren eine größere Distanz von 4 m (4%) und eine geringere Lenkgeschwindigkeit um 40% beim Ausweichvorgang mit statischen Linien erkennbar.

Bei der Betrachtung des Mittels über vier Runden verringerte sich dieser Effekt um 2% (2 m frühere Reaktion mit statischen Linien) bzw.

15% (verringerte Lenkgeschwindigkeit um 0,03 °/s). Diese Ergebnisse lassen sich hier insgesamt als zufällig beschreiben.

GRUPPE 4: FERNLICHT – ABBLENDLICHT + STATISCHE LINIEN

Der Vergleich des Frühwarnsystems mit statischen Anzeigen zu Fernlicht erbrachte ebenfalls keine signifikanten Unterschiede. Bei Erstkontakt reagierten Probanden im Schnitt zwar um 54 m früher (66%), lenkten jedoch dabei auch stärker (0,25 °/s bzw. 108% mehr), wenn ihnen statt Fernlicht Abblendlicht mit statischen Linien zur Verfügung stand.

Dieser Effekt ist auch bei der Betrachtung des Mittels der vier Runden gegeben. Hier ist eine Tendenz zur früheren Reaktion mit statischen Linien um 35 m (32%) gegeben. Die Lenkgeschwindigkeit nimmt ebenfalls um 51% (0,08 °/s) zu.

Probanden wurden damit früher auf die Gefahrensituation aufmerksam, reagierten dann allerdings auch plötzlicher. Die Reaktionsdistanz betrug mit statischen Linien im Durchschnitt 112 m zum Hindernis. Damit reagierten die Probanden bereits auf das Hindernis, bevor sie es mit Hilfe des Abblendlichts erkennen konnten.

Bei genauerer Betrachtung ist hier ein Lerneffekt erkennbar: Im Verlauf des Versuchs findet eine Verringerung der Lenkgeschwindigkeiten bei Fahrten mit den statischen Anzeigen und damit eine Annäherung an diejenigen mit Fernlicht (in Runde 2 bereits nur noch eine

Differenz von 0,07 %/s (25%)) statt. Mit zunehmender Rundenzahl lenken Probanden sanfter beim Ausweichen vom Hindernis.

Dabei spielt es auch hier eine Rolle, dass die Linien, unabhängig von der Reisegeschwindigkeit des Probanden, konstant 200 m vor dem Hindernis erschienen: Bei der Reaktionsdistanz mit Fernlicht von 76 m konnten die Probanden das Hindernis im Licht erkennen und selbst einschätzen, wie stark und plötzlich ein Ausweichmanöver eingeleitet werden muss. Bei den statischen Linien war ihnen dies nicht möglich, da zum Zeitpunkt der Anzeige das Hindernis durch das Abblendlicht noch nicht sichtbar war. Sie vertrauten der Anzeige des Systems und wichen zeitnah aus.

Nach der Erfahrung der ersten Runde mit der Erkenntnis, dass bis zum Hindernis noch ausreichend Zeit zum Ausweichen bleibt, nahm die Lenkgeschwindigkeit nach der Anzeige der statischen Linien stetig ab und wurde mit der des Fernlichts vergleichbar. Die Probanden waren auf das Hindernis vorbereitet, damit aufmerksamer und früher reaktionsbreit. Die Distanz der Reaktion hingegen war mit statischen Linien in allen Runden größer, als diejenige bei Fahrten mit Fernlicht. (Abbildung 3.42).

Der unruhige Kurvenverlauf lässt sich mit der geringen Gruppengröße von vier Probanden in dieser Gruppe erklären. Die Ergebnisse sind insgesamt dennoch vielversprechend: Durch eine Kombination von Fernlicht und dem projektionsbasierten Frühwarnsystem können die Vorteile beider Systeme genutzt werden. Die projektionsbasierte Anzeige kann die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die Gefahr

durch ein Hindernis auf der Strecke lenken, welches durch das Fernlicht sichtbar gemacht wird. Der Proband kann dann entscheiden, wie akut ein Ausweichen erforderlich ist.

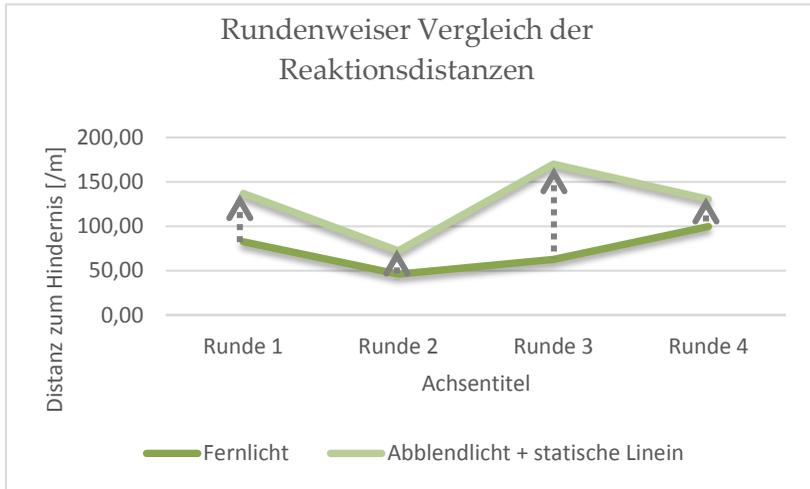


Abbildung 3.42 Vergleich der Reaktionsdistanzen abhängig von der Runde in Gruppe 4: Fernlicht - Abblendlicht + statische Linien.

SUBJEKTIVER FRAGEBOGEN

Aus den Antworten im Fragebogen nach dem fahrdynamischen Teil der Studie lässt sich erkennen, dass auch ein subjektiv empfundener Mehrwehrt des Assistenzsystems bei den Probanden vorhanden ist (Abbildung 3.43). Von den 82 befragten Probanden gaben 93% an, die Funktion zu nutzen, wenn sie ihnen zur Verfügung stünde. Fast alle Probanden (99%) fühlten sich durch das Einblenden der linksgeneigten Linien rechtzeitig auf das Hindernis vorbereitet.

Negative Erfahrungen wie Ablenkung, Erschrecken oder Unsicherheit beim ersten Erscheinen wurden von 99% (Ablenkung) bzw. je 97% (Erschrecken oder Unsicherheit) der Befragten verneint. Diese Reaktionen wurden jedoch nur bei erstem Kontakt mit der Projektion festgestellt und konnten bei der weiteren Fahrt nicht mehr beobachtet werden.

Die Antworten der Probanden, die Erfahrungen mit dem Frühwarnsystem basierend auf Linien-Projektionen sammeln konnten, stellen ein insgesamt positives Meinungsbild dar.

Die Probanden würden diese Funktion mehrheitlich ihren Freunden, Bekannten und Kollegen empfehlen (94%) und die Aussage der Linien wurde von insgesamt 87% der Probanden als intuitiv verständlich angegeben. In den persönlichen Gesprächen und aus den spontanen Äußerungen während der Fahrt geht hervor, dass die Information dieses Symbols nach dem ersten Anwendungsfall mit positiver Bestätigung (Linien erkannt und später Hindernis erkannt), eindeutig verstanden und zugeordnet werden konnte

DISKUSSION DER RESULTATE DER AUSWEICH-SITUATION

Vor allem im Vergleich zum Abblendlicht zeigt das projektionsbasierte Frühwarnsystem mit statischer Ausweich-Anzeige eine signifikante Verbesserung hinsichtlich der Reaktionsdistanz beim Einleiten des Ausweich-Manövers. Probanden wechselten die Spur früher und konnten dem Hindernis so auch früher ausweichen.

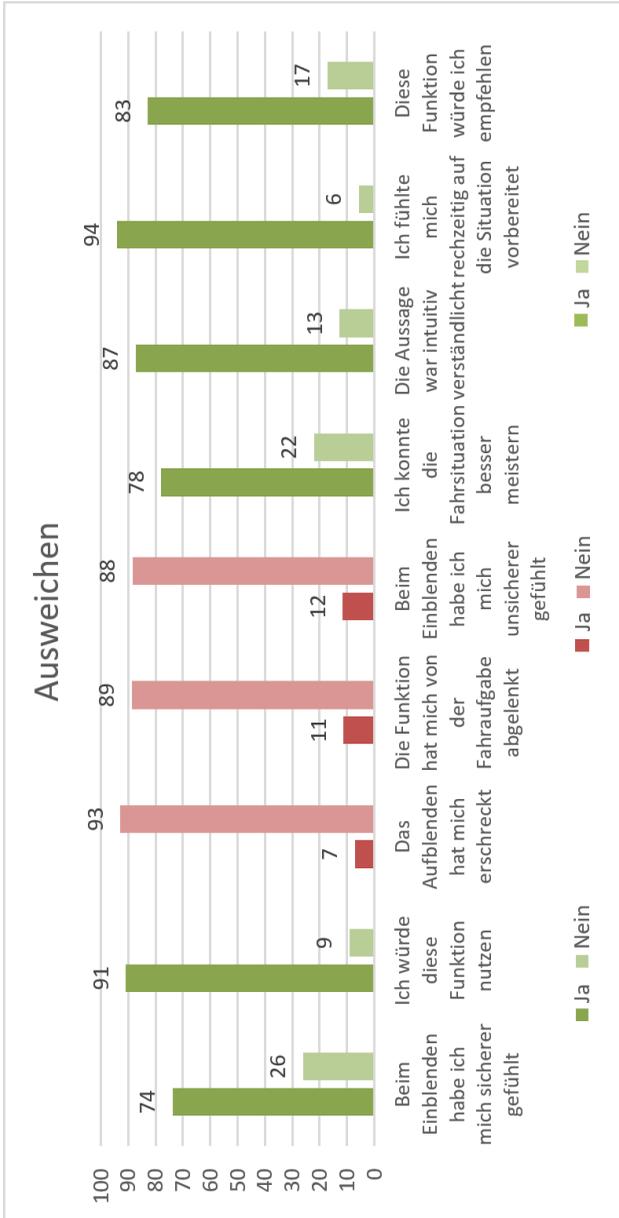


Abbildung 3.43 Antworten von insgesamt 82 Probanden nach der fahrdynamischen Untersuchung zum subjektiv empfundenen Wert des Frühwarnsystems mit quer zur Fahrbahn projizierten Linienzierten Linien.

Die Lenkgeschwindigkeit bzw. Reaktionsvehemenz war in allen Gruppen nicht signifikant unterschiedlich.

Auch in der subjektiven Befragung stellt sich ein insgesamt positives Bild der Projektionen dar. Probanden empfanden die Projektion als hilfreich, vorbereitend und intuitiv verständlich. Bereits (bzw. spätestens) nach einem Kontakt mit den Linien war den Probanden die Information hinter den geneigten Linien klar und verständlich. Das spiegelt sich auch in den objektiv gemessenen Daten wieder: Wurde im Falle des Erstkontakts bei geringer Geschwindigkeit zunächst ausgewichen und nach einigen Metern wieder auf die rechte Spur zurückgelenkt wenn kein Hindernis erkannt wurde, geschah das in den weiteren Runden nicht mehr. Die Probanden erkannten die Funktionsweise der Linien und behielten die Spur bei, bis das Hindernis auf ihrer ursprünglichen Spur passiert wurde.

Es gilt dabei zu beachten, dass der Versuchsaufbau eine ideale Verkehrssituation simulierte. Die Einblendung der Projektionen 200 m vor dem Hindernis musste für eine mögliche Vergleichbarkeit der Resultate konstant gehalten werden.

Spontane Äußerungen („Was ist das? Kommt da jetzt was?“) legen zudem nahe, dass die Probanden ihre Aufmerksamkeit beim Aufleuchten der Linien auf die Straße erhöhten. Die Aufmerksamkeitssteigerung erklärt auch die Resultate der Gruppe 4, in der ein Vergleich zwischen Fernlicht und Abblendlicht mit statischen Linien gezogen wurde. In der ersten Runde waren die Reaktionsdistanzen mit dem Frühwarnsystem mit statischen Anzeigen deutlich erhöht:

Probanden wichen mit den Projektionen 54 m (66%) früheres aus als bei Fahrten mit Fernlicht. Auch über den Gesamtverlauf von vier Runden sind die Reaktionsdistanzen von Fahrten mit Abblendlicht und statischen Linien im Vergleich zu denen mit Fernlicht erhöht (35 m (32%) früheres Ausweichen mit Linien im Vergleich zu Fernlicht).

Obwohl den Probanden mit dem verwendeten Fernlicht auch auf eine Distanz von 200 m die visuelle Information eines Hindernisses auf der Strecke zur Verfügung stand, wurden sie später darauf aufmerksam, als wenn ihnen projizierte Linien vor dem Fahrzeug ein Ausweichen suggerierten. Das frühere Ausweichen fand mit den zusätzlichen Linien auch statt, obwohl die Probanden als Basis-Lichtverteilung nur Abblendlicht zur Verfügung hatten und das Hindernis bei den durchschnittlichen Reaktionsdistanzen (112 m vor dem Hindernis) noch nicht sehen konnten.

Die vorliegende Studie hat das Potential der linksgeneigten Linien als Frühwarnsystem zum Ausweichen bestätigt und gezeigt, dass sie von Probanden intuitiv verstanden und angenommen werden. Probanden reagierten früher auf Hindernisse, ohne dass sie ihren Blick in den Innenraum richten mussten und wurden durch sie, trotz eingeschränkter Sichtweite, früher auf Gefahrensituationen aufmerksam.

3.2.4 DISKUSSION DES KOMMUNIKATIONSERFOLGS IM FELDVERSUCH

Projektionen von parallelen Linien sind in allen getesteten Szenarien ein vielversprechendes Mittel zur Unterstützung und frühzeitigen Warnung des Fahrers. Sowohl die objektiv gemessenen Daten als auch die Antworten im subjektiven Fragebogen, wie auch spontane Äußerungen der Probanden während und nach der Fahrt zeigen ein großes Potential dieser Projektionen für die Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr.

Unabhängig von der Art der Projektion fuhren Probanden im Vergleich zu Fahrten ohne Projektionen im Durchschnitt mit einer Geschwindigkeit durch die Baustelle, die näher an der Richtgeschwindigkeit lag, lenkten dabei weniger, hielten die enge Spur besser (mittiger) und fühlten sich dabei, nach eigenen Angaben, sicherer. Zwischen einer statischen und dynamischen Anzeige der Linien kann kein signifikanter Unterschied in den objektiven Daten festgestellt werden. Subjektive Äußerungen zeigten jedoch eine Bevorzugung der statischen Linien in der Baustelle. Die Resultate der Fahrten mit Abblendlicht und statischen Linien zeigen auch eine gute Vergleichbarkeit zu Fahrten mit Fernlicht. In Anbetracht der möglichen Use-Cases von Fernlicht werden die zusätzlichen Linien mit Abblendlicht als Basis-Lichtverteilung damit besonders interessant. In Situationen, in denen kein Fernlicht nutzbar ist (bspw. bei dichtem Verkehr, vorausfahrenden Fahrzeugen u.W.), können die Lichtprojektionen dem Fahrer assistieren, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu

blenden[50]. Auch ein Zuschalten der Projektionen bei Nutzung von Fernlicht ist technisch denkbar. Der Mehrwert einer gleichzeitigen Nutzung kann bei Bedarf in fortführenden Studien geprüft werden.

Auch in potentiellen Gefahrensituationen, die zum Bremsen oder Ausweichen veranlassen, zeigt sich ein Mehrwert der frühzeitig erscheinenden Linienprojektionen gegenüber Abblendlicht. Unabhängig von der Art der Projektion (statisch oder dynamisch), reagierten Probanden früher auf gegebene Hindernisse. Ein stärkeres Bremsen oder signifikant rascheres Lenken aufgrund der Projektionen konnte in den einzelnen Gruppen beim Vergleich zu Abblendlicht nicht beobachtet werden. Bei der Gegenüberstellung zu Fahrten mit Fernlicht erzielten die Projektionen hinsichtlich Reaktionsvehemenz und -Distanz vergleichbare Resultate. Wie auch bei der Projektion der zur Fahrtrichtung parallelen Linien in der Baustellensituation, haben auch die nach links geneigten Linien und die Linien quer zur Fahrbahn den Vorteil gegenüber Fernlicht, dass sie andere Verkehrsteilnehmer nicht blenden und damit öfter zum Einsatz kommen können. Auch hier ist eine gleichzeitige Nutzung von Fernlicht und Linienprojektionen denkbar.

Durch subjektive Aussagen kann zudem gezeigt werden, dass eine Aufmerksamkeitssteigerung der Probanden in relevanten Situationen vorhanden war. Weiterführende Studien können diesen Umstand bei Bedarf durch Versuche mit Eye-Tracking-Systemen näher untersuchen.

Weiterhin ist es notwendig eine geschwindigkeitsabhängige Einblendung der projizierten Linien in Betracht zu ziehen. Wie in den jeweiligen Diskussionen der einzelnen Szenarien gezeigt(Abschnitt 3.2.3), revidierten die Probanden beim Erstkontakt ihre jeweilige Reaktion (bremsen bzw. ausweichen) zunächst, wenn die Projektionen zu früh erschienen und neigten dazu ohne den Erhalt einer Positiv-Bestätigung wieder zu beschleunigen bzw. zurückzulenken. Um ein solches frühzeitiges Beschleunigen oder Zurücklenken zu verhindern, ist es notwendig, den Zeitpunkt des Aufleuchtens der Projektion an die Reisegeschwindigkeit anzupassen. Fahrer können dann zeitnah erkennen, wodurch die Anzeige der Projektion verursacht wurde.

Auch die Kombination mit anderen Projektionen ist hier denkbar. So können die parallel zur Fahrtrichtung ausgerichteten Linien den Fahrer auf der aktuellen Spur „fixieren“. Nach rechts geneigte Linien könnten eingesetzt werden, um dem Fahrer zu vermitteln, dass ein Zurücklenken auf die ursprüngliche Spur wieder möglich ist.

Im Realverkehr ist zu beachten, dass Signale, die bspw. ein Ausweichen anzeigen nicht abgesetzt werden dürfen, wenn das Ausweichen nicht ohne weitere Gefährdung möglich ist. Eine Option, das umzusetzen ist eine Kopplung mit den Sensoren des Systems zur Warnung vor Fahrzeugen im „Toten Winkel“. Das Fahrzeug detektiert dann nach wie vor Hindernisse in einer Distanz von bis zu 200 m, wird dann allerdings erst im geeigneten Moment (keine Gefährdung von Insassen oder anderen Verkehrsteilnehmern) ein Signal in Form der geneigten Linien projizieren.

Der Erfolg von projektionsbasierten Assistenzsystemen wird von Arbeiten bestätigt, die parallel zu der hier vorliegenden durchgeführt wurden: Durch dynamisch veränderbare Grätendarstellungen gelang es Krahnstöver[48] die Fahrgeschwindigkeit der Probanden zu beeinflussen. In der, nach der Durchführung der Studie 2 veröffentlichten, Studie von Hamm, Huhn und Reschke[49] wurde ebenfalls eine Fahrzeugbreitendarstellung als Assistenzsystem in Engstellen getestet. Dort konnte in Überholsituationen mit den Projektionen ebenso ein verbessertes Sicherheitsempfinden mit weniger Lenkbewegungen und weniger abruptem Bremsen in Baustellensituationen durch zusätzlich projizierte Linien nachgewiesen werden. Durch die Arbeit von Jahn und Neumann[50] werden auch Bedenken hinsichtlich des Ablenkungspotentials solcher Projektionen entkräftet.

Die Forschung in diesem Gebiet kann damit insgesamt bestätigen, dass weitere Untersuchungen hinsichtlich einer seriennahen Umsetzung von derartigen Fahrerassistenzsystemen zweckmäßig und sinnvoll sind. Eine derartige Kommunikation wurde anhand objektiver Daten als erfolgreich bestätigt. Subjektiven Antworten der Probanden zeigten zudem eine Akzeptanz des Probandenkollektivs gegenüber der Anzeige und Nutzung eines solchen Assistenzsystems.

3.3 UMSETZUNG IM SERIENNAHEN PROTOTYPEN IM REALFAHRZEUG

Nachdem die Möglichkeit und das Potential gezeigt wurde mit dem Fahrer während der Fahrt mittels Projektion paralleler Linien zu kommunizieren (Kapitel 3.1) und der Erfolg eines solchen projektionsbasierten Fahrerassistenzsystems im Feldversuch bestätigt wurde (Kapitel 3.2) kann festgehalten werden, dass ein Einsatz von Projektionen einfacher Linien im Straßenverkehr sinnvoll und erstrebenswert sind.

Um aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen realistische Empfehlungen zur Umsetzung und dem Einsatz im Straßenverkehr ableiten zu können, muss zunächst geprüft werden, inwieweit eine Implementierung eines solchen Systems in straßenverkehrstaugliche Fahrzeuge möglich ist. Nach den Studien im Fahrsimulator und im Feldversuch muss für die weitere Untersuchung ein Konzept eines Scheinwerfer-Prototyps erstellt werden, welcher in einem Serienfahrzeug mit Straßenzulassung integriert werden kann. Die Scheinwerfer Prototypen können dann auch auf öffentlichen Straßen getestet und bspw. in Langzeiterprobungen auf Robustheit geprüft werden („automotive-tauglich“).

In diesem Kapitel wird das Vorgehen bei der Konzeption des Prototyps vorgestellt. Dabei werden die Anforderungen an den Prototyp

abgeleitet ebenso wie ein Technologievergleich der zum aktuellen Zeitpunkt vorhandenen Scheinwerfertechnologien durchgeführt. Der Einbau des gewählten Satzes Prototypen-Scheinwerfer in ein Realfahrzeug wird beschrieben und dessen Ansteuerung und die Projektions-Darstellungen auf der Straße werden dargelegt.

3.3.1 KONZEPTION DES PROTOTYPEN

Fahrzeuge die im allgemeinen Straßenverkehr bewegt werden, unterliegen strengen gesetzlichen Anforderungen. Bei einer seriennahen Umsetzung eines lichtbasierten Fahrerassistenzsystems müssen diese Auflagen des Gesetzgebers berücksichtigt werden. Unter anderem daraus ergeben sich Anforderungen an die Technologie, mit der ein solches System umgesetzt werden soll. Diese werden folgend vorgestellt.

Nach Ableitung der technologischen Anforderungen werden die zum Zeitpunkt der Arbeit vorhandene Scheinwerfersysteme vorgestellt und basierend auf den Anforderungen evaluiert um eine Technologieauswahl für die prototypische Umsetzung treffen zu können.

A. ANFORDERUNGEN

Im Gegensatz zu Versuchsträgern, unterliegen Fahrzeuge des allgemeinen Straßenverkehrs hinsichtlich Lebensdauer und Sicherheit strengeren Anforderungen. Zusätzliche Aufbauten wie das Beamer-

Rack (Abbildung 3.24), durch welche die Projektionen in Studie 2 realisiert werden konnten, sind auf öffentlichen Straßen nicht erlaubt.

Auch die Positionen der Lichtquellen, abseits der den bereits vorhandenen, sind hinsichtlich Zulassungsfähigkeit aktuell nicht modifizierbar. Um eine realitäts- und anwendungsnahe Studie zu kreieren, wurden die Anforderungen an einen Prototyp in der Art formuliert, dass dieser sich von heutigen Scheinwerfern hinsichtlich Position und Größe nicht unterscheiden soll. Der im Scheinwerfer vorhandene Bauraum soll genutzt werden, ohne die vom Gesetzgeber geforderten Lichtfunktionen (bspw. Abblendlicht, Fernlicht und Fahrtrichtungsanzeiger) einzuschränken. Dafür muss das zusätzliche Projektionsmodul des Assistenzsystems im vorhandenen Bauraum integrierbar sein.

Weiterhin muss das System im verbauten Zustand in großen Temperaturbereichen nutzbar sein. Beim Anspruch einer weltweiten Nutzungsmöglichkeit müssen auch die regional möglichen Temperaturschwankungen berücksichtigt werden. Aufgrund der weltweit stark unterschiedlichen Klimazonen können diese Schwankungen im Laufe eines Jahres bspw. 27 °C (München) betragen, aber auch Temperaturunterschiede von 49 °C (Irkutsk/Russland)[91]. Scheinwerfer-Hersteller wie Hella haben deshalb einen Temperaturbereich von – 40 °C bis +125 °C als Wirkbereich für ihre Produkte definiert [92]. Die Technologie, wie auch die Gesamtkomponente, müssen in diesem Temperaturbereich fehlerfrei funktionieren können.

Neben Temperaturschwankungen kann das System auch Vibrationen durch unebenen Straßenbelag oder Schotter ausgesetzt sein. Ist das System mechanisch nicht stabil ausgelegt, kann es zu Resonanzen kommen, die das System stark beschädigen. Für eine uneingeschränkte Verwendung im Straßenverkehr muss das gewählte System deshalb robust gegenüber Erschütterungen und Vibrationen sein.

Gleichzeitig gilt die Anforderung einer ausreichenden Flexibilität der Darstellung für eine situationsabhängige Nutzung. Neben unebenen Straßen muss das System auch bei verschiedenen Straßenführungen und kurvenreichen Strecken nutzbar sein. Die Projektionen müssen sich während der Fahrt dem Straßenverlauf anpassen können. Der Anspruch des Systems bleibt, den Blick des Fahrers auf die Straße zu konzentrieren. Ein Versatz der Darstellung auf eine Projektionsfläche außerhalb des Straßenverlaufs kann zur Ablenkung des Fahrers von der Straße weg, hin zur falsch positionierten Projektion, führen. Auch eine geschwindigkeitsabhängige Darstellung (Abschnitt 3.2.4) muss ermöglicht werden. Die genannten Anforderungen sind in Tabelle 3.10 zusammengefasst: Es wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass die im Verlauf der vorliegenden Arbeit bis zu diesem Punkt abgeleiteten Anforderungen erfüllt bleiben.

Unabhängig von einer späteren Nutzung in Serie wird der Prototyp zusätzlich mit einer Möglichkeit der flexiblen Änderung der Projektionsdarstellungen entwickelt. Die Änderung und Bedienung wird dabei über einen Laptop dargestellt.

Tabelle 3.12 Anforderungen an die Technologie des Scheinwerfersystems zur Darstellung von Projektionen als Teil eines Fahrerassistenzsystems.

Mechanische Anforderungen	<ul style="list-style-type: none">• Geringe geometrische Abmessungen zur möglichen Integration im Scheinwerfer• Keine Einschränkungen vorhandener Lichtfunktionen
Umweltbedingte Anforderungen	<ul style="list-style-type: none">• Robust gegenüber Vibrationen• Robust gegenüber Temperaturschwankungen
Funktionale Anforderungen	<ul style="list-style-type: none">• Erzeugen eines ausreichend großen Positivkontrasts zu Abblendlicht (2:1)• Projektion an Straßenverlauf adaptierbar• Flexibel gegenüber Reisegeschwindigkeit

B. TECHNOLOGIEBEWERTUNG

Neben den bereits in Serie verwendeten Lichtsystemen (Abschnitt 2.2.1), wurde zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit von verschiedenen Herstellern (bspw Hella[92], AL[93], ZKW[61] und Valeo[62]) auch an verschiedenen weiterführenden Systemen zur Erzeugung von Lichtverteilungen auf der Straße gearbeitet. Systeme, welche die in Kapitel 3.2 getesteten Linien darstellen können und gleichzeitig einen so geringen Bauraum benötigen, dass sie in einen Kfz-Scheinwerfer integriert werden können sind: LED-Matrix-Systeme, Digital Mirror Devices (*kurz*: DMD), scannende Lasersysteme und Systeme auf Flüssigkristall-Basis (*engl.*: Liquid Cristal Display, *kurz*: LCD). Alle diese Technologien haben das Potential, die für Kraftfahrzeuge geforderten Lichtwerte für Scheinwerfer[68] zu erreichen.

Diese Systeme sollen im Folgenden näher betrachtet und anhand der oben definierten Anforderungen evaluiert werden.

LED-MATRIXANWENDUNGEN

LED-Matrix-Systeme finden im Kfz-Bereich immer häufiger Verwendung. Mit dieser Technologie kann eine maximale Ausleuchtung der Umgebung bei minimaler Blendung anderer Verkehrsteilnehmer wie

auch verringerter Eigenblendung durch Reflektion über Verkehrszeichen generiert werden. Dabei wird die Lichtverteilung in Abhängigkeit von der Pixelgröße in verschiedene Bereiche aufgeteilt (Abbildung 3.44). Jeder Bereich wird durch ein Pixel, bzw. einen LED-Chip dargestellt, der voll eingeschaltet oder gedimmt werden kann. Durch Pulsweitenmodulation kann die Beleuchtungsstärke auf der Straße der einzelnen Bereiche, bzw. der Lichtstrom der einzelnen LED-Chips angepasst werden. Mit steigender Anzahl einzeln ansteuerbarer LED-Chips können diese Bereiche kleiner gestaltet und damit die Ausleuchtung feiner ausgeführt werden (Abbildung 3.44, B [94])

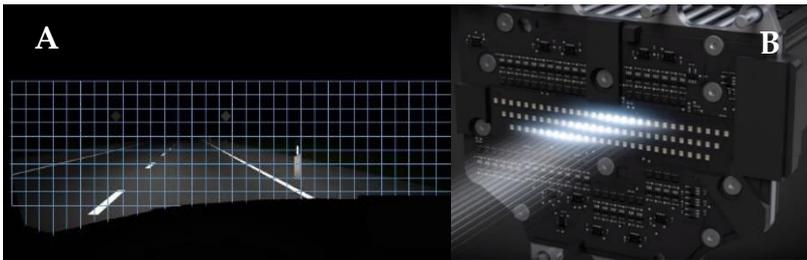


Abbildung 3.44 Mögliche Auflösung einer Matrix-Licht-Verteilung bei gleichmäßiger Verteilung des LEDs (A) und Ansicht auf ein LED-Panel mit 84 einzeln ansteuerbaren LEDs (MB E-Klasse (Baujahr 2016). *Quelle:* YouTube: Mercedes Benz Deutschland)

Aktuell sind Voll-LED-Scheinwerfer mit bis zu 128 frei ansteuerbaren LEDs pro Scheinwerfer auf dem Markt (VW Touareg 2018 [95]) Hier wird das Abblendlicht durch 48 LEDs und das Fernlicht durch weitere 27 LEDs dargestellt.

Neben Voll-LED-Scheinwerfern existieren auch Hybrid-Lösungen, die nur eine geringe Auflösung im Bereich des Abblendlichts, aber

eine hohe Auflösung im Bereich des Fernlichts ermöglichen. Damit werden mit vergleichsweise geringem Aufwand die Bereiche ausgeleuchtet, die bei Fahrten in der Dunkelheit vorgeschrieben sind (R123r2e, Annex 3[68]). Bereiche, die andere Verkehrsteilnehmer potentiell stören können (Fernlichtbereich über der die Horizontale beschreibenden H-H-Linie in R123r2e, Annex 3), werden jedoch variabel ausgelegt.

Bei diesen diskreten LEDs besteht die Schwierigkeit der Erzeugung einer kontinuierlichen Lichtverteilung durch die einzelnen, aufeinander abzustimmenden LEDs [96]. Damit werden nicht nur homogene Abblendlichtverteilungen, sondern auch Projektionen in diesen Lichtverteilungen schwierig realisierbar. Bei einer Auflösung von aktuell $1\text{-}2^\circ$ der segmentierten LED-Scheinwerfer ist eine präzise Darstellung eines positiv kontrastierten Symbols in den relevanten Entfernungen von 20-60 m vor dem Fahrzeug nicht möglich.

Eine Erweiterung der Matrix-LED-Technologie ist eine weitere Verkleinerung der LED-Chips um durch eine sog. μ -Strukturierung 1024 Pixel auf geringstem Bauraum zu realisieren[97]. Hier kann, laut Hersteller, eine Auflösung von bis zu $0,25^\circ$ (horizontal und vertikal) erzielt werden (Abbildung 3.45[98]). Zusätzliche Lichtprojektionen sind damit bei dieser Technologie ebenfalls denkbar. Einfache, gerade Linien können durch die hohe Auflösung genauso dargestellt werden, wie auch gebogene Linien für Fahrten in Kurven.

Die Technologie mit μ -strukturierten LEDs war zum Zeitpunkt der Technologiewahl der vorliegenden Arbeit allerdings noch kaum

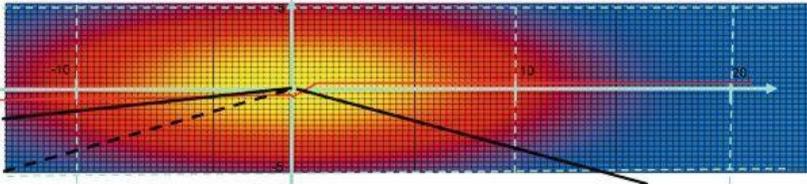


Abbildung 3.45 Mögliche Auflösung einer Lichtverteilung bei Einsatz von insgesamt vier Eviyos-Hybrid-Chip (je einem für Abblend- und Fernlicht pro Scheinwerfer).
Bild: Osram Opto Semiconductors

kommuniziert und wenig zu deren Funktionalität und Lebensdauer bekannt. Aktuell ist diese Anwendung nur in Prototypen vorhanden und erzeugt hohe Systemkosten. Hinsichtlich Zuverlässigkeit und Farbgenauigkeit wird auch hier noch geforscht[98].

DIGITALE MIKROSPIEGEL

Eine weitere Möglichkeit hochauflösende Lichtverteilungen zu erzeugen basiert auf sogenannten „digitalen“ Mikrospiegeln (*engl:* digital mirror devices, *kurz:* DMD, Abbildung 3.44[99]) Bei dieser Technologie werden kleine Spiegel durch eine (LED-)Lichtquelle bestrahlt. Die Spiegel können in zwei Positionen („digital“: 0 und 1) ausgerichtet werden. Position „0“ wird eingenommen, wenn das Pixel, welches durch den Spiegel dargestellt wird, auf der Projektionsfläche nicht gebraucht wird (Abbildung 3.46 A). Der Spiegel dabei so verkippt, dass das von der Lampe reflektierte Licht auf einen Absorber im System trifft und der Lichtstrahl somit nicht aus dem bilderzeugenden System tritt. Eine solche, sog. subtraktive Technologie

kann bei hohem Lichtanteil, der in den Absorber geleitet wird, nur vergleichsweise geringe Energieeffizienten erzielen.

Wird Licht im Bereich des Pixels, welches der einzelne Spiegel darstellt, benötigt so wird dieser auf Position „1“ gestellt (Abbildung 3.46 B). Der Lichtstrahl der Lichtquelle wird dann über den Spiegel in ein

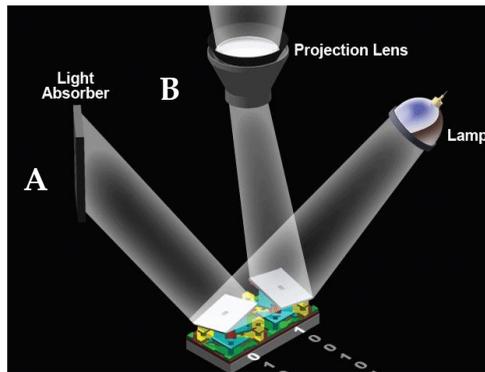


Abbildung 3.46 Funktionsweise eines DMD-Moduls. *Bild: Texas Instruments.*

Projektionssystem mit Linse reflektiert. Durch die Linse werden die Lichtstrahlen aller benötigten Spiegel gesammelt und das so entstehende Bild bzw. die Lichtverteilung vor das Modul projiziert.

Ähnlich zur Matrix-LED-Anwendung hängt die Auflösung des Bildes bei DMD-Systemen von der Anzahl aber auch von der Größe der einzelnen Spiegel ab.

Erste Prototypen sind zum Zeitpunkt der Entstehung der Arbeit im Automobil-Bereich bekannt. Aufgrund der Kipp-Mechanik in den Spiegeln gilt es noch die Stabilität gegenüber Erschütterungen und Vibrationen im Fahrbetrieb zu prüfen. Aus dem Nutzungsbereich in

Projektionen für Haushalt und Film ist bereits die Möglichkeit der Reduktion des Systems auf einen kleinen Bauraum bekannt. Der Einbau in einen Serien-Scheinwerfer eines zulassungsfähigen Fahrzeugs ist zu prüfen.

LASERSCANNER

Neben der Möglichkeit viele kleine Spiegel in zwei Möglichen Zuständen zur Darstellung verschiedener Lichtverteilungen zu nutzen, kann auch eine geringere Anzahl an Spiegel mit höheren Freiheitsgraden genutzt werden. Hierfür muss die Lichtquelle gebündelter sein, als die bei DMDs genutzten LEDs. Besonders eignet sich hierfür das kohärente Licht eines Lasers.



Abbildung 3.47 Darstellung eines scannenden Laserprojektionsmoduls in eindimensionaler Ausführung. *Bild:* Scanlab

Ähnlich dem Funktionsprinzip einer Braun'schen Röhre wird das Licht des Lasers auf das Mikro-Elektromechanische System (*englisch:* Micro-Electro-Mechanical System, *kurz:* MEMS) geleitet. Durch das Scanmodul (Abbildung 3.47 [100]) kann, abhängig von der Neigung

des Spiegels, das Licht dann auf eine beliebige Position im Bildbereich des Systems reflektiert werden. Im Gegensatz zum DMD-System kann der Spiegel in einer Dimension (in komplexeren Systemen auch in zwei Dimensionen) beinahe stufenlos bewegt werden. Durch die hochfrequente Bewegung des Spiegels und damit des Lichtpunktes auf der Projektionsfläche entsteht damit ein Bild.

Auch Abstufungen der Helligkeit können in diesem System gut realisiert werden. Abhängig von der Verweildauer des Spiegels in einer Position ändert sich die Leuchtdichte am entsprechenden Projektionspunkt. Bei längerer Verweildauer erscheint der Punkt heller, bei kürzerer Verweildauer weniger hell. Durch Anpassung des Öffnungswinkels kann zudem die Reichweite der Lichtverteilung angepasst werden. Bei kleineren Öffnungswinkeln werden Intensität und Reichweite erhöht, wird der Öffnungswinkel verbreitert, wird auch die Lichtverteilung breiter und weniger intensiv[101]. Hierbei wird ein Großteil des auf den Spiegel gelenkten Lichts auch weiter auf die Projektionsfläche gelenkt. Im Vergleich zum DMD-System ist eine höhere Energieeffizienz, unabhängig der Darstellung, erreichbar.

Wie auch die DMD-Technologie sind erste Projektoren basierend auf Laser-Scanner-Technologie im Heimkino-Bereich vorhanden (bspw. Acer VL7860 [102]). Das System ist aus Sicht des Bauraums insgesamt meist etwas schmaler, als vergleichbare DMD-Anwendungen, da die große Projektionsfläche nicht durch eine Vielzahl und damit breite Verteilung an Spiegeln realisiert werden muss. Der Laser als Lichtquelle benötigt hingegen einen größeren Bauraum als die LEDs des DMD.

Betrachtet man eine zweidimensionale Anwendung (ein Spiegel kann sowohl in x - als auch y -Richtung verstellt werden), erhöht sich mit dem höheren Freiheitsgrad des einzelnen Spiegels auch die Anfälligkeit dieses Systems hinsichtlich Erschütterungen. Auch bezüglich der Konsequenzen des Ausfalls eines Spiegels ist das scannende System empfindlicher als das DMD-System mit einer Vielzahl an Spiegeln. Erste Prototypen sind auch von diesem System im Angebot[61]. Langzeittests hinsichtlich der Nutzung im Automobilbereich sind noch nicht bekannt.

LCD

Eine weitere bildgebende Technologie, die bereits im Heimkino-Bereich bekannt ist, ist die Darstellung durch auf Flüssigkristallen basierende Bildschirme (*englisch*: liquid crystal displays, *kurz*: LCD). Wie bei den LED-Matrix-Anwendungen dient eine Reihe LEDs als Lichtquelle. Das Licht wird, um spätere, polarisationsabhängige Verluste zu vermeiden, abhängig von dessen Polarisationsrichtung aufgeteilt und auf verschiedene Bereiche einer Flüssigkristall-Fläche reflektiert (Abbildung 3.48 [60]).

Die nematische Struktur der Moleküle führt zu nur geringen zwischenmolekularen Kräften im Gesamtsystem, welche bspw. durch Anlegen eines elektrischen Feldes beeinflusst werden können. Die Änderung der Ausrichtung der Moleküle führt dann zur Änderung der optischen Eigenschaften des Systems. Ähnlich einem MEMS-

System kann durch zuschalten einer elektrischen Spannung damit punktuell die Transparenz gegenüber Lichtstrahlen gesteuert werden [103]. Durch einen weiteren Polfilter gelangen die Lichtstrahlen entsprechender Polarisierung in eine Sammellinse, durch welche die Bilddarstellungen aus dem Modul auf die Projektionsfläche gelangen.

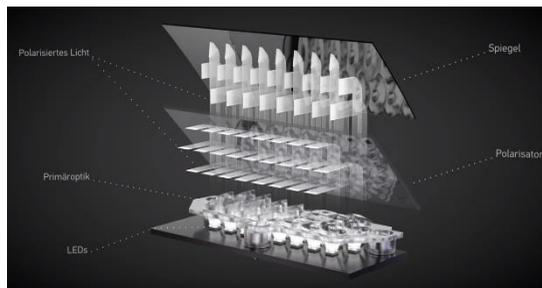


Abbildung 3.48 Schematische Darstellung der Lichtleitung vor einem LCD-Modul.
Bild: Hella

Zum Zeitpunkt der Entstehung der vorliegenden Arbeit war diese Technologie für die Automobilanwendung noch kaum ausgereift und getestet. Erste Prototypen wurden ab Mitte 2017 vorgestellt[104] [105] Für eine Umsetzung in Serie waren noch viele Faktoren unbekannt. Erste Umsetzungen sind aktuell für das Jahr 2020 kommuniziert[106].

C. TECHNOLOGIEVERGLEICH UND -AUSWAHL

Zum Zeitpunkt der Wahl der Technologie waren von den oben genannten Technologien einige besser erforscht, wie bspw. die Matrix-LED-Technologie und die DMD-Systeme, andere waren weniger präsent wie bspw. der Laserscanner und Scheinwerfer auf LCD-Basis. Die im vorigen Abschnitt bewerteten Technologien werden in Tabelle 3.11 hinsichtlich der in Abschnitt 3.3.1 A abgeleiteten Anforderungen verglichen.

Tabelle 3.16 Vergleich der bewerteten Technologien. Die mit ✓ gekennzeichneten Anforderungen sind erfüllt. ✖ zeigt auf, dass die entsprechende Anforderung von der Technologie nicht erfüllt werden kann. Die mit „?“ gekennzeichneten Felder zeigen noch weiteren Forschungsbedarf im jeweiligen Gebiet auf.

	Mechanische Anforderungen	Umweltbedingte Anforderungen	Funktionale Anforderungen
LED-Matrix	✓	✓	✖
DMD	✓	✓	✓
Laserscanner	?	?	✓
Hybrid	?	?	✓

Um das projektionsbasierte Assistenzsystem in einem seriennahen Prototyp umzusetzen, wurde eine Technologie ausgewählt, die das größte Potential einer zeitnahen Serienumsetzung barg. Die Matrix-

LED-Anwendungen sind und waren bereits im Straßenverkehr präsent. Die bekannten Systeme wiesen hierbei jedoch eine vergleichbar geringe Auflösung mit der Schwierigkeit der Erzeugung einer homogenen Lichtverteilung durch die diskreten LEDs auf.

Scannende Systeme und LCD-Scheinwerfer waren nur begrenzt bekannt und kaum hinsichtlich Lebensdauer in automobiler Anwendung untersucht. Lediglich die Umsetzung eines projizierenden Scheinwerfers mittels DMD-Technologie erwies sich als vielversprechend hinsichtlich Umsetzbarkeit und Detailgenauigkeit der Projektionen bei gleichzeitiger Chance zur zeitnahen Umsetzung in Serie.

3.3.2 DER PROTOTYP

Für eine platz- und kostenoptimierte Realisierung wurde eine Hybrid-Lösung aus Basis-Lichtfunktionen (Abblendlicht, Fernlicht, Fahrtrichtungsanzeiger und Tagfahrlicht) mittels LED und eine Projektionsdarstellung über ein zusätzliches DMD-Modul entwickelt. Als Versuchsträger wurde ein BMW 7er (G12) gewählt. Dieses Fahrzeug war zu dem Zeitpunkt bereits mit Voll-LED-Scheinwerfern ausgestattet und bot die Möglichkeit, durch Anpassung der Basis-Lichtfunktionen, freien Bauraum für ein weiteres Licht-Modul zu generieren. Die Entwicklung des Prototyps fand in Zusammenarbeit mit der ZKW Group statt. Als aktueller Lieferant der Scheinwerfer des G12 konnte hier auf eine starke gemeinsame Wissensbasis zurückgegriffen werden.

Als DMD-Modul wurde der ebenfalls von ZKW entwickelte „Digital Light Prozessor“ der zweiten Generation (DLP Gen.2, Abbildung 3.49 [107]) verwendet.

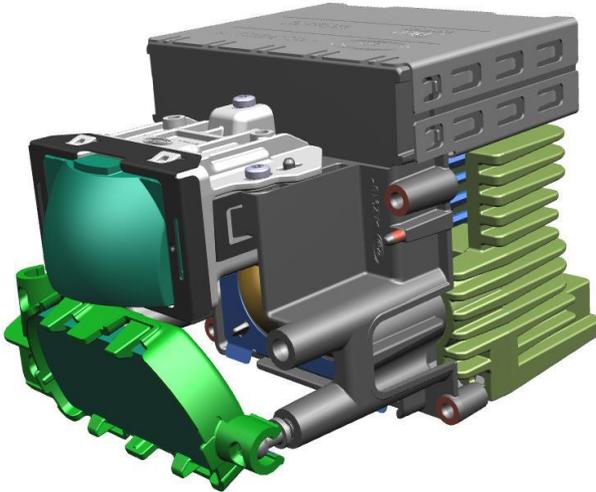


Abbildung 3.49 CAD-Darstellung eines DMD-Moduls von ZKW welches spiegel-symmetrisch je Scheinwerfer verbaut wird.

Zusätzlich zu den Basis-Lichtverteilungen des LED-Hauptscheinwerfers kann dieses Modul eine Bildbreite von horizontal $\pm 7^\circ$ und vertikal $+3^\circ$ bzw. -4° abbilden.

Die Einbauposition wurde in der jeweils an Stelle der inneren Ikone beider G12-Scheinwerfer gewählt, nachdem Abblend- und Fernlicht in der äußeren Ikone zusammengelegt werden konnten (Abbildung 3.50 [107]). Im Vergleich zum Abblendlicht-Modul des ursprünglichen Scheinwerfers benötigt das hier verwendete DMD-Modul einen größeren Bauraum.

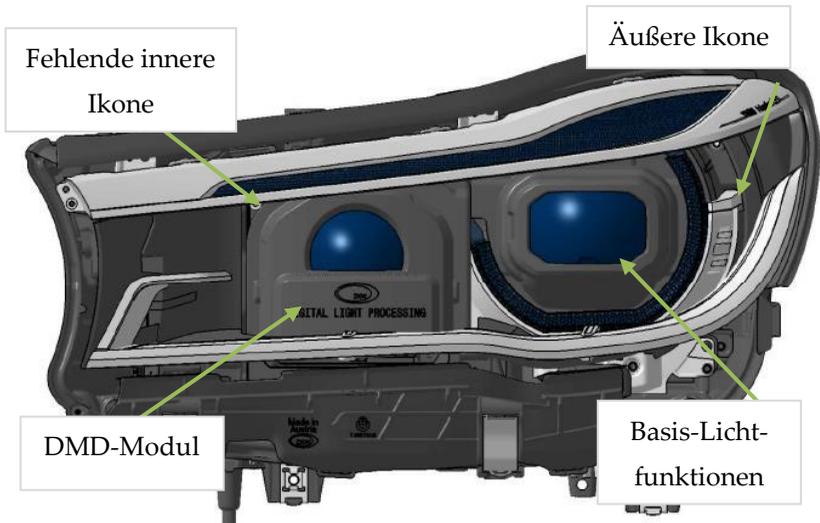


Abbildung 3.50 CAD-Darstellung des im linken G12-Scheinwerfer integrierten DMD-Moduls.

Dadurch konnte von den zwei Ikonen des Tagfahrlichts nur eine (die äußere um die Basis-Lichtfunktionen) realisiert werden, ohne das Design-Bild des ursprünglichen Scheinwerfers stark zu verändern. Pro Scheinwerfer wurde je ein DMD-Modul verbaut. Das geschah zum einen, um den Straßenverlauf bei kurvenreichen Strecken besser abzubilden, wenn pro Modul nur ein Kurvenradius realisiert werden muss. Zum anderen kann bei Bedarf eine höhere Beleuchtungsstärke durch Überlapp der Lichtverteilungen der einzelnen Systeme erzielt werden. Wird bspw. ein zentrales Symbol wie die Quer-Linien als Brems-Frühwarnung projiziert, kann dies durch beide Module mittig auf der Fahrbahn erfolgen. Der Überlapp der Leuchtdichten der Module auf einer Projektionsfläche erhöht dann die Beleuchtungsstärke auf der Fläche.

Die Leuchtdichte für Tagfahrlicht konnte mittels der verbleibenden Ikone pro Scheinwerfer nicht dargestellt werden. Für Fahrten bei Tag wurde hierbei alternativ auf das Einschalten des Abblendlichts übergegangen. Der Einbau des zusätzlichen Moduls schränkt damit die gesetzlich vorgeschriebenen Lichtfunktionen nicht ein.

A. EINBAU DES PROTOTYPS IN DEN VERSUCHSTRÄGER

Wie einleitend erwähnt, wurde der mit je einem DMD-Modul erweiterte Scheinwerfersatz in einen aktuellen BMW 7er (G12, Baujahr 2015) eingebaut. Neben der Aktualität der bereits serienmäßig verbauten Scheinwerfertechnologie wie auch der Ansteuerungsmodule und elektrischer Anbindung verfügt dieses Fahrzeug über eine vergleichsweise hohe Anbauhöhe der Scheinwerfer. Im Vergleich zu den kleineren Derivaten der BMW Familie wie bspw. dem Z4 liegt die Anbauhöhe der Scheinwerfer des G12 mit 681 mm um 51 mm höher als die des G29 (Z4, Baujahr 2019) mit 630 mm. Diese erhöhte Position ermöglicht, bei gleichbleibendem Projektions- bzw. Abstrahlwinkel, eine größere Reichweite der Projektionen.

Abbildung 3.51 stellt die im Fahrzeug verbauten Scheinwerfer dar. Neben der Tagfahrlicht-Ikone (rechts im Bild) ist auch das DMD-Modul in dieser Darstellung eingeschaltet (links). Abblend- und Fernlicht sind innerhalb der leuchtenden Ikone platziert und hier im Sinne einer besseren Erkennbarkeit ausgeschaltet.

Die Ansteuerung der verkehrsüblichen Lichtfunktionen erfolgt in diesem Prototyp über die im Fahrzeug serienmäßig verbaute Bedieneinheit („Bedieneinheit Licht“, kurz: BEL). Die Scheinwerfer konnten dabei an die üblichen BUS-Steckverbindungen im Motorraum angebunden werden.



Abbildung 3.51 Linker DMD-LED-Hybrid-Scheinwerfer eingebaut in einen G12 mit eingeschaltetem DMD-Modul.

Um die Ansteuerung des Projektionsmoduls über einen Laptop realisieren zu können und im Prototyp-Betrieb noch situationsbedingte Änderungen durchführen zu können, wurden vom DMD-Modul im Scheinwerfer zusätzliche Kabelverbindungen bis in den Fahrzeuginnenraum verlegt. Die Kommunikation erfolgte via CAN.

B. ANSTEUERUNG DES SYSTEMS

Wie eingangs erwähnt wurden die gesetzlich vorgeschriebenen Lichtfunktionen auf dem serienüblichen Weg angesteuert. Aus diesem Grund soll auf die Ansteuerung der Basis-Lichtfunktionen an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

Für das Projektionsmodul wurde eine zusätzliche Ansteuerung über einen Laptop im Fahrzeuginnenraum ermöglicht. Die dafür zugrundeliegende Oberfläche bestand aus einem eigens zu diesem Zweck entwickelten und von ZKW zur Verfügung gestellten Programm. Als Grundlage diente dabei das zum Bespielen und Ansteuern von Scheinwerfern gängige Programm „CANoe“ der Vector Informatik GmbH. Zum Zugriff auf die Hardware-Komponente wurde ein CANister zwischen Laptop und Projektionsmodul geschaltet. Die CAN-Daten konnten damit über einen USB-Port im Laptop in das Programm geladen werden.

Das zur Ansteuerung erstellte Programm ermöglicht es mithilfe des CANisters, bis zu 30, zuvor aus Dateien im „Portable Network Graphics“-Format (*kurz: png*) generierten, Binärdateien vom Laptop auf einen eigenen Speicher des Projektionsmoduls zu überspielen. Das Einspeisen der Binärdateien erfolgt für die beiden Scheinwerfer separat. Nach erfolgreicher Überspielung bietet dieselbe Oberfläche die Möglichkeit, auch ohne CANister, mithilfe des Laptops die aufgespielten Bilder auf die Straße zu projizieren. Abbildung 3.52 stellt die graphische Oberfläche zur Auswahl und Anpassung bereits auf dem

Speicher des Projektionsmoduls vorhandener Bilder dar. Die Projektionen beider Scheinwerfer können hier über die selbe Oberfläche zeitgleich mit verschiedenen Eigenschaften und Ausprägungen belegt werden. Neben der Auswahl des zuvor mit einer Nummer hinterlegten Symbols kann auch jeweils dessen Position in X- und Y-Richtung verschoben werden. Auch eine Stauchung in beiden Richtungen („width“ bzw. „height“ in Abbildung 3.52) kann durchgeführt werden. Das Feld „alpha“ beschreibt die Helligkeit der Projektionsdarstellung, bei welcher der Wert „255“ als maximale Helligkeit des Moduls festgelegt wurde.

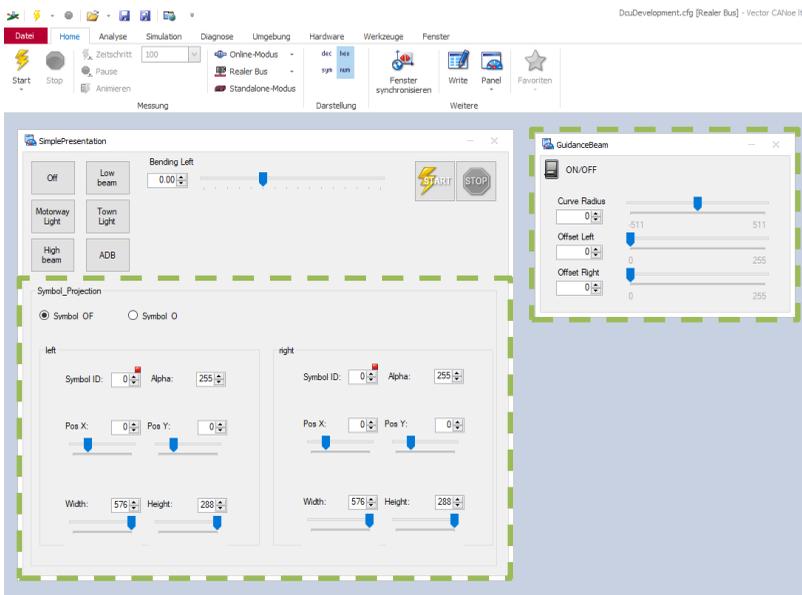


Abbildung 3.52 Benutzeroberfläche zur Steuerung des DMD-Projektionsmoduls im Prototyp. Der grüne Kasten umfasst die für die Studie direkt relevanten Funktionen der Oberfläche.

Auch ADB-Funktionen wie Stadt-Licht, Autobahn-Licht und Weitere können mit diesem Programm über das DMD-Modul realisiert werden. Da diese keine Relevanz für die vorliegende Arbeit haben, wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

Durch das Fenster „Guidance Beam“ können neben Symbolen auch zwei parallele Linien, wie sie in dem Baustellen-Versuch (Abschnitt 3.2) genutzt wurden, projiziert werden. Das Feld „curve radius“ ermöglicht es einen Kurvenradius der parallelen Linien zu bestimmen. Das Modul kann somit eine Kurve abhängig vom Streckenverlauf realisieren. Die Funktionen „offset left“ und „offset right“ ermöglichen die Anpassung der Linienprojektion an die Breite des gewählten Fahrzeugs.

Die Darstellung der parallelen Linien kann dabei sowohl über die Symbol-Funktion mittels separat eingepflegter Linien (je eine Linie pro Scheinwerfer), als auch über die zusätzliche „Guidance Beam“ Funktion erfolgen. Die quer zur Fahrtrichtung projizierten Linien wurden über die einzelnen Scheinwerfer durch die Symbol-Funktion dargestellt. Auch die linksgeneigten Linien wurden durch die Symbol-Funktion angesteuert, hierbei wurde pro Scheinwerfer wie auch bei den Engstellenlinien, je eine separate Linie verwendet.

C. LICHTTECHNISCHE MESSUNGEN UND TECHNISCHE DATEN

Die in Studie 1 (Kapitel 3.1) ausgewählten und in Studie 2 (Kapitel 3.2) im Feldversuch erprobten Projektionen wurden auf die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Weise dargestellt. Wie in den Kapiteln zuvor wird die lichttechnische Auswertung beispielhaft anhand der parallelen Linien zur Fahrzeugbreitendarstellung beschrieben. Die Analysen der Projektionen der beiden Frühwarn-Projektionen zum Ausweichen und Verzögern sind im Anhang (Abschnitt D.3) einsehbar.



Abbildung 3.53 Photographie aus Fahrersicht der über das DMD-Zusatzmodul dargestellten Fahrzeugbreitendarstellungen. Für eine bessere Visualisierung der Funktion wurde die fotografische Darstellung ohne Basis-Abblendlicht gewählt.

Abbildung 3.53 stellt die Projektionen zur Fahrzeugbreitendarstellung aus Fahrerperspektive dar. Für eine bessere Erkennbarkeit in der vorliegenden Arbeit wurde für die diese Darstellung auf Abblendlicht als Basis-Lichtverteilung verzichtet. Die Aufnahme entstand im Lichtkanal des Forschungs- und Innovationszentrum der BMW AG [108]. In dem, einer öffentlichen Straße nachempfundenen Straßenbelag, sind Unebenheiten wie auch Straßenmarkierungen zu finden.

Die Leuchtdichtemessung (Abbildung 3.54) zeigt, dass die Projektionen als Positivkontrast auch auf Abblendlicht sichtbar bleiben und einen Kontrast von 1:2 zum Abblendlicht erzeugen.

Auf der Aufnahme ist zu erkennen, dass die parallelen Linien zur Fahrzeugbreitendarstellung sich mit einer Leuchtdichte von etwa 100 cd/m^2 im Vergleich von der zugrundeliegenden Abblendlichtverteilung mit bis zu etwa 50 cd/m^2 absetzen. Die in der Abbildung erkennbare Querlinie ist auf eine Unebenheit mit abweichendem Belag und höherem Reflektionsgrad zurückzuführen.

Gleichzeitig ist erkennbar, dass ein deutlicher Unterschied zwischen den Fahrbahnmarkierungen und den Projektionen vorhanden ist. Im Bereich der Markierungen werden zwischen 900 und 142 cd/m^2 gemessen, wohingegen die Projektionen einen Wert von 100 cd/m^2 nur geringfügig überschreiten. Im straßenüblichen Verkehrsfall ist eine Verwechslung der Projektionen mit den Verkehrszeichen (Straßenbahnmarkierungen) damit unwahrscheinlich.

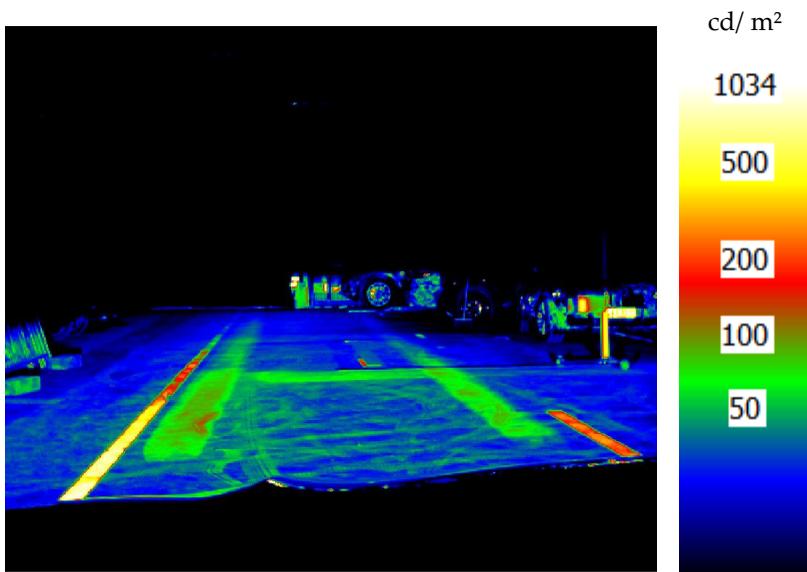


Abbildung 3.54 Leuchtdichteaufnahme: Falschfarbendarstellung in cd/m^2 der vom Prototypen erzeugten Lichtverteilung mit zwei parallelen Linien als Fahrzeugbreitendarstellung. Die in der Mitte erkennbare Querlinie ist auf eine andere Oberflächenbeschaffenheit zurückzuführen.

Die Beleuchtungsstärke der Projektionen nimmt in vergleichbarem Maß zur Abnahme der Beleuchtungsstärke des Abblendlichts mit wachsendem Abstand von der Leuchtquelle ab. Eine Erhöhung des Abstands der Linien vom Fahrzeug weg würde damit die absoluten Beleuchtungsstärken verringern, der Kontrast zum Abblendlicht kann dabei aber als konstant angenommen werden.

Insgesamt erzeugen die beiden DMD-Module in den jeweiligen Scheinwerfern je einen Lichtstrom von 750 lm. Damit werden Beleuchtungsstärken von bis zu 100 lx im Abstand von 25 m erreicht.

Die volle Leistungsaufnahme beträgt etwa 45 W bei einer Betriebsspannung von 13,2 V und entspricht damit in etwa dem Leistungsbedarf eines LED-Scheinwerfers (angenommener Leistungsbedarf von 52 W bei Abblendlicht, Fernlicht und Tagfahrlicht). Wie erläutert, ist die Energieeffizienz des DMD-Systems aufgrund ihres subtraktiven Aufbaus abhängig von der gewählten Darstellung gering im Vergleich zu additiven Systemen (Abschnitt 3.3.1).

Im folgenden Kapitel wird dieses im Prototyp dargestellte System unter anderem hinsichtlich der technischen Machbarkeit und der Erfüllung der in Abschnitt 3.3.1 hergeleiteten Anforderungen bewertet.

Kapitel 4

SYSTEMBEWERTUNG DES GESAMTSYSTEMS

Folgend wird das im Laufe der vorliegenden Arbeit entwickelte Fahrerassistenzsystem im Gesamten bewertet. Dabei wird das System sowohl hinsichtlich der technischen Umsetzbarkeit bewertet, als auch die möglichen Use-Cases betrachtet. Schließlich werden die Vor- und möglichen Nachteile eines solchen Systems erörtert. Neben dem potentiellen Sicherheitsgewinn werden auch Risiken aufgezeigt.

4.1 TECHNISCHE UMSETZBARKEIT

Wie am Prototypen (Kapitel 3.3) erkennbar, ist eine seriennahe Umsetzung denkbar und möglich. Am Beispiel des G12 konnte gezeigt werden, dass ein zusätzliches Lichtmodul basierend auf DMD-Technologie neben den konventionellen Scheinwerfertechnologien und –funktionen integrierbar ist.

Die Bedienung der konventionellen Lichtfunktionen wie Abblendlicht, Fernlicht und Fahrtrichtungsanzeiger konnte dabei uneingeschränkt stattfinden, während das DMD-Modul über eine zusätzlich

angebrachte Verbindung angesteuert wurde. Das System kann über das serienmäßig verbaute Steuergerät versorgt und bei festgelegten Projektionen auch in die vorhandene Bedieneinheit integriert werden (vergleichbar eines Nebelscheinwerfers). Alle gestellten mechanischen Anforderungen (Abschnitt 3.3.1. A) sind damit erfüllt.

Der Prototyp ist bereits in der Lage, einzelnen Kurvenradien zu folgen und Projektionen entsprechend passend darzustellen. Damit ist die Anpassungsfähigkeit an die Umgebung gewährleistet. Weiterhin kann das System die Projektionen in einem bestimmten Bereich auf der Projektionsfläche verschieben. Mit zunehmender (bzw. abnehmender) Geschwindigkeit kann damit die Distanz oder Länge der Projektion angepasst, also erweitert (bzw. verringert) werden. Wie in den Leuchtdichteaufnahmen (Abschnitt 3.3.2) zu sehen, erreichen diese Projektionen einen Kontrast von 2:1 und erfüllen damit, zusammen mit der Flexibilität gegenüber des Streckenverlaufs und Reisegeschwindigkeit alle gestellten funktionalen Anforderungen.

Im Vergleich zum Beamer-Fahrzeug (Kapitel 3.2) konnte das Prototypen-Fahrzeug aufgrund der gegebenen gesetzlichen Anforderungen auch auf öffentlichen Straßen bewegt und erprobt werden. Die Erprobung über weitere Strecken auf öffentlichen Straßen mit verschiedenen Straßenabschnitten (> 1000 km in der Stadt, auf Landstraßen und Autobahnen) zeigte keine Anzeichen für eine Verstellung des Scheinwerfers bzw. keinen Versatz der Projektionen. Auch die in Süd- und Mitteldeutschland üblichen Temperaturschwankungen in Herbst und Winter konnten keinen nachweislichen Einfluss auf die Funktionalität des Systems und die Art der Projektion ausüben. Im

Rahmen der Erprobung erfolgte Tests konnten damit auch die umweltbedingten Anforderungen für den Raum Deutschland erfüllen.

Eine Kleinserie von Fahrzeugen mit einer vergleichbaren, auf DMD-basierenden Technologie wurde kurz nach Beginn der Prototypen-Tests kommuniziert[58]. Die hier verwendete Lichtquelle ist in der Lage, Projektionen bis zu maximal etwa 30 m vor das Fahrzeug zu projizieren [58, 63, 109]. Diese Funktion ist allerdings aktuell mangels Homologierbarkeit nur in der gegebenen Kleinserie verfügbar.

Insgesamt zeigt die vorliegende Arbeit, zusammen mit der Kommunikation der Kleinserie, dass ein solches System technisch im Automobil umsetzbar ist und für eine Straßenzulassung notwendige Lichtwerte und die für automobiler Anwendungen typischen thermischen und mechanischen Anforderungen erfüllt. Die hier vorgestellten Messungen zeigen außerdem, dass damit bei Nacht gut erkennbare Positiv-Kontraste für ein auf Projektionen basierendes Fahrerassistenzsystem erreicht wird.

4.2 USE-CASES

Vor allem bei Dunkelheit fehlen Autofahrern visuelle Informationen aus ihrer Umgebung um sich sicher und vorausschauend in ihr bewegen zu können (s. Abschnitt 2.1). Die Entwicklung der Lichttechnik setzt hier an, um dem Fahrer auch bei Nacht möglichst viele Informationen zur Verfügung zu stellen. Fernlicht ist, in seinen

inzwischen verschiedenen Ausprägungen (s. Abschnitt 2.2.1), eine Möglichkeit dafür.

Nach Untersuchungen von Böhm[11] lagen die möglichen Einsatzzeiten von Fernlicht jedoch bei lediglich 38,9% auf einer untersuchten Teststrecke mit überwiegendem Anteil von Landstraße und geringen Anteilen im Stadtbereich. Die übrigen 61,1% entfielen auf Zeiten, in denen das volle Fernlicht aufgrund von Blendwirkung auf andere Verkehrsteilnehmer oder zu geringen Fahrgeschwindigkeiten (innerorts) reduziert werden musste.

Projektionen, wie sie in dieser Arbeit entwickelt wurden, haben hierzu den Vorteil, dass sie kein Licht über die sog. H-H-Linie (Linie, die in Annex 3 [68] die horizontale Linie am idealen Horizont eines Fahrers beschreibt) ausstrahlen. Das emittierte Licht wird, vergleichbar zum Abblendlicht, nur nach unten auf die Fahrbahn gerichtet. Dies verhindert, dass entgegenkommende Fahrzeugführer und andere Verkehrsteilnehmer geblendet werden. Die damit ermöglichten Einsatzzeiten entsprechen denen des Abblendlichts und bieten damit im Vergleich zum Fernlicht eine häufigere Nutzungsmöglichkeit.

Die Nutzung ist dabei nicht auf bestimmte Straßen- oder Umgebungen beschränkt. Jedoch ist vor allem der Einsatz in schlecht beleuchteten Umgebungen, insbesondere auf Landstraßen und Autobahnen sinnvoll. In der Stadt, in der in den meisten Fällen Straßenbeleuchtung vorhanden ist, stehen dem Fahrer ausreichend Informationen zur Verfügung. Doch auch dort können Engstellen auftreten, die Unsicherheit beim Fahrer hervorrufen und in denen er eine objektive

Darstellung seiner Fahrzeugbreite benötigt (bspw. Straßenverengungen durch Baustellen oder Einfahrten in Garagen).

Auch das Frühwarnsystem vor Hindernissen auf der Strecke ist sowohl innerorts wie Außerorts anwendbar. Außerorts ist es notwendig, um dem Fahrer auf optischem Weg Informationen zur Verfügung zu stellen, die er ohne das System nicht zu einem so frühen Zeitpunkt hätte. In der Stadt kann es zu Redundanzen mit anderen verfügbaren Informationsquellen kommen. Hier kann dem Fahrer aber, bei an die Geschwindigkeit angepassten Projektionsweiten, eine Möglichkeit gegeben werden, ein für sich passendes System zu wählen. Weiterhin kann die Aufmerksamkeitslenkende Wirkung der Projektionen auch innerorts zum Vorteil werden.

4.3 SICHERHEITSGEWINN & RISIKEN

1) Erhöhtes Sicherheitsempfinden in Engstellen und frühere Reaktionen auf Gefahr

In den vorliegenden Studien konnte gezeigt werden, dass die zusätzliche Projektion von Informationen in Form von Linien vor dem Fahrzeug vom Fahrer erkannt, akzeptiert und als Assistenzsystem angenommen wird. Bei zusätzlicher Projektion paralleler Linien fahren Testpersonen sicherer durch eine Engstelle, als mit Abblendlicht und Fernlicht. Werden parallele Linien als Frühwarnsystem eingesetzt, weichen Testpersonen früher aus oder verringern ihre Geschwindigkeit früher im Gegensatz zu Fahrten mit Abblend- oder Fernlicht.

In der vorliegenden Studie konnte eine Aufmerksamkeitslenkung der Probanden beobachtet werden, die sie auch im Vergleich zu Fernlicht zur früheren Reaktion bewegte. Das Aufleuchten der Projektion weit vor dem Fahrzeug wandte den Blick der Probanden in den relevanten Bereich vor ihnen auf der Straße wodurch sie, auch ohne vorherige Kenntnis des Zwecks dieser Projektion, ihre Aufmerksamkeit erhöhten und zumindest ein weiteres Beschleunigen einstellten, wodurch sich ihre Reisegeschwindigkeit verringerte.

2) Akzeptanz und Vertrauen in bereits vorhandene Sensorsysteme

Diese Art der Darstellung von Informationen, die über Umfoldsensoren aus der Umgebung gesammelt werden, bietet einen weiteren Vorteil: Wie in einer Studie des Robert-Bosch-Instituts[87] veröffentlicht, sind sich viele Kfz-Fahrer der in ihrem Fahrzeug verbauten Sicherheitssysteme nicht bewusst (das kann nach Durchführung der Studien 1 und 2 aufgrund von Äußerungen der Probanden bestätigt werden). Eine Unkenntnis über bereits vorhandene Sicherheitssysteme und Sensoren im Fahrzeug kann eine Ablehnung von autonom fahrenden Fahrzeugen zur Folge haben. Durch die Darstellung der Umfeldinformationen in Form eines Frühwarnsystems vor Gefahren auf der Strecke mittels Projektionen auf der Straße kann Autofahrern bewusst vorgeführt werden, welche Kenntnisse das Fahrzeug über die Umwelt hat und dass es diese erkennt. Dem Kraftfahrer kann dadurch ein Vertrauen zu den Sensoren und Reaktionen des Fahrzeugs vermittelt werden. Durch das gesteigerte Vertrauen kann später die Bereitschaft zur Akzeptanz von autonomen Fahrzeugen erhöht werden.

3) Kein Ablenkpotehtial anderer Verkehrsteilnehmer feststellbar

Die häufig auftommende Frage bei Vorstellung von projektionsbasierten Assistenzsystemen betrifft die Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer. Die vorliegende Studie befasste sich vorwiegend mit dem möglichen Nutzen für den Fahrer, weniger mit der Wirkung auf andere Verkehrsteilnehmer. Allerdings wird aufgrund der einfach gehaltenen Struktur der hier gewählten Projektion und der Ausrichtung der Darstellung auf den Fahrer nicht mit einer deutlichen Wahrnehmung der Projektionen durch andere Verkehrsteilnehmer gerechnet. Abbildung 4.1 zeigt eine Fotografie aus seitlicher Perspektive der Projektionen aus Studie 2.



Abbildung 4.1 Seitliche Betrachtung der Projektionen im Ausweich-Fall aus der Studie 2. Die Linien sind im markierten Bereich projiziert und sind aus einer anderen Position, als der des Fahrers, mit bloßem Auge kaum erkennbar.

Hier sind die positiv kontrastierten Linien auf Basis des Ablendlichts kaum erkennbar und können auch als Inhomogenität der Lichtverteilung interpretiert werden.

Auch die dargestellte Aufnahme aus zum Fahrzeug entgegengesetzter Position in Fahrerhöhe (Abbildung 4.2) weist keine deutliche Abhebung der Lichtverteilung vom Abblendlicht auf.



Abbildung 4.2 Kamerabild der Projektionen im Ausweich-Fall aus Studie 2 im Lichtkanal der BMW AG aus Position eines entgegenkommenden Fahrers. Die Linien sind im markierten Bereich projiziert. Mittig der Aufnahme: Stelle mit anderem Bodenbelag und damit verändertem Reflektionsgrad. Relative Helligkeitsunterschiede zwischen Abblendlicht und Projektionen sind auf beiden Bodenbelägen kaum erkennbar.

Einfache Strukturen haben weiterhin den Vorteil, dass sie im Falle der Wahrnehmung durch einen anderen Verkehrsteilnehmer, innerhalb geringerer Fixationsdauern erkannt werden können (Abschnitt 3.1.1,[14]). Somit wird erwartet, dass auch bei der Wahrnehmung der Symbole die Fixationsdauer und damit Ablenkung anderer Verkehrsteilnehmer gering ist. Diese geringen Fixationsdauern auf einfache Symbolprojektionen konnte auch in der Arbeit von Jahn und

Neumann[50] gezeigt werden: Fixationsdauern auf solchen Projektionen blieben in einem unkritischen Bereich und werden von den Autoren damit als nicht gefährdend bzw. ablenkend gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern eingeschätzt.

4) Zusammenfassung Sicherheitsgewinn & Risiken

Ein projektionsbasiertes Fahrerassistenzsystem, welches den Fahrer in herausfordernden Situationen unterstützt und ihn vor Gefahren frühzeitig warnt, ohne dessen Blick von der Fahrbahn abzulenken, ist insgesamt als sehr vorteilhaft einzustufen. Neben den direkt getesteten Vorteilen, wie einem erhöhten Sicherheitsempfinden und früheren Reaktionen auf Gefahren, wird auch ein Vorteil hinsichtlich der Aufklärung bezüglich vorhandener Sensorsysteme erwartet. Die Aufklärung kann langfristig zu einer höheren Akzeptanz autonom fahrender Fahrzeuge führen.

Das Risiko der Einführung solcher Funktionen, wenn sie einfach gehalten werden (eine detaillierte Definition der maximalen Anzahl an Kanten in einem vorgeschriebenen Bereich ist zu erstellen), wird hier nicht gesehen. Andere Verkehrsteilnehmer werden nach ersten Erkenntnissen durch solche Projektionen nicht beeinträchtigt und auch die Fahrer gaben in der hier durchgeführten Studie mehrheitlich an, durch die Projektionen nicht abgelenkt worden zu sein.

Das Gesamtsystem ist damit sehr sinnvoll und notwendig hinsichtlich der Erhöhung der Verkehrssicherheit.

Kapitel 5

AUSBLICK UND WEITERE SCHRITTE

Die vorliegende Arbeit hat nachgewiesen, dass die Kommunikation mit dem Fahrer über Lichtprojektionen möglich und erfolgreich ist. Weiterhin ist eine seriennahe Integration in ein straßentaugliches Fahrzeug durchgeführt und damit die Umsetzbarkeit gezeigt worden. Die Gesetzgebung sieht die Zulassung solcher Funktionen aktuell jedoch noch nicht vor und beschränkt sich auf konventionelle Lichtfunktionen und Informationen im Innenraum des Fahrzeugs zur optischen Unterstützung des Fahrers bei Fahrten in Dunkelheit.

Das folgende Kapitel soll Handlungsfelder aufzeigen, in denen noch ein Wirkpotential erkannt wird. Die Felder teilen sich in drei Bereiche auf: weitere Forschung bezüglich der MMI, Weiterentwicklung auf technischer Ebene und Realisierung einer gesetzlichen Anpassung zur Zulassung vergleichbarer Funktionen.

5.1 HANDLUNGSFELD FORSCHUNG – MENSCH MASCHINE INTERAKTION

Die vorliegende Arbeit wie auch die bereits bekannten Forschungen in diesem Fachgebiet haben eindrücklich einen Vorteil der Fahrerass-

sistenz auf Basis von Lichtprojektionen gezeigt. Auch das Potential der Ablenkung anderer Verkehrsteilnehmer wird als gering eingeschätzt. Für ein vollständigeres Verstehen der Wirkung solcher Projektionen im Straßenverkehr können im Weiteren noch die folgenden Themen untersucht werden.

Die bislang erfolgten Untersuchungen beschränkten sich auf Fahrten auf abgesperrten Strecken sowie Privatgeländen. Dies lag zum einen an den Versuchsbedingungen (nicht straßentaugliche Fahrzeuge), vor allem aber an dem zum damaligen Zeitpunkt geringen Wissensstand bezüglich der Wirkung solcher Projektionen. Durch die Integration des Projektionsmoduls in einen bestehenden Scheinwerfer wurde bewiesen, dass Testfahrten auch auf öffentlichen Straßen stattfinden können. Die hier gezeigte Einstufung der Projektionen als vielversprechend und ohne erkennbares Risikopotential für Fahrer und andere Verkehrsteilnehmer ermöglicht folgend Untersuchungen im Realverkehr. Neben den Reaktionen und Blickbewegungen des Fahrers kann dabei auch die Umgebung erfasst werden. Damit kann nicht nur, wie in der vorliegenden Arbeit erfolgt, die Akzeptanz des Fahrers bestätigt werden, sondern auch die Wahrnehmung durch andere Verkehrsteilnehmer studiert und beurteilt werden.

Weitere Untersuchungen können einen optimalen Projektionsbereich der Linien in den verschiedenen Situationen abhängig von der Reisegeschwindigkeit ermitteln, um die Projektionen ideal an die Bedürfnisse von Kraftfahrern anzupassen.

Zukünftige Forschung auf diesem Gebiet kann zu einer optimalen Ausprägung der in der vorliegenden Arbeit als vielversprechend und

nützliche erkannten Assistenzfunktion basierend auf Projektionen beitragen. Damit können dem Gesetzgeber noch weitere Argumente zur Schaffung einer Grundlage zur Zulassung solcher Systeme auf Projektionsbasis geboten werden.

5.2 HANDLUNGSFELD TECHNOLOGIE

Bereits heutzutage ist es möglich solche Darstellungen seriennah in einen Kfz-Scheinwerfer zu integrieren (Kapitel 3.3). Im Prototyp wurde lediglich die Ansteuerung des hochauflösenden Zusatzmoduls nicht serientauglich umgesetzt, um die hohe Flexibilität der Wahl der Darstellungen des Projektionsmoduls in der Testphase zu gewährleisten.

Bei einer Umsetzung in Serie kann diese Ansteuerung ähnlich der Ansteuerung anderer Zusatzlichtfunktionen erfolgen (bspw. durch einen Zusatz-Taster ähnlich des Nebellichts). Durch einen Ein-/ und Ausschalter kann das System dem Fahrer zur Verfügung gestellt werden. Alternativ ist eine sensorgesteuerte Automatisierung vergleichbar zu der von Parkhilfen möglich. Die Voraussetzung für ein zuverlässiges Funktionieren liegt hierbei in der Qualität der Sensoren und Transmitter der Sensorinformationen. Die verwendeten Sensoren müssen eine ausreichende Reichweite bedienen, wie es aktuell Radar- und Lidar-Sensoren realisieren (200 - 250 m[83]). Diese müssen über

eine ausreichend kurze Verarbeitungszeit verfügen, die es ermöglicht, Informationen zeitnah über Transmitter an die Scheinwerfer und damit über Projektionen an den Fahrer weiterzugeben.

Im Zuge der immer weiter steigenden Informationsdichte und kürzeren Verarbeitungszeiten stellt sich die Frage, ob die aktuell vorhandenen und verbauten BUS-Systeme im Fahrzeug über eine ausreichende Leistungsfähigkeit verfügen. Eine höhere Leistungsfähigkeit bietet bspw. Ethernet. Auf den Trend zur Einbindung von Ethernet und zu TCP/IP-fähigen Systemen (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) wird hinsichtlich der Nutzung von Scheinwerfersystemen basierend auf DMD und Laserscanning auch von Experten wie Dr. Krems der ZKW Group hingewiesen[96].

Die aktuell zur Verfügung stehende Technologie hat damit hinsichtlich Nutzbarkeit noch Potential und kann durch weitere Forschung besser integrierbar und ggf. auch kostenreduzierter gestaltet werden.

Ein Ansatz für eine effizientere Projektionsdarstellung ist das Anfang 2019 vorgestellte „Valeo Picture Beam Monolithic“ [110]. Durch die einzeln ansteuerbaren LEDs im System entsteht ein additiver Aufbau, dessen Energieeffizienz die von subtraktiven Systemen wie DMD übersteigt. Gleichzeitig bietet das System eine mit DMD vergleichbar hohe Anpassungsfähigkeit bezüglich der Lichtverteilung, jedoch mit einer im Vergleich zum DMD geringeren Auflösung. Zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Arbeit werden erste Prototypen dieser Technologie angeboten. Wie auch beim DMD-Prototyp ist die Handhabung aufgrund der noch nicht festgelegten

Projektionssymbole umständlich. Jede neue Darstellung ist mit der Änderung der hinterlegten Datenpakete auf dem System verbunden. Bei Festlegung der darzustellenden Symbole (bspw. durch den Gesetzgeber) kann die Handhabung vereinfacht werden und die Wahl der Darstellung in Abhängigkeit von den durch Umfeldsensoren erfassten Gegebenheiten erfolgen. Eine Weiterentwicklung hinsichtlich der Erhöhung der Auflösung kann zu einer Erhöhung der Use-Cases des Systems beitragen.

Insgesamt gilt für alle genannten Systeme, dass eine Nutzung der Technologien über die reine Symbol-Projektion hinaus, bspw. für eine Fernlicht-Segmentierung, den Nutzen des Systems erhöht. Bei höherem Nutzen und ggf. erhöhten Nutzer-Zahlen kann auch mit einer Verringerung der Kosten für den Einbau eines solchen Systems gerechnet werden. Durch die Vergünstigung des Produkts kann wiederum ein breiteres Feld an End-Nutzern erreicht werden und damit mehr Kraftfahrzeugfahrern einen Mehrwert im Straßenverkehr bieten.

5.3 HANDLUNGSFELD GESETZGEBUNG

Die in der vorliegenden und den zum Thema verwandten Arbeiten konnte ein klarer Vorteil solcher Projektionen ausgearbeitet werden. Nicht nur die vorliegende Arbeit sondern auch die Erkenntnisse von Hamm, Huhn und Reschke[49] wie auch die Arbeit von Krahnstöver[48] zeigen einen Mehrwert der Kommunikation mit dem Fahrer

mittels Projektionen auf. Durch die Arbeit von Jahn und Neumann [47] konnte kein Ablenkpotential von anderen Verkehrsteilnehmern durch Projektionen auf der Straße ermittelt werden.

Damit bietet sich dem Gesetzgeber die Möglichkeit und es entsteht gleichermaßen der Bedarf der Anpassung der Gesetzestexte hinsichtlich einer Zulassung von Projektionen im Straßenverkehr. Die vorliegende Arbeit hat in ihren Resultaten (Kapitel 3) bereits einen Lösungsvorschlag hinsichtlich der Ausprägungen solcher Funktionen erarbeitet.

Simple Formen mit einer geringen Anzahl an Kanten und einem zum Basislicht (Abblendlicht) positiven Kontrast werden als sehr vielversprechend erachtet. Vor allem parallele Linien können durch einfache Änderungen der Orientierung vielseitig genutzt werden und wurden in allen Untersuchungen intuitiv verstanden und von den Probanden als Kommunikationsmittel akzeptiert. In einem von der Geschwindigkeit abhängigen Abstand projiziert, werden Kraftfahrer durch diese Projektionen während Fahrten bei Dunkelheit unterstützt und frühzeitig über eventuelle Hindernisse auf der Strecke informiert, ohne dass sie ihren Blick von der Straße lenken müssen. Der positive Effekt der Projektionen ist vergleichbar mit dem von Fahrten mit vollem Fernlicht, birgt aber den Vorteil, dass andere Verkehrsteilnehmer durch diese Art der Informationsdarstellung nicht geblendet werden. Die Studie hat sogar eine Aufmerksamkeitslenkung der Probanden gezeigt, die dazu geführt hat, dass Reaktionen früher eingeleitet wurden, als das im Vergleichsfall mit Fernlicht geschah.

Die Empfehlung der vorliegenden Arbeit ist deshalb die Schaffung einer Grundlage zur Zulassung solcher Symbole als zusätzliche Lichtfunktion die der Unterstützung des Fahrers dient. Es kann eine Einschränkung hinsichtlich der Beleuchtungsstärken dieser Funktionen auf der Straße erfolgen, die bspw. einen Positivkontrast von über 1:2,5 als unzulässig kennzeichnet.

Die Art und Ausprägung von gewählten Symbolen wird weiterhin als klar zu definieren ausgelegt. Informationen, die über einfache Symbole im Innenraum des Fahrzeugs bereits lange bewährt sind und auch problemlos, während der Fahrt einmalig, dargestellt werden können, sind für eine solche Funktion nicht zuzulassen. Lediglich sicherheitskritische Informationen über Gefahren auf der Strecke, die den Fahrer auf eine Reaktion vorbereiten sollen, oder Informationen, die aktuell nicht über die vorhandenen Systeme abgebildet werden können, die die absolute Darstellung der Fahrzeugbreite, sind für solche Systeme in Betracht zu ziehen.

Gegen einen Missbrauch dieser Systeme durch Manipulation mit dem Zwecke der Selbstdarstellung von Fahrer oder Hersteller sind Vorkehrungen zu treffen.

Eine mögliche Ausprägung zur gesetzlichen Definition ist im Anhang (Abschnitt E) zu finden. Die einheitliche Darstellung der Funktionen über alle Hersteller hinweg ist hier notwendig um keine Missverständnisse beim Verbraucher zu erzeugen (ähnlich der Definitionen der Farbwahl von Fahrtrichtungsanzeigern u.ä.).

Kapitel 6

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Möglichkeiten der Kommunikation mit Kraftfahrern während der Fahrt bei Nacht zur ablenkungsfreien Informationsübertragung. Bei Dunkelheit ist die visuelle Informationsdichte der Umgebung stark reduziert. Objekt- und Distanzerkennung ist für den Fahrer damit erschwert.

Aktuelle Sensor-Systeme sind bereits in der Lage, Objekte in der Umgebung zu erkennen, bevor der Fahrer sie mit Abblendlicht wahrnehmen kann (Kapitel 2). Die gesammelten Informationen über die Umgebung werden dabei in visueller Form im Innenraum des Fahrzeugs, oder im Fall des HUD virtuell kurz vor dem Fahrzeug, dargestellt. Der Blick des Fahrers wird somit von der dunklen Umgebung in den, meist hell erleuchteten, Innenraum abgelenkt.

Zur ablenkungsfreien Kommunikation der gesammelten Informationen wurden in dieser Arbeit Projektionen auf der Straße vor dem Fahrzeug getestet. Der Lösungsansatz war hierbei die Übermittlung von Informationen in einem Bereich weit vor dem Fahrzeug, der den Blick des Fahrers nicht vom Verkehrsgeschehen abwendet.

Unter Berücksichtigung technologischer und gesetzlicher Aspekte als auch der menschlichen Wahrnehmung wurden im Simulator-

Versuch parallele Linien als vielversprechendste, einfache Symbole zur Kommunikation mit dem Fahrer ausgewählt (Kapitel 3.1). Im Vergleich zu Symbolen wie Kreisen, Dreiecken und Rechtecken zeigen die parallelen Linien in allen Ausrichtungen die größten Übereinstimmungen hinsichtlich Reaktion und Interpretation bei der Probandenstudie. Die Testpersonen gaben hier mehrheitlich intuitiv gleiche Antworten hinsichtlich ihrer potentiellen Reaktion auf Liniensprojektionen während einer realen Fahrt und der jeweils zugrundeliegenden Interpretation.

Die im Simulator durchgeführte Studie 1 führt zu der Erkenntnis, dass parallel zur Fahrbahn ausgerichtete Linien vorwiegend als bestätigendes Symbol interpretiert werden, welches die eigene Spur anzeigt und damit zum Halten der Spur bewegt. Die quer zur Fahrtstrecke ausgerichteten Linien, sind für Probanden ein Hinweis auf Hindernisse auf der eigenen Fahrbahn. Die Mehrzahl reagiert hier mit dem Reduzieren ihrer Geschwindigkeit. Nach links bzw. rechts orientierte Linien, lenken die Probanden in die entsprechend angezeigte Richtung. Die Reaktion erfolgt überwiegend durch die Interpretation der Linien als Warnung vor einer Spurverengung von der entsprechend entgegengesetzten Seite vor dem Fahrzeug bzw. von einem Fahrzeug welches sich auf entgegengesetzter Seite hinter dem eigenen Fahrzeug nähert (Abschnitt 3.1.3.D).

Die Studie zeigt auf, dass bspw. „Gefahr“ auch ohne rot als Farbinformationen dargestellt werden kann. Allein der positive Kontrast der im Simulator verwendeten Projektionen führt zu erhöhter

Aufmerksamkeit, Bremsbereitschaft und Geschwindigkeitsreduktion bei den Testpersonen: Der positive Effekt der Projektionen als Warnsignal erfolgt auch ohne die Einbringung von Dynamik in der Darstellung oder einer Positivbestätigung im Versuchsablauf in Form eines Hindernisses auf welches entsprechend reagiert werden muss (Abschnitt 3.1.4).

Studie 2 testet die im Simulator erhaltenen Ergebnisse auf ihre Wiederholbarkeit bei Fahrten unter Realbedingungen (Kapitel 3.2). Ohne Vorwissen über die Information hinter den Projektionen wurden die Reaktionen von Probanden bei aktiver Fahrt auf einer Teststrecke untersucht.

Diese zweite Studie zeigt, dass auch mit einem neuen Probandenkollektiv die intuitive Interpretation und die damit verbundene Reaktion auf die Projektionen beibehalten werden. Die Veränderung der Umgebung von der Simulator-Studie zu einer Fahrt mit einem realen Fahrzeug führte zu keinen Veränderungen hinsichtlich der Reaktionen der Probanden auf die gezeigten Symbole. Beim Vergleich von unterschiedlichen Lichtverteilungen bzw. Projektionsdarstellungen in vier Testgruppen stellt sich ein erheblicher Mehrwert der Projektionen als Assistenz während der Fahrt bei Nacht heraus (Abschnitt 3.2.3). Dies gilt sowohl in Engstellen (Abschnitt 3.2.3.A) als auch als Frühwarnsystem bei Hindernissen (Abschnitt 3.2.3.B & C). Probanden fahren souveräner durch eine langgezogene Engstelle und reagieren früher auf Hindernisse auf der Strecke, wenn ihnen diese Projektionen zur Verfügung stehen, als wenn sie nur mit Abblendlicht fahren.

Der Mehrwert der Projektionen ist mit den Vorteilen von Fernlicht vergleichbar. Fahrverhalten und Reaktionszeitpunkte der Probanden zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen Fahrten mit Fernlicht und Fahrten in denen Abblendlicht mit zusätzlichen Projektionen verwendet wird. Die Ergebnisse lassen zudem den Schluss einer erhöhten Aufmerksamkeitslenkung zu, wenn das projektionsbasierte Frühwarnsystem mit reinem Fernlicht verglichen wird. Weiterhin zeigt sich unter Verwendung der parallelen Linien eine stärker kontrollierte, geradere Spurführung in Engstellen (Abschnitt 3.2.4).

Die subjektiven Antworten der Probanden weisen auf große Offenheit gegenüber den getesteten Projektionen hin. Probanden bewerteten die Linien als intuitiv verständlich und zeigten eine hohe Bereitschaft gegenüber der Nutzung im Straßenverkehr (Abschnitt 3.2.4).

Basierend auf den Ergebnissen der Studien 1 und 2 wurde ein seriennaher Prototyp konzipiert (Abschnitt 3.3.1) und realisiert (Abschnitt 3.3.2), der für die gesamtheitliche Bewertung der Umsetzung eines solchen Systems für den Straßenverkehr relevant ist. Es kann gezeigt werden, dass die Umsetzung eines solchen Systems mit dem heutigen Stand der Technik bereits seriennah möglich ist (Kapitel 4). Der für ein zusätzliches Projektionsmodul benötigte Bauraum ist im Falle von Projektionen durch DMD-Technologie gering genug, um es in bestehende Scheinwerfer zu integrieren. Alle gesetzlich vorgeschriebenen Werte wie Anbauhöhe und Lichtwerte werden mit einem solchen System erfüllt. Das gewählte Fahrzeug kann damit auch

in der Testphase als straßentauglich eingestuft werden. Die Projektionen erreichen einen Positiv-Kontrast von 2:1 zum zugrundeliegenden Abblendlicht und sind für den Fahrer gut erkennbar.

Zur vollumfänglichen Klärung der Reaktionen auf solche Projektionen und ein besseres, schnelleres und zuverlässigeres Assistenzsystem ist noch weitere Forschung und Entwicklung möglich (Kapitel 5). Bereits jetzt lässt sich, in Verbindung mit parallel zu der vorliegenden Arbeit veröffentlichten Forschungsergebnissen anderer Institutionen sagen, dass ein auf Projektionen vor dem Fahrzeug basierendes Fahrerassistenzsystem einen großen Beitrag zur Verkehrssicherheit leisten kann. Es ist damit sehr zu empfehlen, die Gesetzgebung dahingehend anzupassen, um solche Projektionen zu homologieren zu können (Kapitel 5.3). Auf diese Weise können Fahrern Informationen zur Verfügung gestellt werden, die sie aktuell nur durch visuelle Kanäle im Innenraum des Fahrzeugs erhalten und damit abgelenkt werden.

Die in der vorliegenden Arbeit erwähnten weiteren Forschungsergebnisse zeigen klar, dass durch Projektionen auf der Straße keine Gefährdung für andere Verkehrsteilnehmer erkannt wird (Kapitel 4.3) und auch die Probanden der in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Studien fühlten sich nicht von den Projektionen abgelenkt (Abschnitt 3.2.4). Eine Verwechslung der projizierten Symbole mit Verkehrszeichen die Straßenmarkierungen konnte ebenfalls nicht beobachtet werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Bei Nacht, wenn sich die visuell zur Verfügung stehenden Informationen aus der Umwelt verringern, sind Projektionen von Vorteil: sie bieten dem Fahrer mehr Informationen und haben im Vergleich zu Fernlicht häufigere, mögliche Einsatzzeiten. Bei gleichbleibenden Fahrerergebnissen sind Projektionen gegenüber Fernlicht klar im Vorteil.

Insgesamt kann damit ein großes Potential von Projektionen als Fahrerassistenz zur Verbesserung der Verkehrssicherheit bei Nacht festgestellt werden.

ANHANG

Anhang A: PUBLIKATIONS- UND PATENTVERZEICHNIS

A.1 PUBLIKATIONEN

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation entstanden folgende Publikationen des Autors:

- 1) **M. Budanow, Dr. C. Jebas, T. Hausmann, Prof. Dr. C. Neumann:** *„Front Lighting System - Future Communication with the driver“*, VISION Proceedings, Paris, Frankreich, **2016**
- 2) **M. Budanow:** *„Projektionszeichen als Unterstützung für den Fahrzeugführer – Forschungsergebnisse und -vorhaben“*, Forschungskolloquium der BMW AG, München, Deutschland **2016**
- 3) **M. Budanow, T. Hausmann; Prof. Dr. C. Neumann;** *„Projektionszeichen als Unterstützung für den Fahrzeugführer“* Vortragsreihe „Automobil Beleuchtung“ des Haus der Technik, Berlin, Deutschland, **2016**

- 4) **M. Budanow; C. Amann; Prof. Dr. C. Neumann:** „*Regulating the Future - New Light and light signalling innovations*“ GTB Conference, Den Haag, Niederlande, **2017**
- 5) **M. Budanow:** „*Semantik des Lichts - Verwendung von Abblendlicht als Fahrerassistenz.*“, Hochschulförderkreis des Karlsruher Instituts für Technologie; Karlsruhe, Deutschland, **2017**
- 6) **M. Budanow, S. Weber, T. Hausmann, Prof. Dr. C. Neumann:** „*Information System for Car Drivers Based on Projections on the Road.*“, International Forum on Automotive Lighting, Shanghai, China, **2018**
- 7) **M. Budanow, Prof. Dr. C. Neumann:** „*Road projections as a new and intuitively understandable human-machine interface*“ Advanced Optical Technologies, De Gruyter, doi: <https://doi.org/10.1515/aot-2018-0055> **2019**
- 8) **M. Hofer; M. Budanow:** „*Die Straße als Leinwand/ Enge Sache – Mehr Sicherheit durch Projektionen*“ Handlungskonferenz Lichttechnik zum Thema „Visible Light Communication und andere Kommunikation via Licht“ im Rahmen der belektro Messe, Berlin, Deutschland, **2018**
- 9) **M. Budanow, Prof. Dr. C. Neumann:** „*Projektionen auf der Straße als Fahrerassistenz.*“; Vortragsreihe „Automobil Beleuchtung“ des Haus der Technik, Berlin, Deutschland, **2018**

- 10) **M. Budanow, Prof. Dr. C. Neumann:** „*Success of Driver Assistance through Light Projections on the Road*“ Proceedings International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, Deutschland, 2019

A.2 EINGEREICHTE PATENTE

- 1) **M. Budanow, S. Weber, T. Hausmann, J. Aulbach**

Fahrerinformationssystem in Engstellen durch Projektionen auf der Fahrbahn

Angemeldet durch die BMW Group

DE 102018216254.9 , Anmeldedatum : 24.09.2018

WO PCT/EP2019/072825, Anmeldedatum: 27.08.2019

- 2) **M. Hofer, M. Budanow**

Linsensystem für Nah- und Fernfeldprojektionen

Angemeldet durch die BMW Group

DE 10 2019 111 480.2, Anmeldedatum: 03.05.2019

Anhang B: VERZEICHNISSE

B.1 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Wolfgang Rudschies, *So funktionieren moderne Lichtsysteme* **2016**.
- [2] ADAC, *Bedeutung des Straßenverkehrs: Verkehrsstärke auf Bundesautobahnen (DTV in Kfz pro 24 h)* **2016**.
- [3] Bundesanstalt für Straßenwesen, *Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen* **2018**.
- [4] Kraftfahrt-Bundesamt, *Der Fahrzeugbestand am 01. Januar 2019* **2019**.
- [5] Kraftfahrt-Bundesamt, *Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern im Januar 2001* **2001**.
- [6] Bundesamt für Statistik, *Straßenverkehrsunfall-Statistik 2018* **2018**.
- [7] Jörg Kubitzki, Wolfgang Fastenmeier, *Ablenkung durch moderne Informations- und Kommunikationstechniken und soziale Interaktion bei Autofahrern, Unterföhring* **2016**.
- [8] L. Caberletti, M. Kümmel, K. Elfmann, C. Schierz, *Proceedings Experiencing Light* **2009**.
- [9] M. Grimm, *Requirements for an Ambient Interior Lighting System for Motor Vehicles*, Utz, Wiss **2003**.

- [10] Dieter Gulde, *Infotainment-Bedienung im Test: Welches Bediensystem ist am besten?* **2016**.
- [11] Michael Böhm, *Adaptive Frontbeleuchtungssysteme im Kraftfahrzeug: Ein Beitrag zur nächtlichen Verkehrssicherheit?*, *Dissertationsschrift*, Technische Universität Chemnitz **2012**.
- [12] C. Diem, *Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr*, Darmstädter Lichttechnik, Utz, München **2005**.
- [13] K. Wagner, H.-J. Wagner, *Handbuch der Verkehrsmedizin: Die psychologischen Grundlagen der Anforderung im Straßenverkehr*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **1968**.
- [14] E. B. Goldstein, *Wahrnehmungspsychologie: Der Grundkurs*, 9th ed., Springer **2015**.
- [15] Berndt Gramberg-Danielsen, *Sehen und Verkehr*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York **1967**.
- [16] G.W. Robertson, John Yudkin, *Journal of Physiology*, 1944 (103), 1 – 8.
- [17] P. Kirchoff, *Städtische Verkehrsplanung: Konzepte, Verfahren, Maßnahmen*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden **2002**.
- [18] Statistisches Bundesamt (DESTATIS), *Unfallgeschehen in Abhängigkeit von Lichtverhältnissen*.
- [19] Hella GmbH & Co. KGaA, *Adaptive Frontlight System* **2012**.
- [20] Osram-Group, *Laserlicht verdoppelt Scheinwerfer-Reichweite auf 600m: Lichttechnologie von Osram sorgt für mehr Sicherheit* **2017**.

- [21] Prof. Dr. Cornelius Neumann, *Optische Technologien im Automobil: Unterlagen zur Vorlesung*, Karlsruhe **2015**.
- [22] Hector Fratty, *Adaptive Driving Beam: State of the Art Report* **2016**.
- [23] Cadillac.de, *CT6 Limousine: Konfigurator*, <https://www.cadillac.de/modelle/pkw/ct6-sedan/uebersicht.html> **2019**.
- [24] gmauthority, *General Motors Night Vision Technology*, <http://gmauthority.com/blog/gm/general-motors-technology/gm-safety-technology/gm-active-safety-technology/gm-night-vision-technology/>.
- [25] BMW Group, *Konfigurator des BMW 8er Coupé*, <https://www.bmw.de/de/ssl/configurator.html> **2019**.
- [26] Katrin Pudenz, *BMW Night Vision: frühzeitige Tiererkennung durch Dynamic Light Spot*, <https://www.springerprofessional.de/automobil--motoren/bmw-night-vision-fruehzeitige-tiererkennung-durch-dynamic-light-/6586870> **2013**.
- [27] Audi AG, *Konfigurator des Audi A8: Nachtassistent*, <https://www.audi.de/de/brand/de/neuwagen/a7/a7-sportback/ausstattung.html> **2019**.
- [28] Audi Technology Portal, *Night Vision Assistant*, <https://www.audi-technology-portal.de/en/electrics-electronics/driver-assistant-systems/night-vision-assistant> **2011**.
- [29] Daimler AG, *Konfigurator der MB S-Klasse: Nachtsicht-Assistent Plus*, <https://www.mercedes-benz.de/passengercars/content-pool/tool-pages/car-configurator.html/> **2019**.

- [30] Mercedes-Benz-Downtowncalgary.ca, *Night View Assist Overview*, <https://www.mercedes-benz-downtowncalgary.ca/2017/08/09/night-view-assist/> **2017**.
- [31] Thomas Krinner, *Funktionalität aktueller IR-Kameras in der Automobilindustrie, Gespräch*, München **2019**.
- [32] ADAC, *Fahrerassistenzsysteme: Nachtsichtsysteme* **2011**.
- [33] T. D. Schneider, *Markierungslicht - Eine Scheinwerferlichtverteilung zur Aufmerksamkeitssteuerung und Wahrnehmungssteigerung von Fahrzeugführern, Dissertation*, Technische Universität Darmstadt **2010**.
- [34] C. Jebas, *Physiologische Bewertung aktiver und passiver Lichtsysteme im Automobil*, Spektrum der Lichttechnik, Vol. 1, Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; KIT Scientific Publ, Hannover, Karlsruhe **2012**.
- [35] Dr. Heinz-Bernhard Abel, Guido Meier-Arendt, *Zukünftige Fahrerinformationssysteme im Kraftfahrzeug: Der Beitrag des Human Machine Interfaces (HMI) zur informatorischen Fahrerassistenz*.
- [36] nordic-market.de, *Continental: HMI - neue Informationsqualität und neue Darstellungsweisen entlasten den Fahrer*, https://www.nordic-market.de/news/10118/continental_hmi_-_neue_informationsqualitaet_und_neue_darstellungsweisen_entlasten_den_fahrer.htm **2013**.
- [37] A. Biermann, *Gefahrenwahrnehmung und Expertise: Möglichkeiten der Erfassung und Eignung als Prädiktor des Verunfallungsrisikos junger Fahranfänger, Dissertation*, Universität Erfurt **2007**.

- [38] Willelm Vlakveld, Nicole van Nes, Jonathan de Bruin, Luuk Vissers, Merle van der Kroft, *Situation awareness increases when drivers have more time to take over the wheel in a Level 3 automated car: A simulator study*, Transportation Research Part F **2018**.
- [39] Blaze, *Blaze Laserlight Junction*, Bielefeld, https://radmarkt.de/sites/default/files/field/image/galerie/blaze-laserlight-junction-01_crop_800pxwide.jpg (26.05.2019).
- [40] BMW Group, *Preisliste des BMW X7: Welcome Light Carpet*, https://www.bmw.de/content/dam/bmw/marketDE/bmw_de/new-vehicles/pdf/Preisliste_G07_IV.pdf.asset.1562680087865.pdf.
- [41] Jaguar.de, *Konfiguratur e-Pace*, https://buildyour.jaguar.com/jag2/r/specpack/_/de_de/e-pace_k20/4lelg/a-200p-a-awd_a-e-pace/.
- [42] Daimler AG, *Konfigurator des MB GLC: Umfeldbeleuchtung in den Außenspiegeln*, <https://www.mercedes-benz.de/passenger-cars/content-pool/tool-pages/car-configurator.html/carconfig?rccVehicleModelId=2533811> **2019**.
- [43] Mercedes-Benz.de, *Angebote Logo-Beleuchtung*, <https://www.mercedes-benz.de/passengercars/being-an-owner/aktuelle-angebote/ueberblick/beleuchteter-stern.html>.
- [44] Mini.de, *Excitement-Paket im Mini*, https://www.mini.de/de_DE/home/accessories/mini-excitement-paket.html.
- [45] UNECE, *R113: UNECE/R113* **2012**.
- [46] UNECE, *R112: UNECE/R112* **2012**.
- [47] Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz, *StVZO* **2017**.

- [48] A. Z. Krahnstöver, *Licht führt!?: Konzeption und Evaluation von Fahrmanöverunterstützung durch lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden **2017**.
- [49] M. Hamm, W. Huhn, Reschke J., *Ideas for Next Lighting Generations in Digitalization and Autonomous Driving*, SAE Technical Paper Series **APR. 10, 2018**.
- [50] Patric Jahn, *Ablenkpotential eines Baustellenlichtes auf andere Verkehrsteilnehmer*, LuxJunior, Dörnfeld **2017**.
- [51] M. H. L. Sorokin, *A new traffic participant and its language*, ISAL 2017 Proceedings, Darmstadt **2017**.
- [52] Johannes Reschke, *Symbolische Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion*, VDI-Berichte Nr. 2323, Karlsruhe **2018**.
- [53] L. STANLEY ELECTRIC CO., *Simplified road projection icon for all traffic participants*, GTB Forum on ADS Lighting, The Hague **2018**.
- [54] Infernal Innovations, *How Head-up Displays in Cars will help in reducing Car Accidents?* **2015**.
- [55] Daniel Riedl, *Einfluss eines Ambient Beleuchteten Fahrzeuginnenraums auf das Kontrastsehvermögen*, Studienarbeit, Universität Karlsruhe **2007**.
- [56] Dr. Britta Kanacher, *Vermeiden Sie Missverständnisse durch Handzeichen: Daumen hoch*, <https://www.experto.de/arbeits-be-ruf/vermeiden-sie-missverstaendnisse-durch-handzeichen-daumen-hoch.html>.

- [57] Hitchwiki.org, *Handzeichen: Daumen*, <https://hitchwiki.org/de/Handzeichen> **2013**.
- [58] Daimler AG, *Weltpremiere in der Mercedes-Maybach S-Klasse: DIGITAL LIGHT: Das Licht der Zukunft kommt auf die Straße* **2018**.
- [59] P. Ansorg, J. Hager, O. Woisetschläger, M. Seitz, A. Stölzer, P. Jahn, T. Mitterlehner, B. Reisinger C. Bemmer, *Advantages of Laser Scanners for Automotive Headlamps* **2016**.
- [60] Hella GmbH & Co. KGaA, *Liquid Crystal HD: The Art of Light*, <https://www.hella.com/hella-at/de/Scheinwerfer-1120.html> **2017**.
- [61] ZKW Group, *Die Zukunft des Lichts: Mit Innovationen in die Zukunft*, <https://zkw-group.com/home/produkte-und-innovationen/die-zukunft-des-lichts/>; **2019**.
- [62] X. Morel, S. Sommerschuh, H. El Idrissi, B. Reiss, *From discrete glare free to full HD lighting*, Vision Proceedings, Paris **2016**.
- [63] Automotive Lighting Reutlingen GmbH, *Digital Light: Millions of Pixels on the Road* **2018**.
- [64] Audi Technology Portal, *Matrix LED-Scheinwerfer* **2019**, <https://www.audi-technology-portal.de/de/elektrik-elektronik/lichttechnologie/matrix-led-scheinwerfer> (01.10.2019).
- [65] Daimler AG, *Es werde Licht: Die LED-Scheinwerfer der neuen E-Klasse.*, <https://www.mercedes-benz.com/de/innovation/es-werde-licht-die-led-scheinwerfer-der-kuenftigen-e-klasse/> **2019**.

- [66] BMW Group, *BMW leuchtet in die Zukunft*, <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0176448DE/bmw-leuchtet-in-die-zukunft> **2014**.
- [67] GTB Gremium, *Forum on Light and Light-Signalling Innovation: Gesprächsnotizen* **2016**.
- [68] UNECE, *R123: UNECE/R123* **2016**.
- [69] Leonie Siebel, Kontrastwahrnehmung einer hochaufgelösten Lichtfunktion in Abhängigkeit der Ortsfrequenz, Karlsruher Institut für Technologie **2019**.
- [70] Marion Mangold, *Wahrnehmungspsychologie, persönliches Gespräch*, München **2016**.
- [71] T. Stemmler, *Ultraschnelle Objekterkennung innerhalb natürlicher Szenen*, Diplomica-Verl., Hamburg **2009**.
- [72] Uwe Fachinger, *Alter und Technikeinsatz: Zu Unterschieden von Technikaffinität und deren Bedeutung in einer alternden Gesellschaft, Mediatisierung der Gesellschaft? Mediensoziologische Forschung in vergleichender Perspektive*, Köln **2010**.
- [73] Reto U. Schneider, *NZZ Folio, 2006 (01/2006)*.
- [74] ADAC, *ADAC Warndreieck*, <https://www.adac-shop.de/ADAC-Artikel/ADAC-Warndreieck.html> **2019**.
- [75] Mariron, *Mario Kart Speed Boost*, <https://gifer.com/en/1Sxq>.
- [76] Polizei Magdeburg, *Beide Augen zugeedrückt: kein Bußgeld für Kreativität, Warndreieck wäre die bessere Wahl* **2016**, https://twitter.com/Polizei_MD/status/770535482702921728?ref_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etweetembed&ref_url=https%3A%2F%2Fwww.tagesspiegel.de%2Fges

- ellschaft%2Fpanorama%2Fsachsen-anhalt-polizei-beein-
druckt-von-warndreieck-aus-paprika%2F14477360.html
(30.05.2019).
- [77] I. Cristea, Kontrastbestimmung neuartiger Lichtfunktionen, *Master Thesis*, Karlsruher Institut für Technologie **2017**.
- [78] Izumi Ohzawa, *Contrast Sensitivity and Campbell-Robson CSF Chart*, http://ohzawa-lab.bpe.es.osaka-u.ac.jp/ohzawa-lab/izumi/CSF/A_JG_RobsonCSFchart.html **2005**.
- [79] BMVI, *RSA: Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen*, Verkehrsblatt Verlag, Dortmund **2002** (B 5707).
- [80] Kraftfahrt-Bundesamt, *PKW Markt Deutschland - Neuzulassungen 1. Quartal 2017* **2017**.
- [81] Webbaviation.de, *Luftbild Hockenheimring Baden-Württemberg*, <https://www.webbaviation.de/galerie/picture.php?/2839/category/121> **2017**.
- [82] Patric Jahn, *Leuchtdichtebild Malerfließ auf Asphalt* **2019**.
- [83] Experte, *Nutzung und Möglichkeiten von LIDAR-Systemen*, München **2017**.
- [84] Luminar, *Website Luminartech.com*, <https://www.luminartech.com/technology/index.html> **2019**.
- [85] Patrick Schäfer, *Sensorik, SpringerProfessional* **2018**, 2018.
- [86] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Verordnung über die Zulassung von Personen zum Straßenverkehr (Fahrerlaubnis-Verordnung - FeV) Anlage 6 (zu den §§ 12, 48 Absatz 4 und 5) Anforderungen an das Sehvermögen: FeV Anlage 6*.
- [87] Robert Bosch GmbH, *Marktstudie Sicherheitssysteme: Kennen Autofahrer ihre Schutzengel?*, Ditzingen **2003**.

- [88] G. E. Gignac, E. T. Szodorai, *Personality and Individual Differences* **2016**, 102, 74 – 78. DOI: 10.1016/j.paid.2016.06.069.
- [89] Martina Gasparova, Der Einfluss eines überraschenden Farbwechsels auf Reaktionszeit, Augenfixation und visuelle Suchstrategie zum Zielreiz, *Diplomarbeit*, Universität Wien **2013**.
- [90] Jens Petersen, *Wichtige Bremsverzögerungswerte*, <http://www.unfallaufnahme.info/content/uebersichten-listen-und-tabellen/geschwindigkeiten-und-bremswege/> **2019**.
- [91] Wetter.de, *Klima Weltweit: Durchschnittstemperaturen*, <https://www.wetter.de/cms/klima.html> **2019**.
- [92] Hella GmbH & Co. KGaA, *Produkte & Services: Scheinwerfer*, <https://www.hella.com/hella-com/de/Scheinwerfer-620.html>; **2019**.
- [93] Automotive Lighting Reutlingen GmbH, *Innovative lighting functions by Automotive Lighting*, <https://www.al-lighting.com/technology/frontlighting/> **2019**.
- [94] Mercedes Benz Deutschland, *MULTIBEAM LED: Scheinwerfer in der neuen E-Klasse* **2016**.
- [95] Hendrik Härter, *Neue LED-Matrixscheinwerfer passen sich automatisch ihrer Umgebung an* **2018**.
- [96] Alfred Vollmer, *Software-Anteil steigt: LED-Scheinwerfer: Mit Pixellicht und Laserscanner*, <https://www.all-electronics.de/led-frontscheinwerfer-pixellicht-und-laserscanner/> **2017**.

- [97] Simon Thaler, *LED-Prototyp der Eviyos revolutioniert intelligente Scheinwerfer* **2017**.
- [98] Stefan Groetsch, Stefan Seidel, *LED-Pixelscheinwerfer im täglichen Einsatz auf der Straße*, <https://www.next-mobility.news/led-pixelscheinwerfer-im-taeglichen-einsatz-auf-der-strasse-a-799350/> **2019**.
- [99] Texas Instruments Incorporated, *The Digital Micromirror Device: A Historic Mechanical Engineering Landmark*, Plano, Texas **2008**.
- [100] ScanLab, *Se Encoder Modul*, Puchheim, https://www.scanlab.de/sites/default/files/SCANLAB_se_encoder_modul_300dpi.jpg.
- [101] Ampnet, *Förderprojekt iLaS: Der Scheinwerfer der Zukunft*, <https://www.automobil-industrie.vogel.de/foerderprojekt-ilas-der-scheinwerfer-der-zukunft-a-487857/> **2015**.
- [102] Acer, *VL7860*, <https://www.acer.com/ac/de/DE/content/model/MR.JPX11.001>.
- [103] Steven W. Depp, Webster E. Howard, in *Spektrum der Wissenschaft*, Vol. 5.
- [104] Werner Kösters, *VOLIFA2020: Volladaptive Lichtverteilung für eine intelligente, effiziente und sichere Fahrzeugbeleuchtung*, <https://www.photonikforschung.de/projekte/beleuchtung-und-led/projekt/volifa2020.html> **2014**.
- [105] Ulrike Kuhlmann, *Blendfreie Sicht dank LCD-Scheinwerfer*, <https://www.heise.de/ct/artikel/Blendfreie-Sicht-dank-LCD-Scheinwerfer-3725940.html> **2017**.

- [106] Andreas Pfeffer, *Digitalisierung der Beleuchtungstechnik: Hella setzt LCDs im LED-Scheinwerfer ein*, <https://www.elektroniknet.de/elektronik-automotive/assistentensysteme/hella-setzt-lcds-im-led-scheinwerfer-ein-143038-Seite-3.html> **2017**.
- [107] ZKW Group, *HDL Prototype: DLP Gen. 2.0* **2018**.
- [108] BMW PressClub, *BMW Laserlight and BMW Selective Beam (Glarefree High Beam Assistant): Lichtkanal*, München **2014**.
- [109] Markus Jordans, *Digital Light System kommt als Kleinserie für Maybach-Kunden* **2018**.
- [110] Valeo, *Valeo and Cree demonstrate the first complete high definition LED array solution for automotive lighting systems at CES* **2019**.

B.2 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
ADB	Adaptive Driving Beam
ADTF	Automotive Data and Time-Triggered Framework
AFS	Adaptive Frontlighting System
AL	Abblendlicht
BaST	Bundesamt für Straßenwesen
BEL	Bedieneinheit Licht
BFS	Bundesamt für Statistik der Schweiz
Bspw.	Beispielsweise
CAN	Controller Area Network
dGPS	Differential global positioning System
DMD	Digital Mirror Device
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
Etc	Et cetera
FeV	Fahrerlaubnisverordnung

ANHANG

FL	Fernlicht
G12	BMW 7er Baujahr 2017
HMI	Human-Machine-Interaction
HUD	Head Up Display
Kfz	Kraftfahrzeug
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light-emitting Diode
LIDAR	Light detection and ranging
MEMS	Micro Electro-Mechanical System
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
RADAR	Radio detection and ranging
StVO	Straßenverkehrsordnung
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
T	Temperatur
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
u.W.	Und Weitere
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
USB	Universal Serial Bus

VERZEICHNISSE

Usw	Und so weiter
v.a.	Vor allem
VGA	Video Graphic Array

B.3 EINHEITENVERZEICHNIS

Cd/m ²	Candela pro Quadratmeter	Leuchtdichte
M	Meter	Distanz
Km/h	Kilometer pro Stunde	Geschwindigkeit
Hz	Herz	Taktung
°	Grad	Winkel
°/s	Grad pro Sekunde	Lenkgeschwindigkeit
Δ	Delta	Different
°C	Grad Celsius	Temperatur
Lx	Lux	Beleuchtungsstärke
Lm	Lumen	Lichtstrom
W	Watt	Energiebedarf

B.4 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1 Vergleich der Innenbeleuchtung eines Mercedes Benz A-Klasse des Baujahrs 1999 (A) und des Modells von 2018 (B).	5
Abbildung 2.2 Bei einem Test der „Auto-Motor-und-Sport“ erfasste Blickbewegungen von Autofahrern in neuen Fahrzeugen.	7
Abbildung 2.3 Schematische Darstellung des Sichtfelds bei Tag (A, grün gestricheltes Oval) und bei Nacht auf die jeweiligen Lichtkegel der Scheinwerfer reduziert mit Abblendlicht (B) und mit Fernlicht (C).	9
Abbildung 2.4 Sicht aus einem Mercedes Benz C-Klasse mit HUD.	18
Abbildung 2.5 Projektionen im Straßenverkehr.	24
Abbildung 2.6 Diverse Anzeigen im Innenraum.	29
Abbildung 3.1 Die gewählten Symbol-Gruppen zur Untersuchung des intuitiven Verständnisses durch Probanden in der Simulator-Studie.	41
Abbildung 3.2 Fotografie der simulierten Fahrsituation und Position des Probanden während der Studie.	46
Abbildung 3.3 Befragungsdiagramm mit Antwortstrang während der Simulator-Studie nach	

Erkennen eines Symbols durch den Probanden.	48
Abbildung 3.4 Zusätzlich zum Freitext vorgegebene Antwortmöglichkeiten bei der Wahl einer Reaktion.	49
Abbildung 3.5 Bei Wahl einer (jeden) Reaktion vorgegebene Antwortmöglichkeiten bei der Interpretation eines Symbols.	50
Abbildung 3.6 Darstellung der Kreis-Projektion auf der Fahrbahn während der Simulator-Studie.	54
Abbildung 3.7 Darstellung der Dreieck-Projektionen in der Simulator-Studie: Das sich in Fahrtrichtung aufweitende Dreieck (A) und das in Fahrtrichtung verjüngende Dreieck (B).	56
Abbildung 3.8 Verkehrszeichen „Vorfahrt gewähren“	56
Abbildung 3.9 Das Warndreieck als häufig anzutreffendes Symbol im Straßenverkehr: ein rotes, nach oben hin ver- jüngendes Dreieck zeigt Gefahren im weiteren Fahrbahnverlauf an.	57
Abbildung 3.10 Sich in Fahrtrichtung verjüngende Dreiecke als beschleunigende Elemente im Spiel „Mario Kart“	57
Abbildung 3.11 Darstellung der vier Projektionen eines Rechtecks in der Simulator-Studie: parallel zur Fahrtrichtung ausgerichtet (A), quer zur Fahrtrichtung (B), links- (C) und rechtsgeneigt (D).	58

VERZEICHNISSE

Abbildung 3.12 Darstellung der Linien parallel zur Fahrbahn in der Simulator-Studie.....	61
Abbildung 3.13 Verteilung der 105 gegebenen Antworten bei den parallelen zur Fahrbahn projizierten Linien.....	62
Abbildung 3.14 Interpretationen der Projektion parallel zur Fahrbahn ausgerichteter Linien ohne und mit vorher angegebener Reaktion.	63
Abbildung 3.15 Darstellung der Linien quer zur Fahrbahn in der Simulator-Studie.	65
Abbildung 3.16 Verteilung der 105 gegebenen Antworten zur Reaktion bei zur Fahrbahn quer ausgerichteten Linien.	66
Abbildung 3.17 Interpretationen der Projektion quer zur Fahrbahn dargestellten Linien ohne und mit vorher angegebener Reaktion.	67
Abbildung 3.18 Darstellung der linksgeneigten (A) und der rechtsgeneigten (B) Linien-Projektionen in der Simulator-Studie.	69
Abbildung 3.19 Verteilung der 105 gegebenen Antworten zur Reaktion auf die nach links- (A) und rechtsgeneigten Linien (B).	70
Abbildung 3.20 Angaben zur Interpretation der links- (jeweils links) und rechtsgeneigten (jeweils rechts) Linien in der Simulator-Studie.	71
Abbildung 3.21 Ersatz-Warndreieck:.....	76
Abbildung 3.22 In Studie 1 gewählten, parallelen Linien (eingerahmte Symbole wurden in der Feldstudie verwendet).	81

Abbildung 3.23 Ein Teil der aus der Simulator-Studie bekannten Interpretationsmöglichkeiten der verschiedenen Symbole bei Wahl einer Reaktion, die als Grundlage zur Erstellung der Hindernisse in der Feldstudie dienten.	82
Abbildung 3.24 Acer Projektor in einem angepassten Rack zur Montage im Testfahrzeug (A, hier kopfüber gelagert) und Versuchsfahrzeug mit im Rack eingebundenem Projektor (B).....	87
Abbildung 3.25 Erstellte Oberfläche zur Bedienung des Projektors und Synchronisierung der Messwerte während der Fahrt.....	89
Abbildung 3.26 Luftaufnahme des Hockenheimrings mit gewählter Streckenführung für den Feldtest.....	91
Abbildung 3.27 Schematische Darstellung der Engstellen-Situation.....	91
Abbildung 3.28 Leuchtdichteaufnahme eines Stücks Malerflies auf Straßenasphalt.	92
Abbildung 3.29 Leuchtdichteaufnahme des Engstellenlichts auf LED-Abblendlicht.	94
Abbildung 3.30 Aufgezeichnete GPS-Daten einer Gesamtdurchfahrt eines Probanden.	103
Abbildung 3.31 Aufbau der Baustelle am Tag (A) und während der Probandenstudie bei Nacht	105
Abbildung 3.32 Hindernisse zum Ausweichen (A) und Bremsen (B) während der Probandenstudie mit statischer Projektion vor dem Fahrzeug	106

VERZEICHNISSE

Abbildung 3.33 Geschwindigkeitsverlauf eines Probanden in der Baustellen-Situation ohne (Runde 1 und 3) und mit Linien (Runde 2 und 4).....	115
Abbildung 3.34 Ausschnitt der Spurführung eines Probanden in der Baustelle ohne (Runde 1 und 4) und mit statischen Linien (Runde 2 und 3).....	117
Abbildung 3.35 Antworten der Probanden aus dem subjektiven Fragebogen nach der Probandenstudie. Angaben in Prozent.....	122
Abbildung 3.36 Schematische Darstellung der Reaktions- und Anhaltepunkte in der ersten Runde bei Fahrt mit Abblendlicht (A) und mit zusätzlichen statischen Linien (B).	127
Abbildung 3.37 Geschwindigkeit vor dem Brems-Hindernis am Beispiel eines Probanden mit reinem Abblendlicht (Runde 1 & 3) und mit AL + statischen Linien(Runde 2&4).....	132
Abbildung 3.38 Antworten von insgesamt 82 Probanden nach der fahrdynamischen Untersuchung zum subjektiv empfundenen Wert des Frühwarnsystems zum Ausweichen über Projektion von schrägen Linien.	137
Abbildung 3.39 Beispielhafte Darstellung der Lenkbewegungen an den Hindernissen.....	142
Abbildung 3.40 Reaktionspunkte der Ausweich-Situation mit Abblendlicht (rechts) und bei Abblendlicht und statischen Linien (links).....	143
Abbildung 3.41 Lenkbewegungen (A) und Geschwindigkeiten (B) vor dem Ausweich-Hindernis am	

Beispiel eines Probanden mit statischen Linien und ohne.	147
Abbildung 3.42 Vergleich der Reaktionsdistanzen abhängig von der Runde in Gruppe 4: Fernlicht - Abblendlicht + statische Linien.	153
Abbildung 3.43 Antworten von insgesamt 82 Probanden nach der fahrdynamischen Untersuchung zum subjektiv empfundenen Wert des Frühwarnsystems mit quer zur Fahrbahn projizierten Linien.	155
Abbildung 3.44 Mögliche Auflösung einer Matrix-Licht- Verteilung bei gleichmäßiger Verteilung des LEDs (A) und Ansicht auf ein LED- Panel mit 84 einzeln ansteuerbaren LEDs (MB E-Klasse (Baujahr 2016)).	168
Abbildung 3.45 Mögliche Auflösung einer Lichtverteilung bei Einsatz von insgesamt vier Eviyos-Hybrid- Chip (je einem für Abblend- und Fernlicht pro Scheinwerfer).	170
Abbildung 3.46 Funktionsweise eines DMD-Moduls. <i>Bild:</i> Texas Instruments	171
Abbildung 3.47 Darstellung eines scannenden Laserprojektionsmoduls in eindimensionaler Ausführung.	172
Abbildung 3.48 Schematische Darstellung der Lichtleitung vor einem LCD-Modul. <i>Bild:</i> Hella	175
Abbildung 3.49 CAD-Darstellung eines DMD-Moduls von ZKW welches spiegelsymmetrisch je Scheinwerfer verbaut wird..	178

VERZEICHNISSE

Abbildung 3.50 CAD-Darstellung des im linken G12- Scheinwerfer integrierten DMD-Moduls.	179
Abbildung 3.51 Linker DMD-LED-Hybrid-Scheinwerfer eingebaut in einen G12. mit eingeschaltetem DMD-Modul.....	181
Abbildung 3.52 Benutzeroberfläche zur Steuerung des DMD- Projektionsmoduls im Prototyp. Der grüne Kasten umfasst die für die Studie direkt relevanten Funktionen der Oberfläche.	183
Abbildung 3.53 Photographie aus Fahrersicht der über das DMD-Zusatzmodul dargestellten Fahrzeugbreitendarstellungen.....	185
Abbildung 3.54 Leuchtdichteaufnahme: Falschfarbendarstellung in cd/m^2 der vom Prototypen erzeugten Lichtverteilung mit zwei parallelen Linien als Fahrzeugbreitendarstellung.....	187
Abbildung 4.1 Seitliche Betrachtung der Projektionen im Ausweich-Fall aus der Studie 2.	195
Abbildung 4.2 Kamerabild der Projektionen im Ausweich-Fall aus Studie 2 im Lichtkanal der BMW AG aus Position eines entgegenkommenden Fahrers.....	196
Abbildung 6.1 Frage 1 in Studie 1 nach Erkennen eines Symbols (Frage nach Reaktion: ja/nein).....	254
Abbildung 6.2 Start-Seite zur Bewertung einer erkannten Lichtfunktion.....	254
Abbildung 6.3 Interpretation: Frage 2 nach Auswahl "nein" in Frage 1 (Wieso „nein“?).	255

Abbildung 6.4 Reaktion: Frage 2 nach Auswahl "ja" in Frage 1 (welche Reaktion?).	255
Abbildung 6.5 Interpretation: Frage 3 bei Auswahl "ja" in Frage 1 (wieso entsprechende Reaktion?).....	256
Abbildung 6.6 Darstellung des Kreis-Symbols in Positivkontrast in der Simulation.	266
Abbildung 6.7 Darstellung des in Fahrtrichtung (vom Fahrzeug weg) aufweitenden Dreiecks in Positivkontrast in der Simulation.	268
Abbildung 6.8 Darstellung des in Fahrtrichtung (vom Fahrzeug weg) verjüngenden Dreiecks in Positivkontrast in der Simulation.	270
Abbildung 6.9 Darstellung des in Rechtecks parallel zur Fahrbahn in Positivkontrast in der Simulation.	272
Abbildung 6.10 Darstellung des in Rechtecks quer zur Fahrbahn in Positivkontrast in der Simulation.	274
Abbildung 6.11 Darstellung des linksgeneigten Rechtecks in Positivkontrast in der Simulation.	276
Abbildung 6.12 Darstellung des rechtsgeneigten Rechtecks in Positivkontrast in der Simulation.	278
Abbildung 6.13 Darstellung der Linien parallel zur Fahrbahn in Positivkontrast in der Simulation.	280
Abbildung 6.14 Darstellung der Linien quer zur Fahrbahn in Positivkontrast in der Simulation.	282
Abbildung 6.15 Darstellung der linksgeneigten Linien in Positivkontrast in der Simulation.	284

VERZEICHNISSE

Abbildung 6.16 Darstellung der rechtsgeneigten Linien in Positivkontrast in der Simulation.....	286
Abbildung 6.17 Darstellung des Abblendlichts in der Simulator-Studie.....	288
Abbildung 6.18 Darstellung der Simulation der Fahrt ohne Fahrzeuglicht bei leicht bewölktem Nachthimmel.....	290
Abbildung 6.19 Falschfarbendarstellung der Leuchtdichteaufnahme in cd/m^2 der Fahrzeugbreitendarstellung.....	309
Abbildung 6.20 Farbaufnahme der Fahrzeugbreitendarstellung.....	309
Abbildung 6.21 Falschfarbendarstellung der Leuchtdichteaufnahme in cd/m^2 der Auffahrwarnung.....	310
Abbildung 6.22 Farbaufnahme der Auffahrwarnung.....	310
Abbildung 6.23 Falschfarbendarstellung der Leuchtdichteaufnahme in cd/m^2 der Vorwarnung eines Ausweich-Szenarios.....	311
Abbildung 6.24 Farbaufnahme der Vorwarnung eines Ausweich-Szenarios.....	311
Abbildung 6.25 Vorschlag zur Darstellung einer gesetzlichen Regelung für projektionsbasierte Fahrerassistenzsysteme.....	313

B.5 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1 Übersicht der für die vorliegende Arbeit relevanten,
auf dem Markt verfügbaren Systeme mit
zugrundeliegenden Technologien mit deren
Nutzen und Schwächen..... 23

Tabelle 3.1 Die Ausrichtung der verschiedenen
Symbolgruppen in Abhängigkeit der
Reaktionsmöglichkeiten des Fahrers
während der aktiven Fahrt. 43

Tabelle 3.2 Definition der Gruppen und der darin
untersuchten Einflüsse unterschiedlicher
Varianten. Die Zuordnung zu den
Gruppen erfolgte zufällig..... 100

Tabelle 3.3 Ergebnisse der Gruppe 1 mit 32 Teilnehmern: 111

Tabelle 3.4 Ergebnisse der Gruppe 1 mit 32 Teilnehmern: 113

Tabelle 3.5 Darstellung des Lerneffekts abhängig von
Reihenfolge der Lichtverteilung am
Beispiel der durchschnittlichen
Geschwindigkeit in der Baustelle..... 114

Tabelle 3.6 Ergebnisse der Gruppe 1 mit 29 Teilnehmern: 126

Tabelle 3.7 Ergebnisse der Gruppe 1 mit 29 Teilnehmern: 130

Tabelle 3.8 Ergebnisse der Gruppe 1 mit 27 Teilnehmern: 144

Tabelle 3.9 Ergebnisse der Gruppe 1 mit 27 Teilnehmern: 145

Tabelle 3.10 Anforderungen an die Technologie des
Scheinwerfersystems zur Darstellung von

VERZEICHNISSE

Projektionen als Teil eines Fahrerassistenzsystems.....	166
Tabelle 3.11 Vergleich der bewerteten Technologien.	176
Tabelle 6.1 Ergebnisse der Studie 1 bezüglich der genannten Reaktionen beim Aufleuchten der einzelnen Symbole.....	293
Tabelle 6.2 Ergebnisse der Studie 1 bezüglich der genannten Interpretationen der aufleuchtenden Symbole unabhängig von der jeweils gewählten Reaktion.....	294
Tabelle 6.3 Beispielhafte Werte zur gesetzlichen Normierung projektionsbasierter Fahrzeugbreitendarstellungen.	314

Anhang C: ANSCHREIBEN, INFORMATIONEN- UND FRAGEBÖGEN

C.1 FRAGEBÖGEN DER STUDIE 1

Im Folgenden sind die Fragebögen und Probandeninformationsbögen chronologisch nach Bearbeitung durch die Probanden aufgelistet.

C.1.1 ANSCHREIBEN FÜR STUDIE 1



Einladung zu einer Probandenstudie

Sehr geehrte Kolleginnen und Kollegen,

die Abteilung EK-511 ist verantwortlich für die Funktionen und die Vorentwicklung in der Lichttechnik. Im Rahmen meiner Dissertation bei EK-511 werde ich eine Probandenstudie durchführen, um die Möglichkeiten der Kommunikation mit dem Fahrer anhand von verschiedenen Projektionen im Abblendlicht vor dem Fahrzeug zu untersuchen. Die Studie wird in unserem Nachtfahrsimulator im Lichtkanal (Gebäude 10.0 UG) durchgeführt werden und voraussichtlich etwa **eine Stunde** Ihrer Zeit in Anspruch nehmen. Nach einer kurzen Untersuchung Ihrer Augen werden Ihnen verschiedene simulierte Lichtverteilungen während der Fahrt vorgeführt, die Sie hinsichtlich ihrer Verständlichkeit bewerten sollen. Sie benötigen dafür **keinerlei lichttechnische Vorbildung** und müssen nichts vorbereiten.

Zeitraum der Studie ist **KW 31 bis KW 32**.

Wenn Sie **zwischen 28 und 40 Jahren** alt sind und mindestens seit **10 Jahren** im Besitz eines **Führerscheins** sind und Interesse haben, wenden Sie sich bitte an:

Marina Budanow (EK-711)
Mail: marina.budanow@bmw.de
Tel: 0151 601 38061

Mit freundlichen Grüßen,

Marina Budanow

C.1.2 Vorab-Fragebogen zur Aufnahme von Probandendaten

**BMW
GROUP**



Fragebogen zur Aufnahme von Probandendaten

Sehr geehrter Proband,

vielen Dank für die Teilnahme an der Studie. Zur Einschätzung Ihrer Erfahrungen bitten wir Sie, die nachfolgenden Felder auszufüllen. Ihre persönlichen Daten werden selbstverständlich vertraulich behandelt. Zur weiteren Auswertung werden Sie mit einer laufenden Nummer verwaltet.

Prob. ID: (nicht vom Probanden auszufüllen)

Persönliche Daten

Nachname: _____ Vorname: _____

Geburtsdatum: _____

Geschlecht: männlich
 weiblich (Zutreffendes ankreuzen)

Telefon: _____
(für Rückfragen)

E-Mail: _____

Sehhilfe beim Autofahren:

keine (Zutreffendes ankreuzen)
 Kontaktlinsen Brille, falls ja:
Ferne Nähe Multifokal

Ihre Fahrerfahrung (Zutreffendes ankreuzen)

Besitzen Sie ein eigenes Fahrzeug? Auto Motorrad
 sonstiges Nein

Welche Scheinwerferart hat Ihr Fahrzeug?

Halogen-Scheinwerfer Xenon-Scheinwerfer LED-Scheinwerfer Laser-Scheinwerfer weiß nicht
 Reflexionsystem Projektionsystem weiß nicht

Welche Lichtausstattung hat Ihr Fahrzeug? (Mehrfachnennungen möglich)

Fernlichtassistent blendfreies Fernlicht Tagfahrlicht Fernlicht
 Positionslicht Nebelscheinwerfer Abblendlicht statische Leuchtweitenregulierung
 dynamische Leuchtweitenregulierung Kurvenlicht Markierungslicht
 Standlicht weiß nicht

Fortsetzung auf der nächsten Seite.

Welche weiteren Sonderausstattungen hat Ihr Fahrzeug? (Mehrfachnennungen möglich)

- Head Up-Display
 Tempomat
 Spurhalteassistent
 Spurwechselwarnung
 Parkassistentensystem
 Scheinwerferwaschanlage
 Driving Assistant
 Speed Limit Info
 Klimaautomatik
 Lenkkraftunterstützung
 Komfortzugang / Smart Opener
 Navigationssystem
 weiß nicht

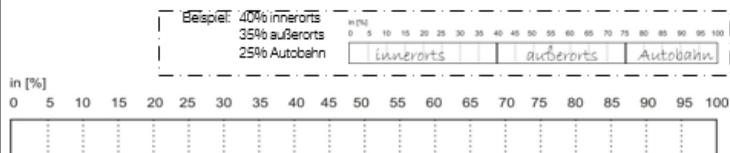
Wie hoch ist Ihre jährliche Fahrleistung?
 unter 5.000 km
 5.000 – 10.000 km
 10.000 – 20.000 km
 20.000 – 50.000 km
 über 50.000 km

Wie hoch ist ihre Fahrleistung insgesamt?
 unter 20.000 km
 20.000 – 50.000 km
 50.000 – 100.000 km
 100.000 – 200.000 km
 200.000 – 500.000 km
 über 500.000 km

Wie lange besitzen Sie Ihren Führerschein (gerundet)? ____ Jahre

Wie verteilt sich Ihre Fahrzeit in Prozent?

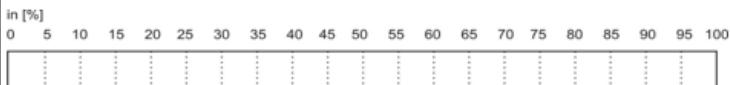
Bitte unterscheiden Sie nach **Innerorts**, **Außerorts** und **Autobahn** und markieren Sie die Anteile im Balken. Gefragt ist hier nach der Gesamtfahrleistung.



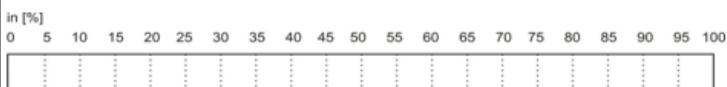
Wie verteilt sich Ihre Fahrzeit in Prozent?

Bitte unterscheiden Sie nach **hell** und **dunkel** und markieren Sie die Anteile im Balken.

Sommer:



Winter:



Ihre Erfahrung mit Studien:

Haben Sie schon einmal an einer ähnlichen Studie teilgenommen?

Nein

Ja

Wenn ja, zu welchen Themen?: _____

Nach der Durchführung auszufüllen

Wie empfanden Sie die Einweisungen durch den Versuchsleiter?

Sehr
verwirrend

Verwirrend

Eher
verwirrend

Eher
verständlich

Verständlich

Sehr
verständlich

Haben Sie schon Erfahrungen in der Lichttechnik (Arbeit, Studium, Ausbildung,...)?

Nein

Ja

Wenn ja, welche?: _____

Welche Kriterien waren die Grundlage für Ihre Bewertung der einzelnen Punkte?
(nach der Studie auszufüllen)

Anderung des Fahrverhaltens:

Interpretation der gegebenen Verkehrslage:

Optometrische Daten (nicht vom Probanden auszufüllen)

Visus: (falls vorhanden, mit Sehhilfe) Ferne: $V_{cc}(\text{rechts})$
 _____ $V_{cc}(\text{links})$: _____ $V_{cc}(\text{bin})$: _____

Nähe*: $V_{cc}(\text{rechts})$: _____ $V_{cc}(\text{links})$: _____ $V_{cc}(\text{bin})$: _____

*bezogen auf: 3m 2m 1,5m 1m 0,8m
 0,66m 0,55m 0,5m 0,4m 0,33m

Phorie:
 Punkt innerhalb des Rahmens: ja nein

Stereopsis: 35" 100" 200" 600" kein Stereosehen

Farbensinn: ok Störung, falls ja:
 Protanopie / Deutanopie Tritanopie

Kontrastsehen:
 ohne Blendung: _____ %
 mit Blendung: _____ %

C.1.3 PROBANDENINFORMATION FÜR STUDIE 1

BMW
GROUP



Probandeninformation zur Studie „Semantik des Lichts“

Lieber Proband,

vielen Dank für die Teilnahme an der Studie zum Thema „Semantik des Lichts“. In dieser Studie soll untersucht werden, wie Personen im Straßenverkehr Licht vor sich auf der Straße wahrnehmen.

Nach dem Test Ihres Sehvermögens werden Sie in unserem Nachtfahrsimulator Platz nehmen. Es handelt sich hierbei um einen statischen Fahrsimulator. Sie werden keine aktiven Lenkbewegungen o.ä. durchführen müssen. Sollten Sie aufgrund der Simulation Übelkeit verspüren, melden Sie sich beim Versuchsleiter. Dann kann die Studie unterbrochen oder beendet werden.

Es werden insgesamt 2 Termine stattfinden, in denen Ihnen jeweils 25 Lichtverteilungen gezeigt werden. Der erste Termin ist heute, der zweite wird nach der heutigen Studie mit Ihnen vereinbart.

Zu jeder Lichtverteilung wird Ihnen auf dem rechts von Ihnen befindlichen Monitor ein Fragebogen eingeblendet. Diesen beantworten Sie bitte zu jeder Lichtverteilung vollständig. Die erste Frage erscheint, nachdem Sie auf den Button ‚Bewerten‘ klicken.

Entscheiden Sie sich für eine Option, indem Sie das jeweilige Auswahlfeld markieren. Mit einem zusätzlichen Klick auf das entsprechende Feld sichern Sie Ihre Eingabe.

Nach Auswahl Ihrer Option erscheint der ‚weiter‘-Button.

Company
Steuerliche
Metatron Werke
Aktiengesellschaft
Registered address
BMW AG
Munich, Munich
Office address
Rudolf-Diesel-Str. 150
Office address
Forschungs- und
Innovationzentrum P+G
Klovenstrasse 5, 47
Telephone
Switchboard
+49 89 382-4
Fax
+49 89 382-25858
Internet
www.bmwgroup.com



Bitte drücken Sie diesen um auf die nächste Seite zu kommen.

Bank details
BMW Bank
IBAN DE20 7522 0300 0000 0000 0000 00
BIC BMWDE33HAN
Chairman of the
Supervisory Board
Norbert Heisterfer
Board of Management
Hans-Gert
Charmann
Mitglieder
Andreas
Klaus-Dieter
Friedrich
Klaus-Peter
Im Robertson
Peter
Director
Registered in
Germany
Munich HRB 162213

Wenn Sie zuvor ‚Ja‘ gewählt haben, wird die Frage aufkommen, wie Sie bei vorliegendem Signal im Realverkehr reagieren würden. Neben vier Antwortmöglichkeiten wird Ihnen auch die Option ‚Anderes‘ zur Verfügung gestellt.



Hier bitte zunächst die Option auswählen, anschließend Ihre alternative Reaktion in das Feld schreiben und mit dem Klick auf das Feld bestätigen. Es wird, wie zuvor, ein ‚weiter‘-Button erscheinen.



Im Anschluss erhalten Sie noch eine Frage nach Ihrer Auffassung der aktuell möglichen Situation im Straßenverkehr. Es geht hier rein darum, welche Verkehrslage SIE erwarten würden, wenn Ihr Fahrzeug eine solche Lichtverteilung auf die Straße vor Ihnen projiziert.



Die zu den verschiedenen Szenen angedachten Situationen sind beispielsweise wie folgt vorstellbar:

Gefahrensituation vor mir

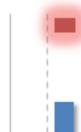
Fahrbahnverengung vor mir von rechts



Fahrbahnverengung vor mir links

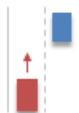


Gefahrensituation vor mir auf meiner Spur



Sich näherndes Fahrzeug

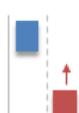
Von hinten links



Von hinten auf meiner Spur



von hinten rechts





Können Sie Ihre vorher angegebene Reaktion nicht genau klassifizieren, steht Ihnen hier noch die Option ‚weiß nicht‘ zu Verfügung. Hatten Sie eine Vorstellung von der Situation, die hier nicht in der Liste aufgeführt sind, werden Sie darum gebeten auch hier in dem Feld ‚Anderes‘ einen Freitext anzugeben.

Nach Auswahl und Bestätigung Ihrer Antwort beenden Sie die Befragung mit dem erscheinenden Button ‚Fertig‘.

Haben Sie auf Folie 2 ‚**Nein**‘ ausgewählt, werden Sie auch hier nach Ihrer Interpretation der vermutlich vorliegenden Verkehrsszene gefragt.

Welche Verkehrsszene vermuten Sie bei vorliegendem Signal?

- Alles in Ordnung
- Weiß nicht
- Anderes

Mit der Antwort „**Alles in Ordnung**“ geben Sie zu verstehen, dass Sie das Signal erkannt haben, sich in Ihrem Fahrstil bestätigt und sicher fühlen und somit keine Notwendigkeit zum Handeln sehen.

„**Weiß nicht**“ weist darauf hin, dass Sie das Signal zwar registriert haben, seine Bedeutung aber nicht genau einordnen können/ sich nicht sicher sind, was es bedeutet und somit aufgrund fehlenden Kontexts Ihre Fahrt unverändert fortsetzen würden.

Auch bei dieser Frage haben Sie die Möglichkeit einen Freitext zu formulieren um eine andere Begründung zu geben, wieso Sie Ihr Fahrverhalten in einer vergleichbaren Situation nicht ändern würden.

Wie auch zuvor beenden Sie mit dem erscheinenden Button ‚Fertig‘ die Abfrage zur gegebenen Lichtverteilung.

Fertig

Nach Beendigung der Fragen wird Ihr Bildschirm wieder dunkel und es wird eine neue Lichtverteilung eingeblendet. Diese bleibt immer so lange im Bild, bis Sie Ihre Bewertung abgegeben haben.

C.1.4 FRAGEBOGEN IN STUDIE 1

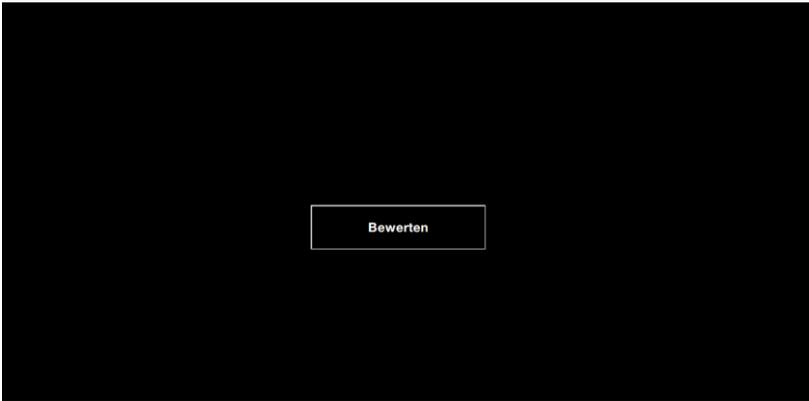


Abbildung 6.1 Start-Seite zur Bewertung einer erkannten Lichtfunktion.

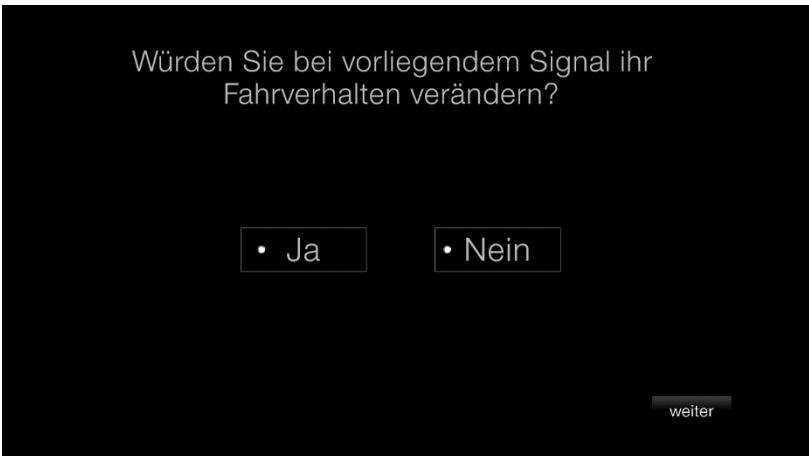


Abbildung 6.2 Frage 1 in Studie 1 nach Erkennen eines Symbols (Frage nach Reaktion: ja/nein).

Wie würden Sie bei vorliegendem Signal im Realverkehr reagieren?

- Beschleunigen
- Spurwechsel nach links
- Spurwechsel nach rechts
- Bremsen
- Anderes:

weiter

Abbildung 6.3 Reaktion: Frage 2 nach Auswahl "ja" in Frage 1 (welche Reaktion?).

Welche Verkehrsszene vermuten Sie bei vorliegendem Signal?

- Alles in Ordnung
- Weiß nicht
- Anderes:

Fertig

Abbildung 6.4 Interpretation: Frage 2 nach Auswahl "nein" in Frage 1 (Wieso „nein“?).

Welche Verkehrsszene vermuten Sie bei vorliegendem Signal?

Gefahrsituation vor mir

- Spurverengung von rechts
- Gefahrsituation vor mir auf meiner Spur
- Spurverengung von links

Sich näherndes Fahrzeug

- Sich näherndes Fahrzeug von hinten links
- Sich näherndes Fahrzeug hinter mir auf meiner Spur
- Sich näherndes Fahrzeug von hinten rechts

Anderes:

Weiß nicht

Abbildung 6.5 Interpretation: Frage 3 bei Auswahl "ja" in Frage 1 (wieso entsprechende Reaktion?).

C.2 FRAGEBÖGEN DER STUDIE 2

Im Folgenden sind Anschreiben, (Vorab-)Fragebögen und Probandeninformationsbögen der Studie 2 chronologisch in Reihenfolge der Bearbeitung durch die Probanden aufgelistet.

C.2.1 ANSCHREIBEN FÜR STUDIE 2



Einladung zu einer Probandenstudie

Sehr geehrte Damen und Herren,
liebe interessierte Probandinnen und Probanden,

im Rahmen meiner Dissertation soll eine Probandenstudie durchgeführt werden, die die Möglichkeiten der Kommunikation mit dem Fahrer anhand von verschiedenen Projektionen im Abblendlicht vor dem Fahrzeug untersucht. Die Studie findet an verschiedenen Wochentagen im Zeitraum vom 12.07.2017 – 06.08.2017 (**KW 28 bis KW 31**) auf dem **Hockenheimring** statt und wird voraussichtlich etwa **eine Stunde** Ihrer Zeit in Anspruch nehmen. Mögliche Termine liegen zwischen 21:30 Uhr (Sonnenuntergang) und 4:30 Uhr (Sonnenaufgang).

Nach einer kurzen Untersuchung Ihrer Sehkraft werden Sie darum gebeten in einem Versuchsfahrzeug die Teststrecke auf dem Hockenheimring abzufahren. Währenddessen werden fahrdynamische Daten Ihrer Fahrt aufgezeichnet, die Ihre Reaktion auf die projizierten Symbole messen. Sie benötigen dafür **keinerlei lichttechnische Vorbildung** und müssen nichts vorbereiten.

Bitte bringen Sie einen gültigen Führerschein der Klasse B mit. Die Anreise erfolgt selbstständig. Nach abgeschlossener Fahrt erhalten Sie eine Aufwandsentschädigung von **30 €**.

Bei Interesse und weiteren Fragen wenden Sie sich bitte an:

Marina Budanow
Mail: marina.budanow@partner.kit.edu
Tel: 0151 601 38061

Mit freundlichen Grüßen,
Marina Budanow

C.2.2 VORAB-FRAGEBOGEN FÜR STUDIE 2



Fragebogen zur Aufnahme von Probandendaten

Sehr geehrter Proband,

vielen Dank für die Teilnahme an der Studie. Zur Einschätzung Ihrer Erfahrungen bitten wir Sie, die nachfolgenden Felder auszufüllen. Ihre persönlichen Daten werden selbstverständlich vertraulich behandelt. Zur weiteren Auswertung werden Sie mit einer laufenden Nummer verwaltet.

Prob. ID: (nicht vom Probanden auszufüllen)

Persönliche Daten

Nachname: _____ Vorname: _____

Geburtsdatum: _____ Geschlecht: männlich
 weiblich (Zutreffendes ankreuzen)

Telefon: _____ E-Mail: _____
(für Rückfragen)

Sehhilfe beim Autofahren: keine (Zutreffendes ankreuzen)
 Kontaktlinsen Brille, falls ja:
 Fern Nähe Multifokal

Ihre Fahrerfahrung (Zutreffendes ankreuzen)

Besitzen Sie ein eigenes Fahrzeug? Auto Motorrad
 sonstiges Nein

Welche Scheinwerferart hat Ihr Fahrzeug?

Halogen-Scheinwerfer Xenon-Scheinwerfer LED-Scheinwerfer Laser-Scheinwerfer weiß nicht

Reflexionsystem Projektionsystem weiß nicht

Welche Lichtausstattung hat Ihr Fahrzeug? (Mehrfachnennungen möglich)

Fernlichtassistent blendfreies Fernlicht Tagfahrlicht Fernlicht

Positionalicht Nebelscheinwerfer Abblendlicht statische Leuchtwertenregulierung

dynamische Leuchtwertenregulierung Kurvenlicht Markierungslicht

Standlicht weiß nicht

Fortsetzung auf der nächsten Seite.



Welche weiteren Sonderausstattungen hat Ihr Fahrzeug? (Mehrfachnennungen möglich)

Head Up-Display Tempomat Spurhalteassistent Spurwechselwarnung
 Parkassistentensystem Scheinwerferwaschanlage ~~Driving Assistant~~ Speed Limit Info
 Klimaautomatik Lenkkräfteunterstützung Komfortzugang / Smart Opener
 Navigationssystem weiß nicht

Wie hoch ist Ihre jährliche Fahrleistung? unter 5.000 km 5.000 – 10.000 km
 10.000 – 20.000 km 20.000 – 50.000 km
 über 50.000 km

Wie hoch ist ihre Fahrleistung insgesamt? unter 20.000 km 20.000 – 50.000 km
 50.000 – 100.000 km 100.000 – 200.000 km
 200.000 – 500.000 km über 500.000 km

Wie lange besitzen Sie Ihren Führerschein (gerundet)? ____ Jahre

Wie verteilt sich Ihre Fahrzeit in Prozent?

Bitte unterscheiden Sie nach **Innerorts**, **Außerorts** und **Autobahn** und markieren Sie die Anteile im Balken. Gefragt ist hier nach der Gesamtfahrleistung.

Beispiel: 20% Innerorts, 35% außerorts, 25% Autobahn
 in [%] 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100
 in [%] 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100

Wie verteilt sich Ihre Fahrzeit in Prozent?

Bitte unterscheiden Sie nach **hell** und **dunkel** und markieren Sie die Anteile im Balken.

Sommer:

in [%] 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100

Winter:

in [%] 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100



Ihre Erfahrung mit Studien:

Haben Sie schon einmal an einer ähnlichen Studie teilgenommen?

Nein
 Ja

Wenn ja, zu welchen Themen?: _____

Haben Sie schon Erfahrungen in der Lichttechnik (Arbeit, Studium, Ausbildung,...)?

Nein
 Ja

Wenn ja, welche?: _____



Optometrische Daten (nicht vom Probanden auszufüllen)

Visus: (falls vorhanden, mit Sehhilfe) Ferne: V_{oo} (rechts): _____

V_{oo} (links): _____ V_{oo} (bin): _____

Nähe*: V_{oo} (rechts): _____ V_{oo} (links): _____ V_{oo} (bin): _____

*bezogen auf: 3m 2m 1,5m 1m 0,8m
 0,66m 0,53m 0,5m 0,4m 0,33m

Phorie:
 Punkt innerhalb des Rahmens: ja nein

Stereopsis: 35" 100" 200" 600" kein Stereosehen

Farbensinn: ok Störung, falls ja:
 Protanopie / Deutanopie Tritanopie

Kontrastsehen:
 ohne Blendung: _____ %
 mit Blendung: _____ %

C.2.3 INFORMATIONSBOGEN FÜR STUDIE 2



BMW
GROUP



Probandeninformationsbogen

Vielen Dank für Ihre Teilnahme an der Studie zur „Evaluierung von Lichtfunktionen“ und herzlich Willkommen am Hockenheimerling.

Im Folgenden werden Sie zunächst einem handelsüblichen Sehtest unterzogen. Wenn Ihre Sehkraft als normal oder zu normal korrigiert festgestellt wird, werden Sie zum Versuchsfahrzeug geführt.

Bei dem Versuchsfahrzeug handelt es sich um einen präparierten BMW 5er Touring mit Projektionsmodul. Bitte beachten Sie, dass dies ein Testfahrzeug ist und besonderer Handhabung bedarf. Es ist also in allen Fällen den Anweisungen des Versuchsleiters zu folgen.

Am Versuchsfahrzeug werden Ihnen die verschiedenen **Lichtsymbole** vorgestellt, die Sie beim Abfahren des Parcours erwarten. Hierbei handelt es sich zum einen um

- die Anzeige der Fahrzeugbreite in Engstellen;
- die Anzeige einer Frühwarnung zum Ausweichen/ Spurwechsel aufgrund eines Hindernisses auf einem Teil Ihrer Spur
- die Anzeige einer Frühwarnung zur Geschwindigkeitsreduktion / zum Bremsen aufgrund eines spürföhlenden Hindernisses.

Ziel des Versuchs ist die Evaluierung verschiedener fahrerassistierender Lichtfunktionen, die durch Projektionen auf die Straße den Fahrer in seiner Fahraufgabe unterstützen sollen. In verschiedenen Probandengruppen werden verschiedene Funktionen und Darstellungsarten geprüft. Die Zuordnung wie auch die Anzeige erfolgt zufällig.

Ihre Aufgabe beschränkt sich in diesem Versuch auf die reine Fahraufgabe.

Stellen Sie hierfür Ihre Sitzposition so ein, wie es für Sie angenehm ist.

Sie befahren eine vom Versuchsleiter angegebene Fahrtstrecke von insgesamt etwa 1/2 Stunde mit einer Maximalgeschwindigkeit von 80 km/h. Hierbei können Sie nach eigenem Gefühl fahren und auf die vor Ihrem Fahrzeug projizierten Symbole reagieren, wie Sie es in Ihrem eigenen Fahrzeug tun würden. Es ist jedoch stets den Anweisungen des Versuchsleiters Folge zu leisten. Widersetzen Sie sich den Anweisungen, haftet der Versuchsleiter nicht für entstandene Schäden. Kosten sind von Ihnen privat zu tragen.

Bitte sehen Sie außerdem davon ab, Foto- oder Videoaufnahmen vom Versuch oder während des Versuchs zu machen.

Nach der Testfahrt erhalten Sie noch einen kurzen Fragebogen, in dem Ihr subjektives Empfinden während der Fahrt abgefragt werden soll.

Alle erhobenen Daten werden vertraulich behandelt und nicht an Dritte weitergeleitet. Mit der Teilnahme an dieser Studie erklären Sie sich mit der Verarbeitung Ihrer personenbezogener Daten (Alter und Geschlecht) in Verbindung mit den erhobenen Daten während des Versuchs, bereit.

Bei weiteren Fragen können Sie sich gerne an die Kollegen vor Ort wenden.

Firma
Bayernische
Motoren Werke
Aktiengesellschaft
Postanschrift
BMW AG
80989 München
Hausanschrift
Bismarckring 130
Hausanschrift
Forschungs- und
Innovationszentrum (FIZ)
Kreuzstraße 147
Telefon
Zentrale
+49 89 382-0
Fax
+49 89 382-70-23858
Internet
www.bmwgroup.com
Bankkonto
Deutsche Bank
IBAN DE00 7007 0010
0123 4567 89
BIC DEUT33HAN33
Verantwortlicher
für die Aufschlüsselung
des Inhalts
Vorstand
Hans Krieger,
Vizepräsident
Mitarbeiter
Andrea
Verica Duganovic
Klaus Föhlich
Nicola Diener
Jan Robertson
Dr. Schwaninger
Oliver Kasper
...
Seite 2/2

C.2.4 ABSCHLUSSFRAGEBOGEN IN STUDIE 2



Abschlussfragebogen

zur „Validierung von assistierenden Lichtfunktionen“

Sehr geehrter Proband,

Sie haben im Lauf der letzten halben Stunde einige Lichtfunktionen während der Fahrt gesehen, die in verschiedenen Situationen verschiedene Ausführungen hatten. Bewerten Sie im Anschluss bitte, wie Sie die verschiedenen Symbole in den verschiedenen Situationen empfunden haben.

Zunächst eine kurze Frage zu dem Gesamtablauf:

Sehr verwirrend Verwirrend Verständlich Sehr verständlich

Beziehen Sie sich nun bitte auf die über den Fragen genannte Situation bzw. Darstellung. Bewerten Sie bitte spontan, welche der folgenden Aussagen am besten ihrer Meinung entspricht.

Firma
 Bayerische
 Motoren Werke
 Aktiengesellschaft
 Postanschrift
 BMW AG
 80788 München
 Hausanschrift
 Ostbahnhof 3/33
 Hausanschrift
 Forschungs- und
 Innovationszentrum (FIZ)
 Kronstraße 3/47
 Telefon
 Zentrale
 +49 89 382-0
 Fax
 +49 89 382-70-25898
 Internet
 www.bmwgroup.com
 Bankkonto
 Deutsche Bank
 IBAN 0205 7007 0030
 BIC 2512 0540 00
 BIC 251205330000

Situation 1: Engstelle / Baustelle



	Nein	Ja	Keine Aussage
Beim Einblenden der Lichtfunktion habe ich mich sicherer gefühlt			
Wenn mir diese Funktion zur Verfügung stünde, würde ich sie verwenden			
Das Aufblenden der Funktion hat mich erschreckt			
Die Funktion vor dem Fahrzeug hat mich von der Fahraufgabe abgelenkt			
Ich konnte die Fahr situation dank der Funktion besser meistern			
Beim Einblenden der Lichtfunktion habe ich mich unsicherer gefühlt.			
Diese Funktion würde ich meinen Freunden und Kollegen empfehlen			
Ich konnte die Fahr situation dank der Funktion besser meistern			

Situation 2: Ausweichen / Spurwechsel



	Nein	Ja	Keine Aussage
Beim Einblenden der Lichtfunktion habe ich mich sicherer gefühlt			
Wenn mir ein Fahrzeug mit dieser Funktion zur Verfügung stehen würde, würde ich es verwenden			
Das Aufblenden der Funktion hat mich erschreckt			
Die Funktion vor dem Fahrzeug hat mich von der Fahraufgabe abgelenkt			
Ich konnte die Fahrsituation dank der Funktion besser meistern			
Beim Einblenden der Lichtfunktion habe ich mich unsicherer gefühlt			
Diese Funktion würde ich meinen Freunden und Kollegen empfehlen			
Ich die Aussage der Funktion war intuitiv verständlich			
Die Funktion hat mich rechtzeitig darauf vorbereitet zu reagieren			

Situation 3: Bremsen / Geschwindigkeitsreduktion

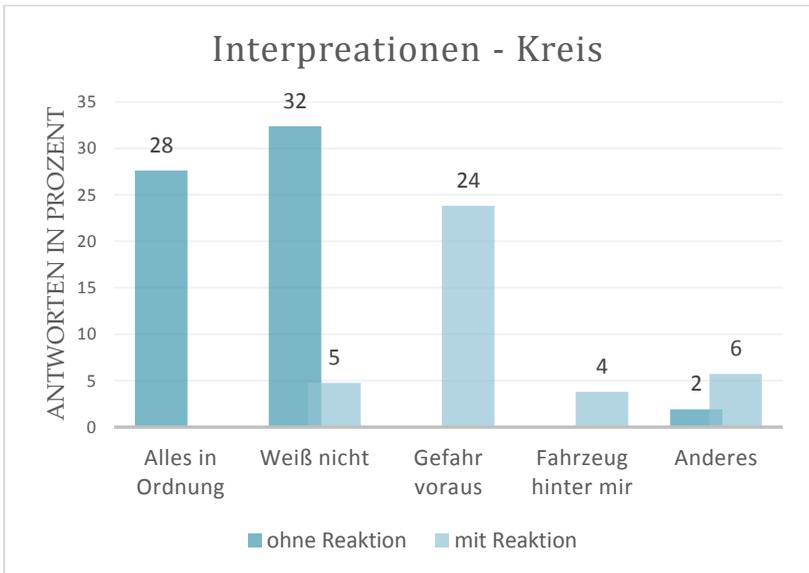
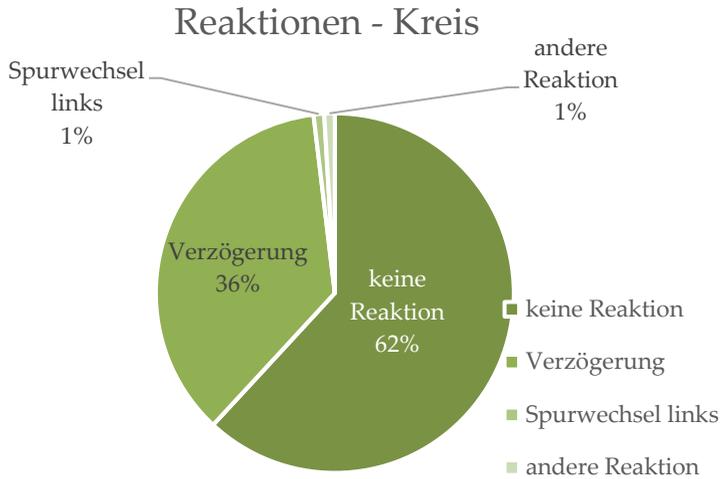


	Nein	Ja	Keine Aussage
Beim Einblenden der Lichtfunktion habe ich mich sicherer gefühlt			
Wenn mir ein Fahrzeug mit dieser Funktion zur Verfügung stehen würde, würde ich es verwenden			
Das Aufblenden der Funktion hat mich erschreckt			
Die Funktion vor dem Fahrzeug hat mich von der Fahraufgabe abgelenkt			
Ich konnte die Fahrsituation dank der Funktion besser meistern			
Beim Einblenden der Lichtfunktion habe ich mich unsicherer gefühlt			
Diese Funktion würde ich meinen Freunden und Kollegen empfehlen			
Ich die Aussage der Funktion war intuitiv verständlich			
Die Funktion hat mich rechtzeitig darauf vorbereitet zu reagieren			

Anhang D: DETAILLIERTE RESULTATE

D.1 DETAILLIERTE RESULTATE DER STUDIE 1

Im Folgenden werden die im Hauptteil nur übergeordnet vorgestellten und diskutierten Resultaten der ersten, im Simulator durchgeführten Probandenstudie, ausführlich vorgestellt. Zunächst erfolgt die Darstellung in gleicher Form wie im Hauptteil: je Symbol werden die Antworten zur Reaktion und die Antworten bezüglich der jeweiligen Interpretation abgebildet. Im Anschluss werden alle Resultate noch einmal in tabellarischer Form dargestellt.



DREIECKIGE SYMBOLE

IN FAHRTRICHTUNG AUFWEITENDES DREIECK

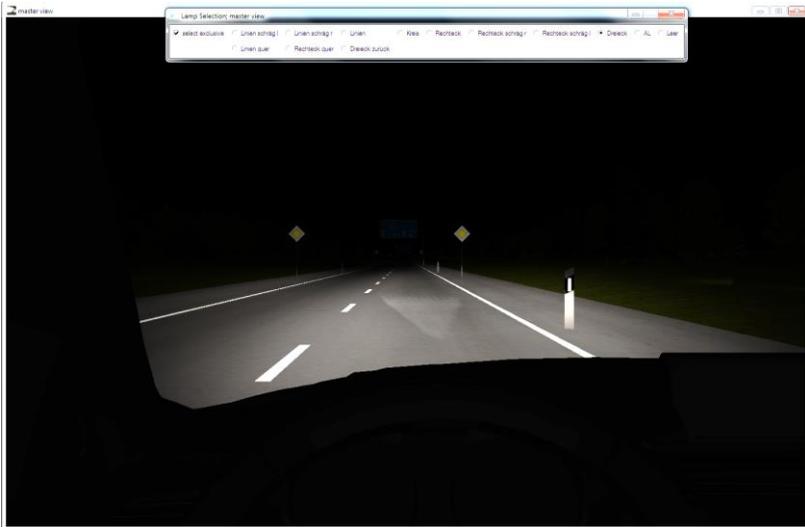
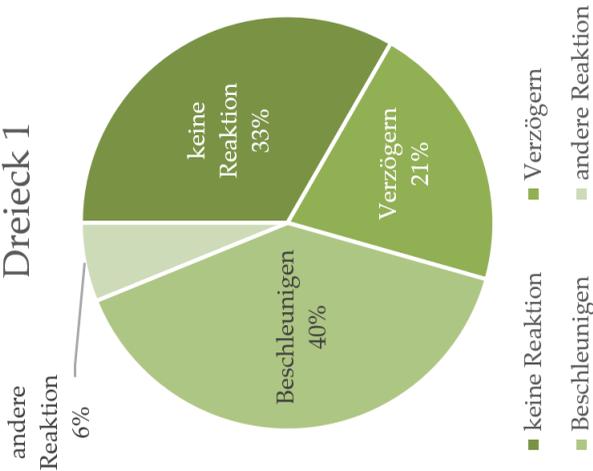
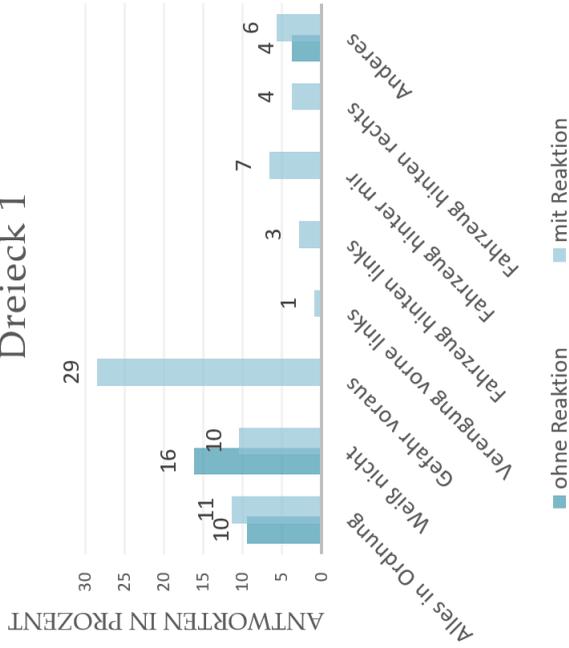


Abbildung 6.7 Darstellung des in Fahrtrichtung (vom Fahrzeug weg) aufweitenden Dreiecks in Positivkontrast in der Simulation.

Reaktionen - Dreieck 1



Interpretationen - Dreieck 1



IN FAHRTRICHTUNG VERJÜNGENDES DREIECK

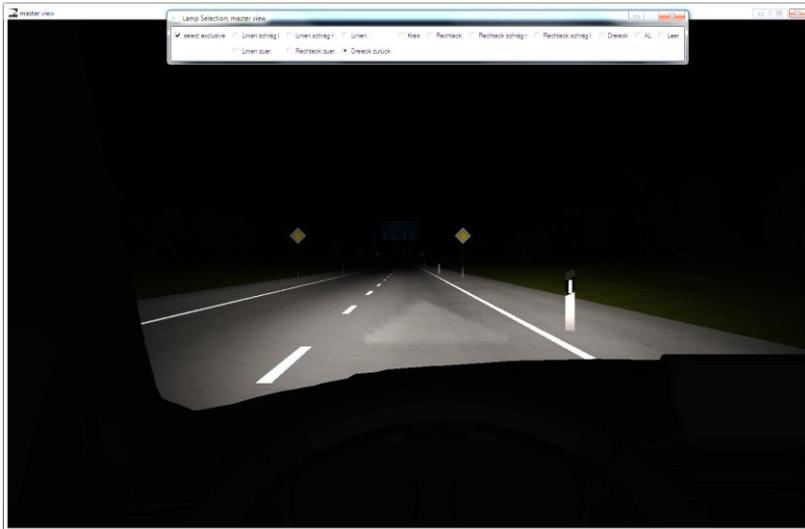
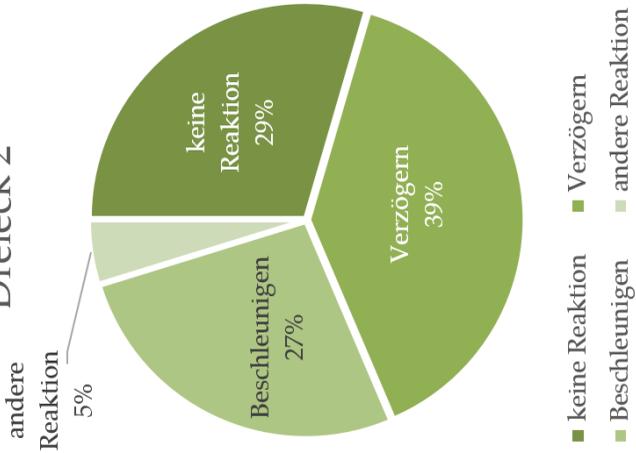
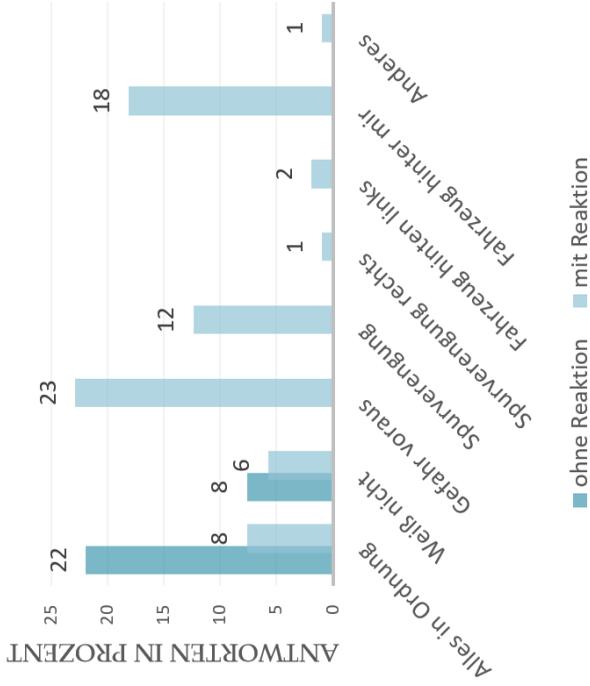


Abbildung 6.8 Darstellung des in Fahrtrichtung (vom Fahrzeug weg) verjüngenden Dreiecks in Positivkontrast in der Simulation.

Reaktionen -
Dreieck 2



Interpretationen -
Dreieck 2



RECHTECKIGE SYMBOLE

RECHTECKE

RECHTECK PARALLEL ZUR FAHRBAHN

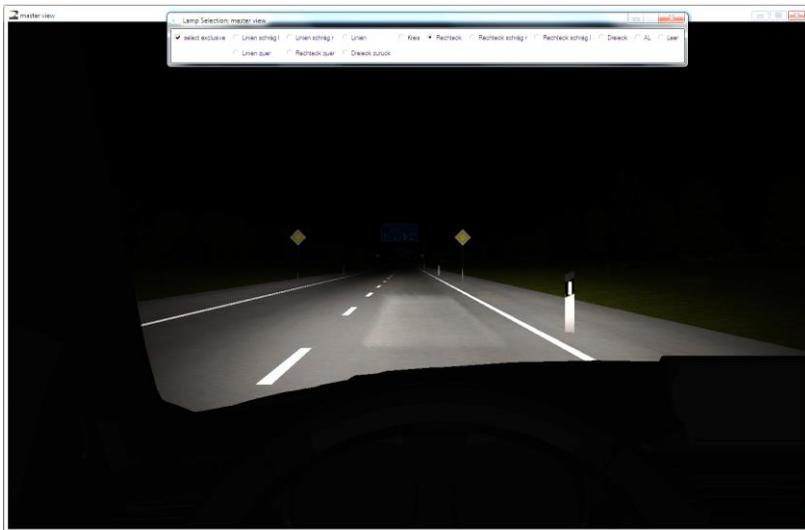
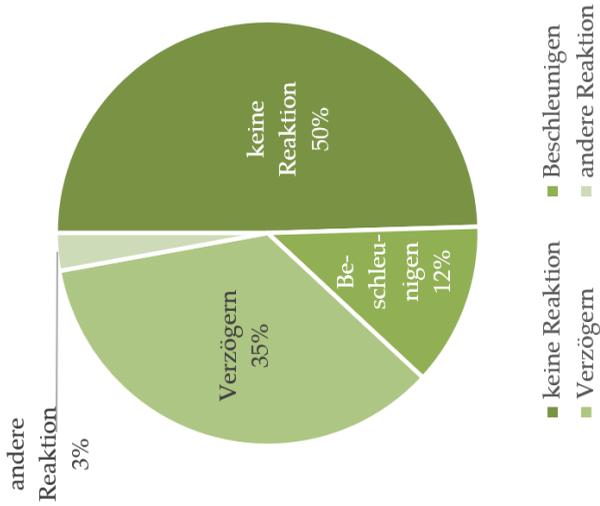
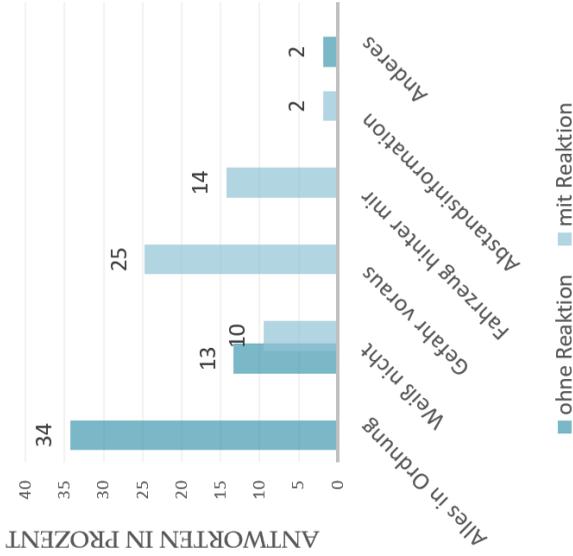


Abbildung 6.9 Darstellung des in Rechtecks parallel zur Fahrbahn in Positivkontrast in der Simulation.

Reaktionen - Rechteck in Fahrtrichtung



Interpretation - Rechteck in Fahrtrichtung



RECHTECK QUER ZUR FAHRBAHN

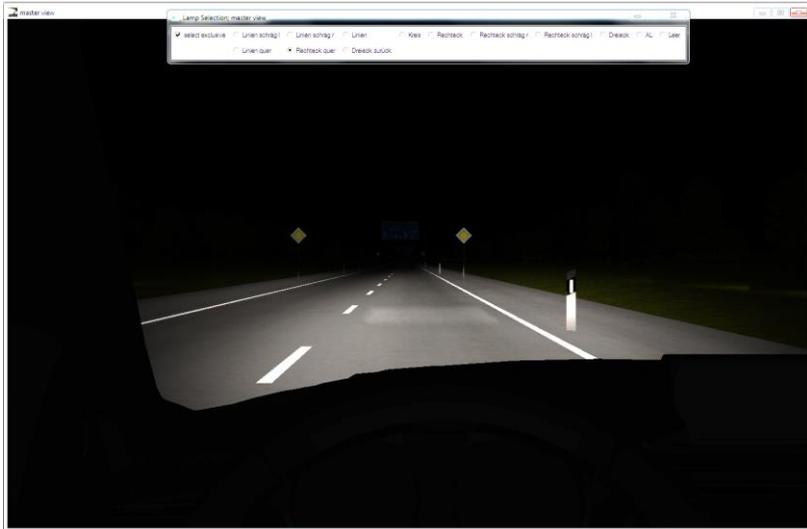
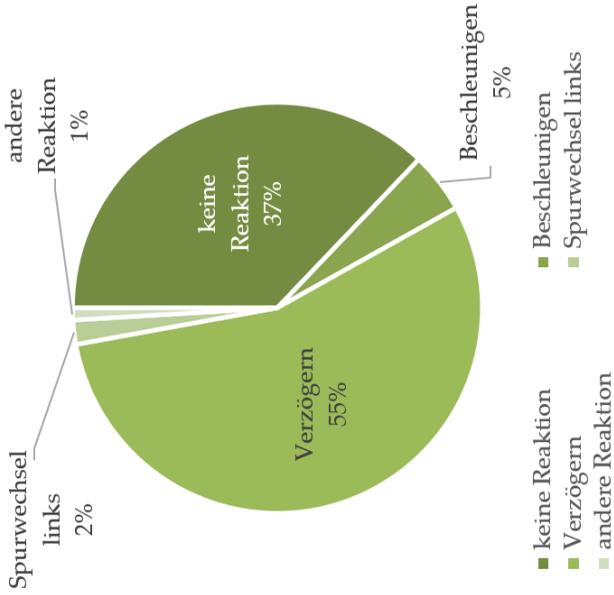
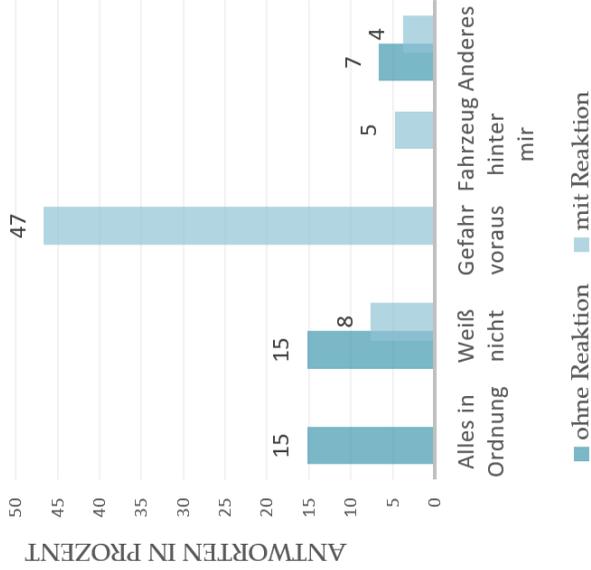


Abbildung 6.10 Darstellung des in Rechtecks quer zur Fahrbahn in Positivkontrast in der Simulation.

Reaktionen -
Rechteck quer zur Fahrbahn



Interpretationen -
Rechteck quer zur Fahrbahn



LINKSGENEIGTES RECHTECK

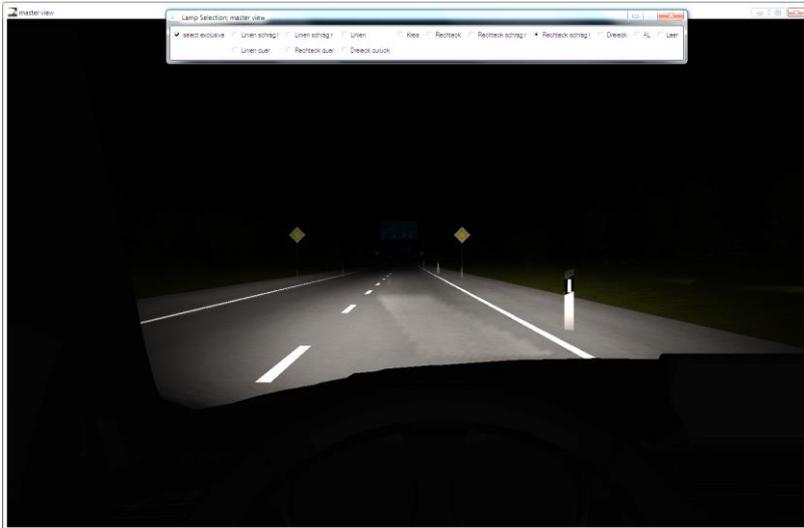
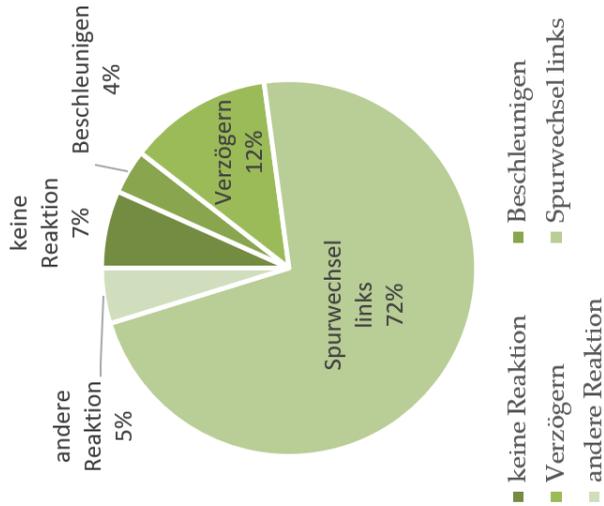
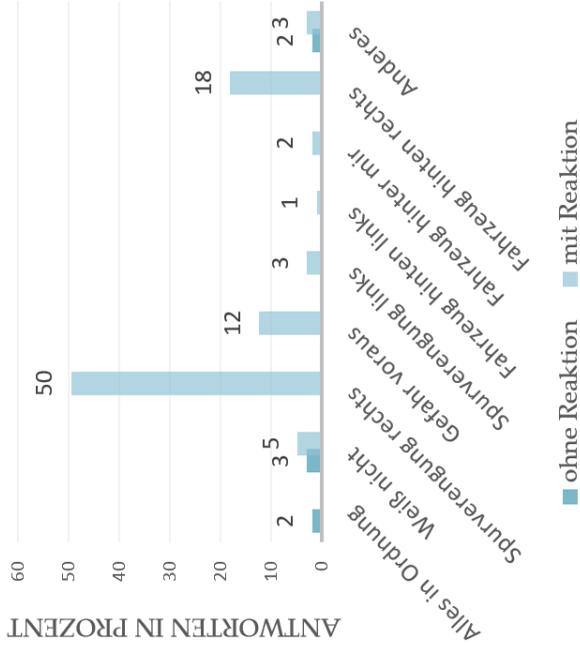


Abbildung 6.11 Darstellung des linksgeneigten Rechtecks in Positivkontrast in der Simulation.

Reaktionen -
Rechteck links



Interpretationen -
Rechteck links



RECHTSGENEIGTES RECHTECK

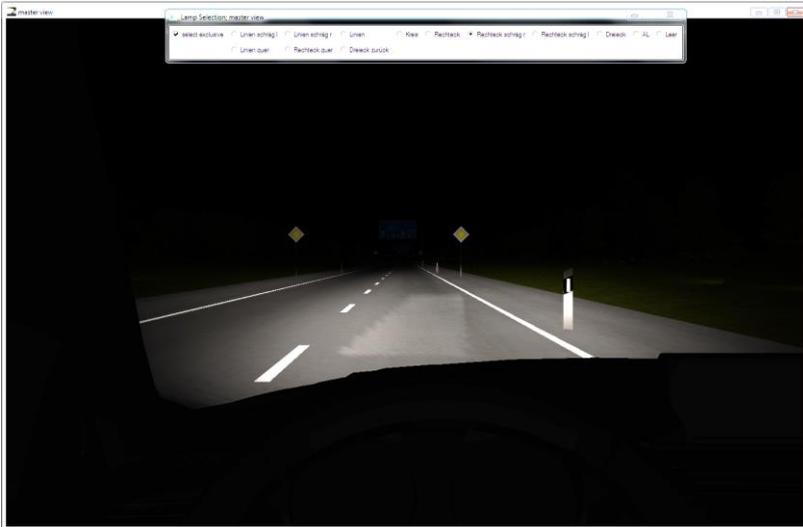
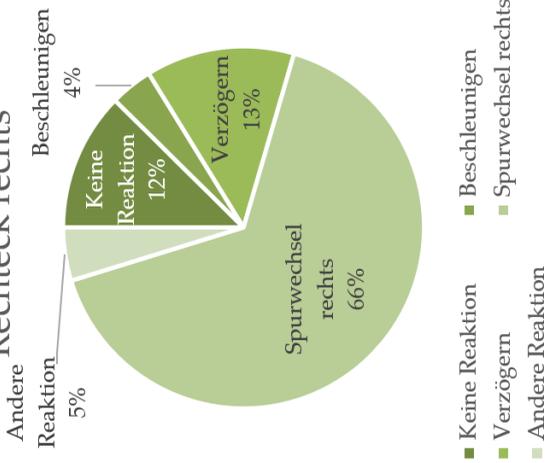


Abbildung 6.12 Darstellung des rechtsgeneigten Rechtecks in Positivkontrast in der Simulation.

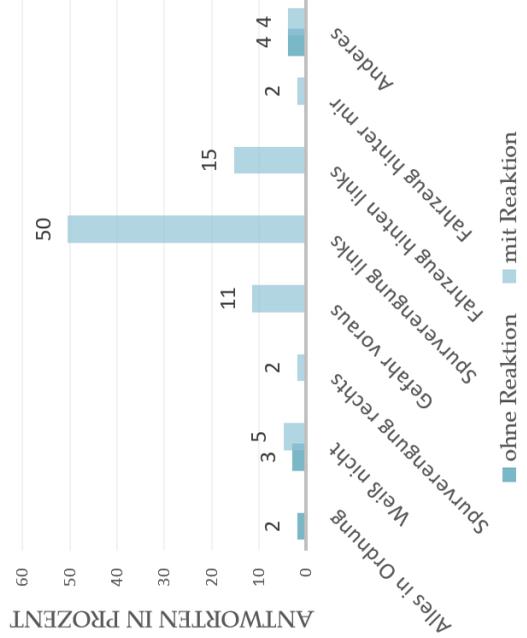
Um keine zusätzlichen Aktionen in den Versuch zu bringen, wurde die Fahrt auf der rechten Fahrspur belassen. Die Probanden wurden jedoch zu Beginn des Versuchs darauf hingewiesen, die durchgezogene Linie nicht als etwaiges Hindernis zu betrachten. Die bezog sich auf alle Versuchsteile, hat hier jedoch die größte vermutete Gewichtung.

Reaktionen -

Rechteck rechts



Interpretationen -
Rechteck rechts



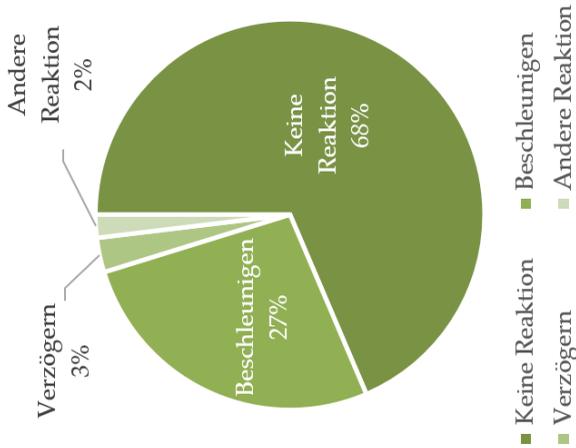
PARALLELE LINIEN

PARALLEL ZUR FAHRBAHN AUSGERICHTETE LINIEN

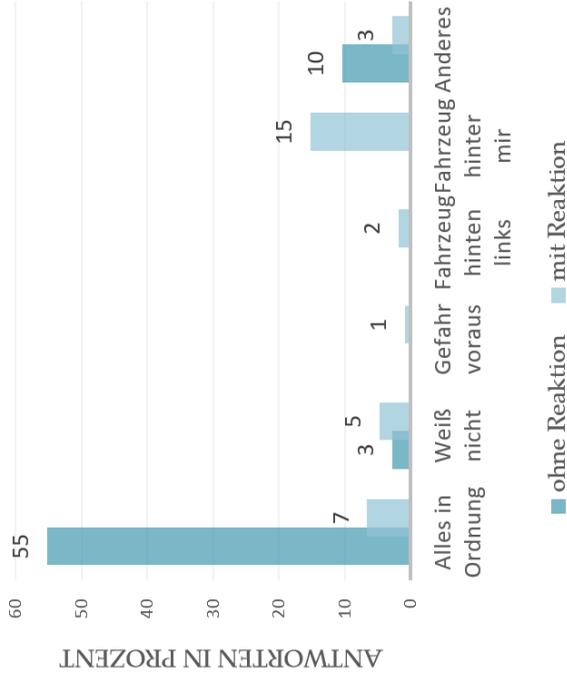


Abbildung 6.13 Darstellung der Linien parallel zur Fahrbahn in Positivkontrast in der Simulation.

Reaktionen - Linien in Fahrtrichtung



Interpretationen - Linien in Fahrtrichtung



QUER ZUR FAHRBAHN AUSGERICHTETE LINIEN

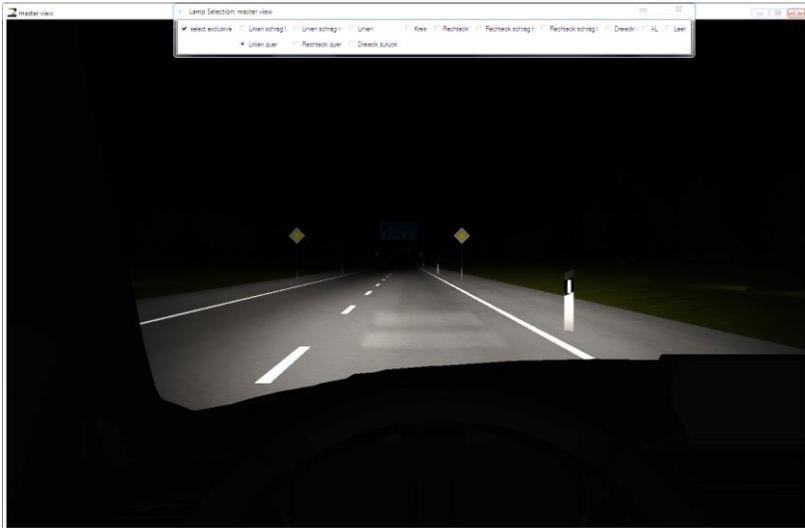
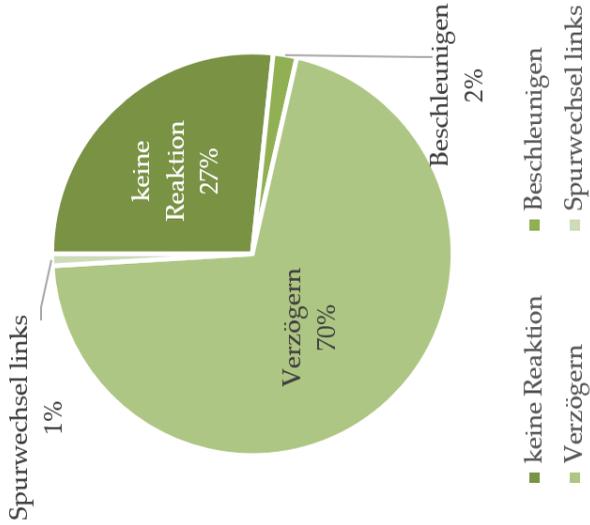
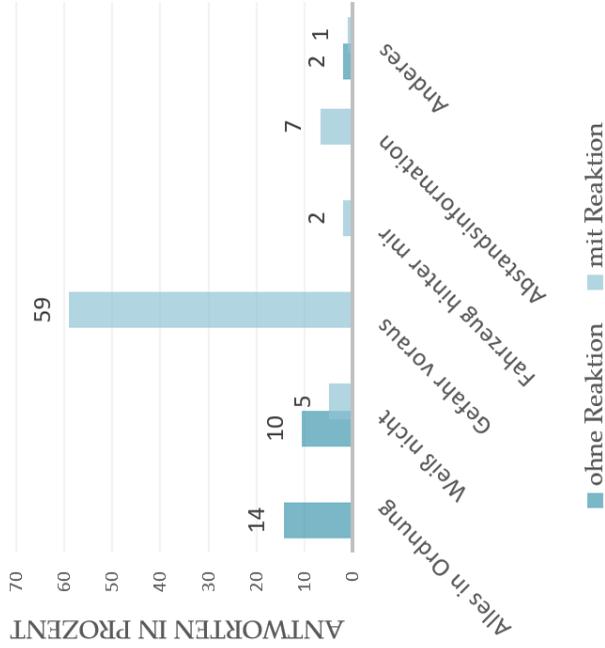


Abbildung 6.14 Darstellung der Linien quer zur Fahrbahn in Positivkontrast in der Simulation.

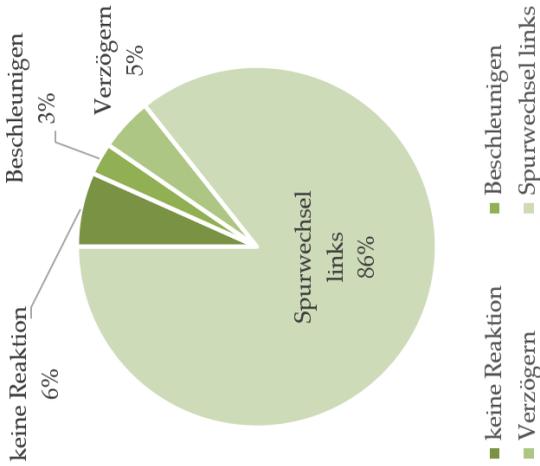
Reaktionen -
Linien quer zur Fahrbahn



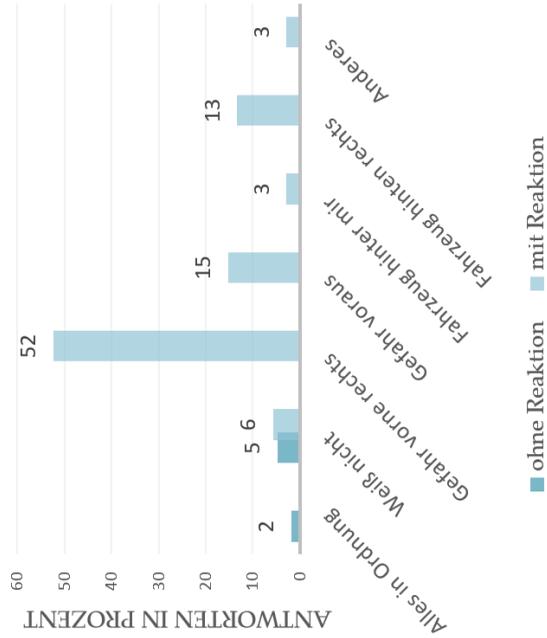
Interpretationen -
Linien quer zur Fahrbahn



Reaktionen -
Linien links



Interpretationen -
Linien links



RECHTSGENEIGTE LINIEN

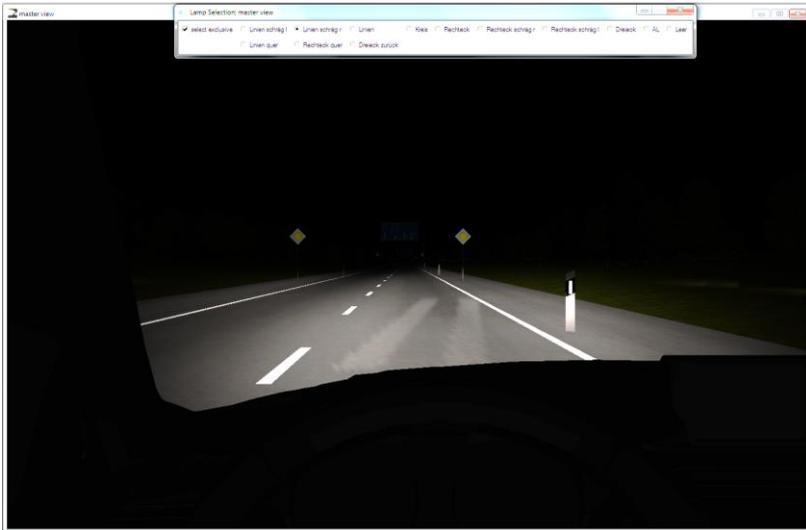
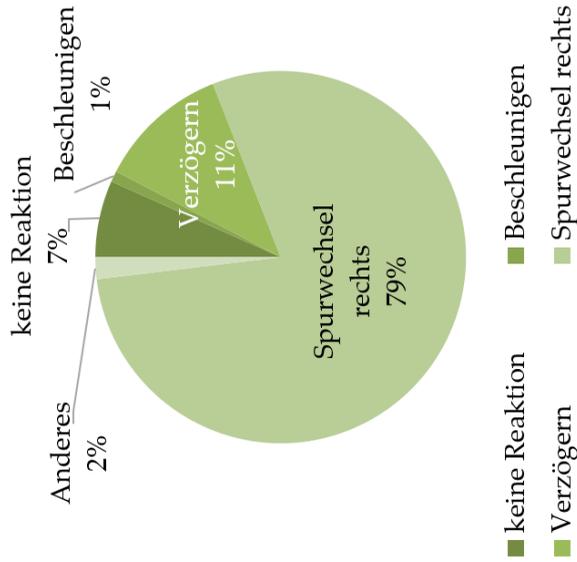
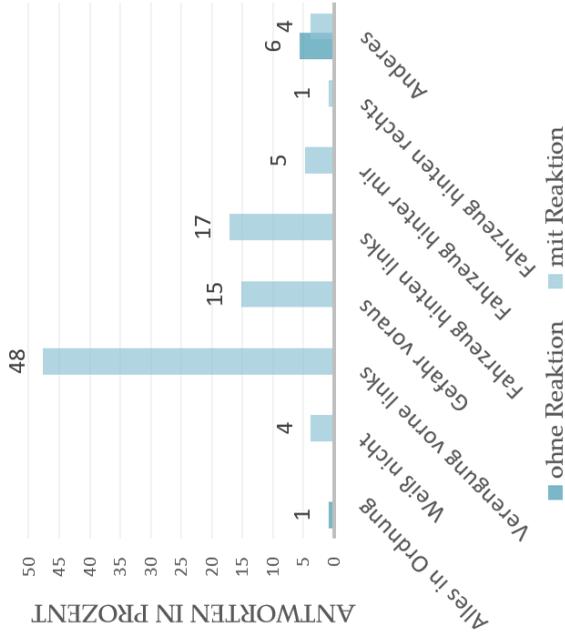


Abbildung 6.16 Darstellung der rechtsgeneigten Linien in Positivkontrast in der Simulation.

Reaktionen -
Linien rechts



Interpretationen -
Linien rechts



ABBLENDLICHT UND AUSFALL ABBLENDLICHT

ABBLENDLICHT

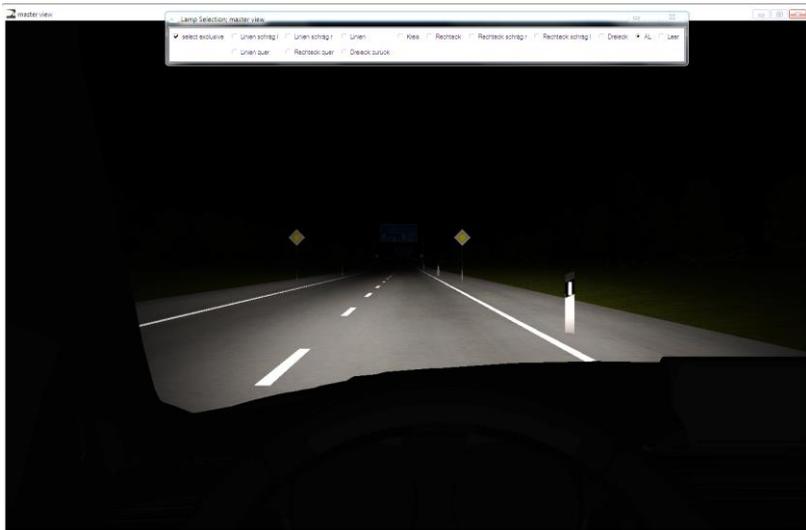
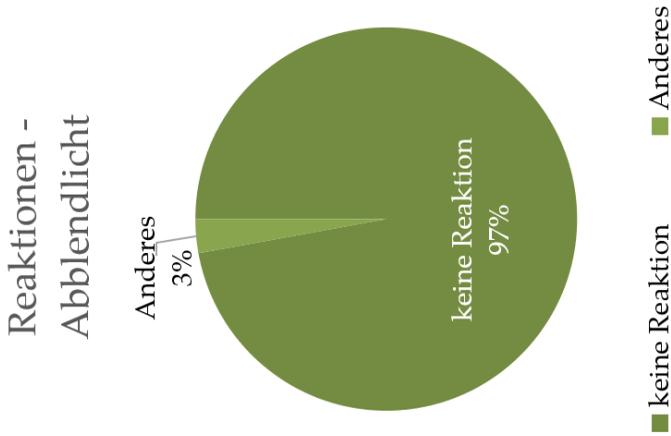
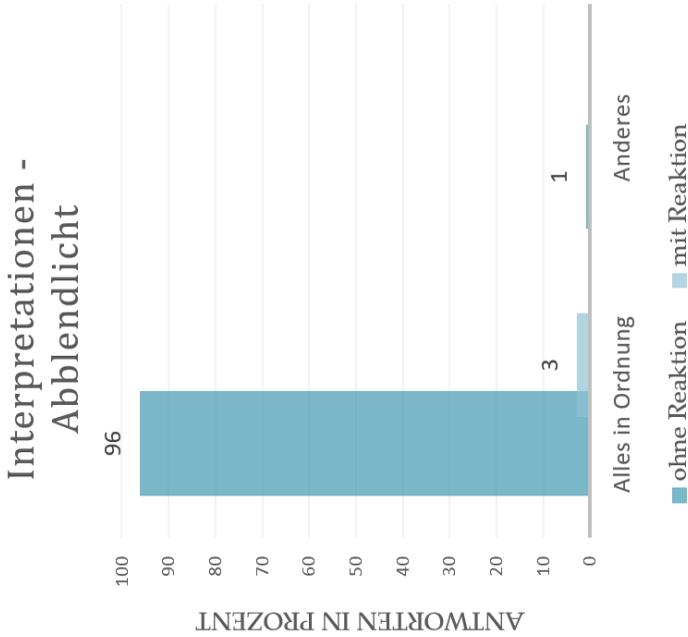


Abbildung 6.17 Darstellung des Abblendlichts in der Simulator-Studie.

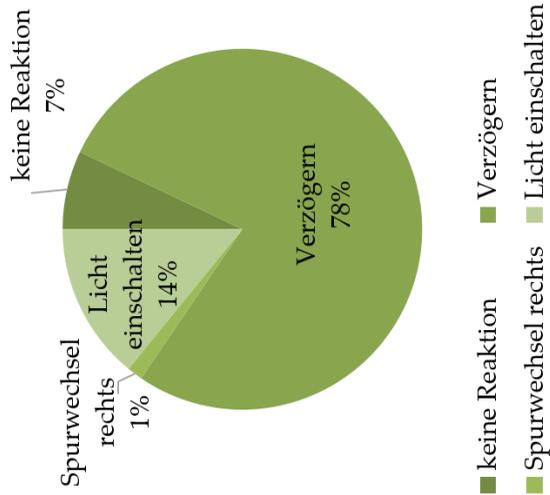


AUSFALL ABBLENDLICHT

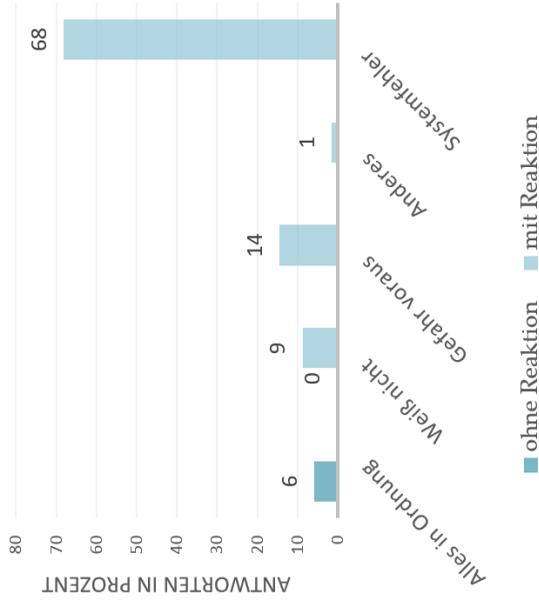


Abbildung 6.18 Darstellung der Simulation der Fahrt ohne Fahrzeuglicht bei leicht bewölktem Nachthimmel.

Reaktionen -
kein Licht



Interpretationen -
Linien rechts



D.1.1 TABELLARISCHE ERGEBNISSE

Im Folgenden eine Übersicht über die in Kapitel 3.1 vorgestellten Ergebnisse. Die in den folgenden Tabellen dargestellten Symbole sind wie folgt zu verstehen:

	Kreis-Projektion
	Projektion eines in Fahrtrichtung aufweitenden Dreiecks
	Projektion eines zum Fahrzeug aufweitenden Dreiecks
	Projektion eines Rechtecks entlang der Fahrtrichtung
	Projektion eines Rechtecks quer zur Fahrtrichtung
	Projektion eines linksgeneigten Rechtecks
	Projektion eines rechtsgeneigten Rechtecks
	Projektion paralleler Linien entlang der Fahrtrichtung
	Projektion paralleler Linien quer zur Fahrtrichtung
	Projektion linksgeneigter paralleler Linien
	Projektion rechtsgeneigter paralleler Linien
	Abblendlicht
	Kein Licht vom Fahrzeug

DETAILLIERTE RESULTATE

Tabelle 6.1 Ergebnisse der Studie 1 bezüglich der genannten Reaktionen beim Aufleuchten der einzelnen Symbole

	Keine Reaktion	Bremsen	Beschleunigen	Ausweichen Links	Ausweichen Rechts	Anderes
	65	38		1		1
	38	43	24	2	4	1
	31	41	28	2		3
	52	37	13		2	1
	39	58	5	2		1
	7	13	4	76	2	3
	13	14	4	2	69	3
	72	3	28		1	1
	28	74	2	1		
	7	5	3	90		
	7	12	1		83	2
	102					3
	5	55			1	10 (Licht einschalten)

Tabelle 6.2 Ergebnisse der Studie 1 bezüglich der genannten Interpretationen der aufleuchtenden Symbole unabhängig von der jeweils gewählten Reaktion.

	Weiß Nicht	Alles in Ordnung	Spurverengung von links	Gefahr voraus	Spurverengung von rechts	Fahrzeug von hinten links	Fahrzeug direkt hinter mit	Fahrzeug von hinten rechts	Anderes	Weitere Interpretationen
	39	29		25			4		8	
	28	10	1	30		3	7	4	10	Freie Fahrt: 12
	14	23		24	1	2	19		1	Freie Fahrt: 8; Spurverengung: 13
	24	36		26			15		4	
	24	16		49			5		11	
	8	2	3	13	52	1	2	19	5	

DETAILLIERTE RESULTATE

	Weiß Nicht	Alles in Ordnung	Spurverengung von links	Gefahr voraus	Spurverengung von rechts	Fahrzeug von hinten links	Fahrzeug direkt hinter mir	Fahrzeug von hinten rechts	Anderes	Weitere Interpretationen
	8	5	53	12	2	16	2		8	
	8	58		1		2	16		14	Freie Fahrt: 7
	16	15		62			2		3	Abstandsinformation: 7
	6	2		16	55		3	14	8	
	4	1	50	16		18	5	1	10	
		101							4	
	7	4		10					1	Systemfehler: 47

D.2 DETAILLIERTE RESULTATE DER STUDIE 2

D.2.1 RESULTATE BAUSTELLE

Gruppe 1

Erste Runde

32	Abblendlicht	AL + statisch	Δ	%
V	45,15 km/h	59,78 km/h	+15 km/h	+ 32 %*
\sum°	6,37 °	2,02 °	- 4,35 °	- 68 %
V(°)	0,39 °/s	0,29 °/s	- 0,10 °/s	- 26 %

Vier Runden

64	Abblendlicht	AL + statisch	Δ	%
V	55,43 km/h	63,71 km/h	+ 8 km/h	+ 15%*
\sum°	4,86 °	3,27 °	- 1,58 °	- 32%*
V(°)	0,36 °/s	0,32 °/s	-0,04 °/s	- 12 %

V = Durchschnittliche Geschwindigkeit, \sum° = Summe Lenkwinkel;
 V(°) = Durchschnittliche Lenkgeschwindigkeit

DETAILLIERTE RESULTATE

Gruppe 2

Erste Runde

6	Abblendlicht	AL + dynamisch	Δ	%
V	45,79 km/h	55,11 km/h	+ 9 km/h	+ 20 %
\sum°	4,36 °	2,35 °	- 2,01 °	- 46 %
V(°)	0,40 °/s	0,27 °/s	- 0,13 °/s	- 33 %

Vier Runden

12	Abblendlicht	AL + dynamisch	Δ	%
V	55,81 km/h	65,73 km/h	10 km/h	+ 18%*
\sum°	2,87 °	1,84 °	- 1,03 °	+ 36 %
V(°)	0,33 °/s	0,27 °/s	-0,07°/s	20 %

V = Durchschnittliche Geschwindigkeit, \sum° = Summe Lenkwinkel;
V(°) = Durchschnittliche Lenkgeschwindigkeit

Gruppe 3

Erste Runde

14	AL + Statisch	AL + dynamisch	Δ	%
V	39,17 km/h	53,17 km/h	+ 14 km/h	+ 36 %
\sum°	3,56 °	2,56 °	-1,00 °	- 28 %
V(°)	0,32 °/s	0,17 °/s	- 0,15 °/s	- 47 %*

Vier Runden

28	AL + Statisch	AL + dynamisch	Δ	%
V	39,17 km/h	53,17 km/h	+ 14 km/h	+ 36 %
\sum°	3,56 °	2,56 °	-1,00 °	- 28 %
V(°)	0,32 °/s	0,17 °/s	- 0,15 °/s	- 47 %*

V = Durchschnittliche Geschwindigkeit, \sum° = Summe Lenkwinkel;
 V(°) = Durchschnittliche Lenkgeschwindigkeit

DETAILLIERTE RESULTATE

Gruppe 4

Erste Runde

5	Fernlicht	AL+ statisch	Δ	%
V	44,81 km/h	43,00 km/h	- 1,81 km/h	- 4 %
\sum°	2,21 °	3,30 °	+ 1,09 °	+ 49 %
V(°)	0,24 °/s	0,29 °/s	+ 0,05 °/s	+21 %

Vier Runden

10	Fernlicht	AL+ statisch	Δ	%
V	54,96 km/h	50,51 km/h	- 4 km/h	+ 8 %
\sum°	1,96 °	1,88 °	- 0,08 °	- 4 %
V(°)	0,22 °/s	0,21 °/s	-0,01°/s	- 4 %

V = Durchschnittliche Geschwindigkeit, \sum° = Summe Lenkwinkel;
V(°) = Durchschnittliche Lenkgeschwindigkeit

D.2.2 RESULTATE BREMSSEN

Gruppe 1

Erste Runde

29	Abblendlicht	AL + statisch	Δ	%
D	74,57 m	119,94 m	+ 45,37 m	+ 61%*
- V	1,53 m/s ²	1,42 m/s ²	- 0,11 m/s ²	- 7%*

Vier Runden

58	Abblendlicht	AL + statisch	Δ	%
D	85,01 m	119,92 m	+ 34,91 m	+ 29%*
- V	1,52 m/s ²	1,46 m/s ²	- 0,06 m/s ²	- 4 %

D = Distanz zum Hindernis

- V = Verzögerung

DETAILLIERTE RESULTATE

Gruppe 2

Erste Runde

6	Abblendlicht	AL + dynamisch	Δ	%
D	66,53 m	150,53 m	+ 84 m	+126%*
- V	2,25 m/s ²	0,80 m/s ²	- 1,45 m/s ²	- 64 %

Vier Runden

12	Abblendlicht	AL + dynamisch	Δ	%
D	82,83 m	128,28 m	+ 45,46 m	+ 35%*
- V	2,03 m/s	0,99 m/s ²	- 1,04 m/s ²	- 51%*

D = Distanz zum Hindernis

- V = Verzögerung

Gruppe 3

Erste Runde

12	AL + Statisch	AL + dynamisch	Δ	%
D	152,1 m	146,03 m	- 6,07 m	- 4%
- V	0,81 m/s ²	1,04 m/s ²	+ 0,23 m/s ²	+28%

Vier Runden

24	AL + Statisch	AL + dynamisch	Δ	%
D	152,1 m	146,03 m	- 6,07 m	- 4%
- V	0,81 m/s ²	1,04 m/s ²	+ 0,23 m/s ²	+28%

D = Distanz zum Hindernis

- V = Verzögerung

DETAILLIERTE RESULTATE

Gruppe 4

Erste Runde

4	Fernlicht	AL + statisch	Δ	%
D	66,53 m	150,53 m	+84 m	+126%*
- V	2,25 m/s ²	0,80 m/s ²	-1,45 m/s ²	-64%

Vier Runden

8	Fernlicht	AL+ statisch	Δ	%
D	136,61 m	140,51 m	+ 3,91 m	+ 3%
- V	1,31 m/s ²	0,59 m/s ²	- 0,71 m/s ²	- 55%

D = Distanz zum Hindernis

- V = Verzögerung

D.2.3 RESULTATE AUSWEICHEN

Gruppe 1

Erste Runde

27	Abblendlicht	AL + statisch	Δ	%
D	66,28 m	98,47 m	+ 32 m	+ 49 %*
V(°)	0,16 °/s	0,13 °/s	- 0,03 °/s	-18 %

Vier Runden

54	Abblendlicht	AL + statisch	Δ	%
D	92,81 m	119,68 m	+ 27 m	29% *
V(°)	0,17 °/s	0,16 °/s	-0,01°/s	-4%

D = Distanz zum Hindernis

V(°) = Lenkgeschwindigkeit

DETAILLIERTE RESULTATE

Gruppe 2

Erste Runde

5	Abblendlicht	AL + dynamisch	Δ	%
D	67,17 m	78,78 m	+4 m	+17%
V(°)	0,30 °/s	0,15 °/s	-0,15 °/s	-50%

Vier Runden

10	Abblendlicht	AL + dynamisch	Δ	%
D	75,13 m	100,52 m	+25 m	+25%
V(°)	0,44 °/s	0,20 °/s	-0,24 °/s	-54%

D = Distanz zum Hindernis

V(°) = Lenkgeschwindigkeit

Gruppe 3

Erste Runde

25	AL + Statisch	AL + dynamisch	Δ	%
D	107,22 m	102,84 m	-4 m	- 4%
V(°)	0,20 °/s	0,28 °/s	+ 0,08 °/s	+ 40%

Vier Runden

50	AL + Statisch	AL + dynamisch	Δ	%
D	118,61 m	121,50 m	+ 3 m	+ 2%
V(°)	0,21 °/s	0,24 °/s	+ 0,03 °/s	+ 15%

D = Distanz zum Hindernis

V(°) = Lenkgeschwindigkeit

DETAILLIERTE RESULTATE

Gruppe 4

Erste Runde

4	Fernlicht	AL+ statisch	Δ	%
D	82,37 m	136,78 m	+54 m	+66%
V(°)	0,23 °/s	0,48 °/s	+0,25°/s	+108%

Vier Runden

8	Fernlicht	AL+ statisch	Δ	%
D	76,28 m	112,18 m	+35 m	+32%
V(°)	0,16 °/s	0,24 °/s	+ 0,08 °/s	+51%

D = Distanz zum Hindernis

V(°) = Lenkgeschwindigkeit

D.3 LICHTTECHNISCHE MESSUNGEN DES PROTOTYPS

Folgend werden die Aufnahmen der durch den DMD-Prototyp erzeugten Projektionen zur Fahrerassistenz dargestellt.

Detaillierte Erläuterungen erfolgen an dieser Stelle nicht. Die vorliegenden Aufnahmen dienen der Ergänzung und Vollständigkeit dieser Arbeit. Die Auswertung entspricht der in Kapitel 3, Abschnitt 3 vorgestellten Vorgehensweise. Die Aufnahmen entstanden alle aus Fahrerposition durch eine Leuchtdichtkamera LMK Color (*TTDCCD140*) der Firma Techno Team.

Als Basis-Lichtfunktion wurde das LED-Abblendlicht des GMW 7er (Baujahr 2016) verwendet. Die Projektionen in Positiv-Kontrast wurden durch das im Scheinwerfer verbaute DMD-Zusatzmodul erzeugt.

Abweichende Informationen können den jeweiligen Bildunterschriften entnommen werden.

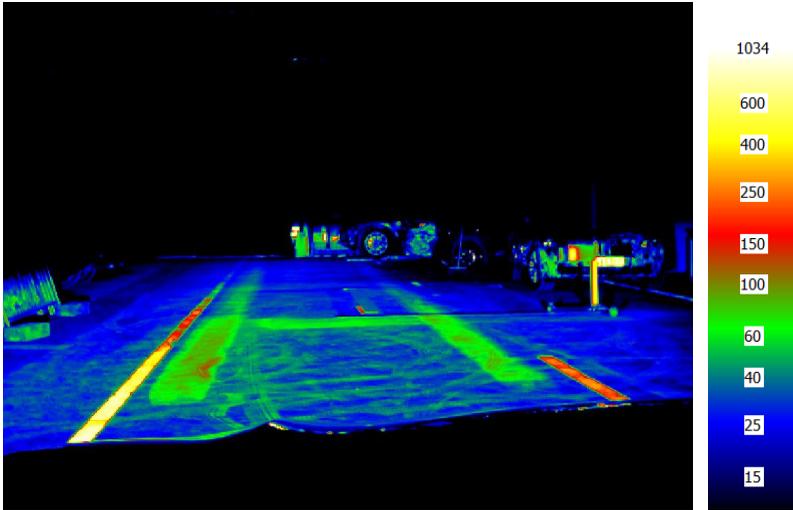


Abbildung 6.19 Falschfarbendarstellung der Leuchtdichteaufnahme in cd/m^2 der Fahrzeugbreitendarstellung.



Abbildung 6.20 Farbaufnahme der Fahrzeugbreitendarstellung.

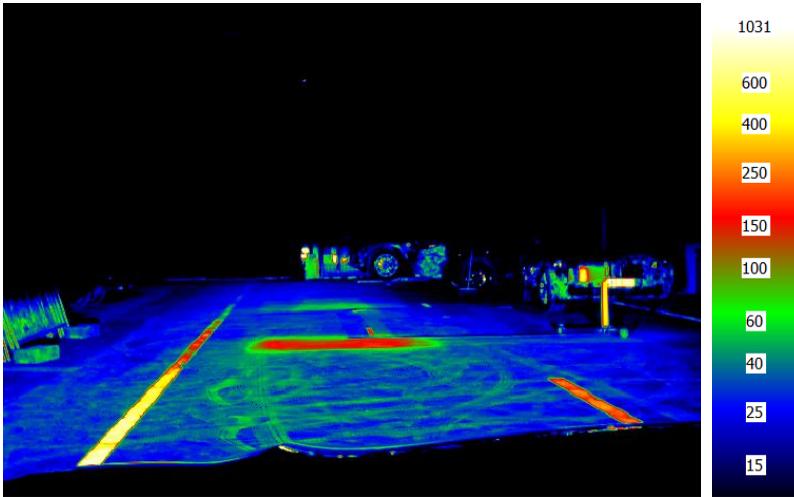


Abbildung 6.21 Falschfarbendarstellung der Leuchtdichteaufnahme in cd/m^2 der Auffahrwarnung.



Abbildung 6.22 Farbaufnahme der Auffahrwarnung.

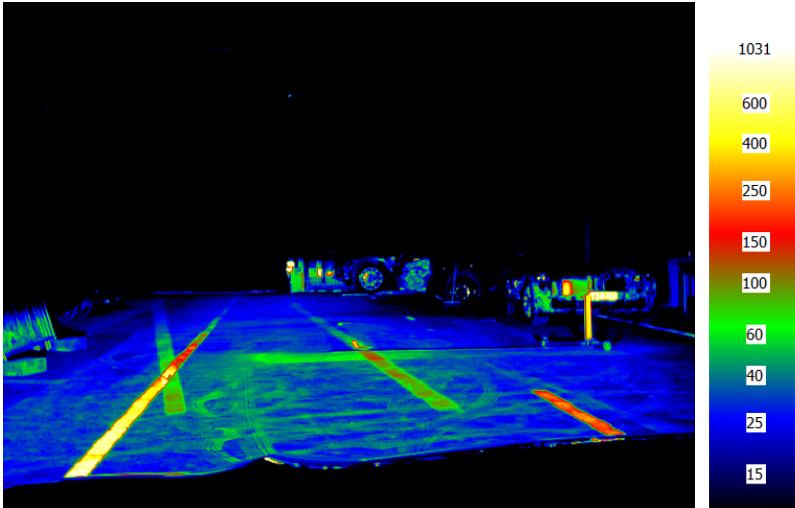


Abbildung 6.23 Falschfarbendarstellung der Leuchtdichteaufnahme in cd/m^2 der Vorwarnung eines Ausweich Szenarios.



Abbildung 6.24 Farbaufnahme der Vorwarnung eines Ausweich-Szenarios.

Anhang E: EMPFEHLUNG DER GESETZLICHEN REGULIERUNG

Aus der vorliegenden Arbeit wurde ein Vorschlag für die Verwendung zur Definierung in einer gesetzlichen Norm für die Darstellung einer projektionsbasierten Fahrzeugbreitendarstellung entwickelt (Abbildung 6.25 und Tabelle 6.3).

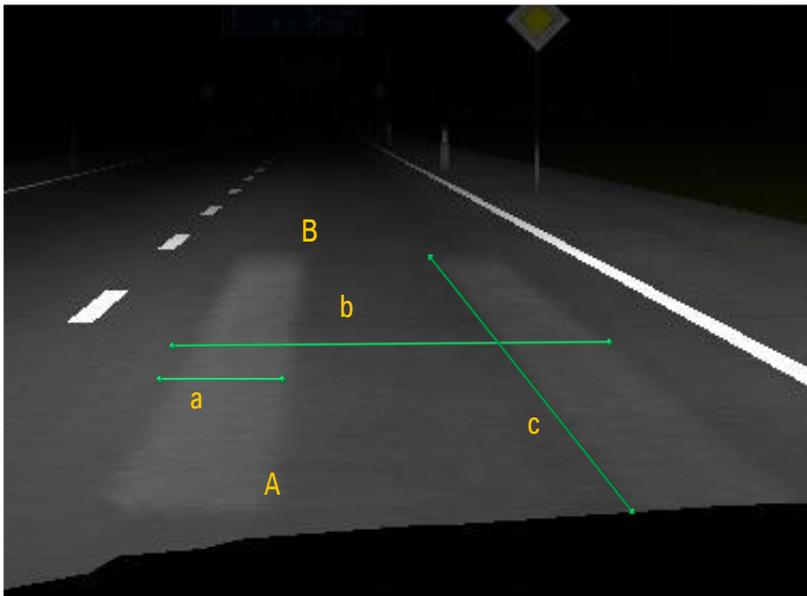


Abbildung 6.25 Vorschlag zur Darstellung einer gesetzlichen Regelung für projektionsbasierte Fahrerassistenzsysteme.

Die folgenden Werte und Ausführungen sind als Vorschlag und abhängig von Fahrzeug und Fahrgeschwindigkeit zu sehen.

Tabelle 6.6 Beispielhafte Werte zur gesetzlichen Normierung projektionsbasierter Fahrzeugbreitendarstellungen. Die mit (*) markierten Werte sind von einem BMW 5er (F11) und die mit (**) von einer Reisegeschwindigkeit von 60 km/h abgeleitet.

	<i>Bedeutung</i>	<i>Wert</i>
A	Abstand des Projektionsbeginns zum Fahrzeug (zur Abschlusscheibe des Frontscheinwerfers)	7 m *
B	Abstand des Projektionsendes zum Fahrzeug (zur Abschlusscheibe des Frontscheinwerfers)	25 m **
a	Breite einer einzelnen Linienprojektion	0,12 m
b	Gesamtbreite der Projektionsfläche (abhängig von Fahrzeugbreite)	2,16 m *
c	Gesamtlänge der Projektionsfläche (abhängig von Fahrgeschwindigkeit)	18 m **
K	Kontrast zum Abblendlicht	1:2

SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

Lichttechnisches Institut Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

ISSN 2195-1152

- Band 1 Christian Jebas
**Physiologische Bewertung aktiver und passiver
Lichtsysteme im Automobil.** 2012
ISBN 978-3-86644-937-4
- Band 2 Jan Bauer
**Effiziente und optimierte Darstellungen von
Informationen auf Grafikanzeigen im Fahrzeug.** 2013
ISBN 978-3-86644-961-9
- Band 3 Christoph Kaiser
**Mikrowellenangeregte quecksilberfreie
Hochdruckgasentladungslampen.** 2013
ISBN 978-3-7315-0039-1
- Band 4 Manfred Scholdt
**Temperaturbasierte Methoden zur Bestimmung der
Lebensdauer und Stabilisierung von LEDs im System.** 2013
ISBN 978-3-7315-0044-5
- Band 5 André Domhardt
**Analytisches Design von Freiformoptiken
für Punktlichtquellen.** 2013
ISBN 978-3-7315-0054-4
- Band 6 Franziska Herrmann
Farbmessung an LED-Systemen. 2014
ISBN 978-3-7315-0173-2
- Band 7 Simon Wendel
Freiform-Optiken im Nahfeld von LEDs. 2014
ISBN 978-3-7315-0251-7
- Band 8 Carmen Kettwich
**Ablenkung im Straßenverkehr und deren
Einfluss auf das Fahrverhalten.** 2014
ISBN 978-3-7315-0288-3

- Band 9 Steffen Michenfelder
**Konzeption, Realisierung und Verifikation eines
automobilen Forschungsscheinwerfers auf Basis
von Digitalprojektoren.** 2015
ISBN 978-3-7315-0301-9
- Band 10 Celal Mohan Ögün
**Surface wave driven molecular low pressure plasmas
for general lighting.** 2016
ISBN 978-3-7315-0464-1
- Band 11 Theresa Bonenberger
LED Farbmischung mit chaotischen Lichtleitern. 2016
ISBN 978-3-7315-0480-1
- Band 12 Michael Schöne
**Diffraktive Optiken im Automobil:
Achromatisierung, Athermalisierung, Formung
von Scheinwerferlichtverteilungen.** 2017
ISBN 978-3-7315-0613-3
- Band 13 Tobias Werner
**Simulation, Aufbau und Charakterisierung
von autostereoskopischen Display-Systemen
im Fahrzeugbereich.** 2017
ISBN 978-3-7315-0617-1
- Band 14 Christian Herbold
**Entwicklung und Herstellung naturähnlich
verzweigter Kühlkörper für LED-Systeme.** 2017
ISBN 978-3-7315-0635-5
- Band 15 Carsten Gut
Laserbasierte hochauflösende Pixellichtsysteme. 2018
ISBN 978-3-7315-0710-9
- Band 16 Annie Shalom Samji Isaac Chandra
**Intelligent Freeform Deformation for LED
Illumination Optics.** 2018
ISBN 978-3-7315-0741-3

- Band 17 Ingo Rotscholl
Spectral near field data of LED systems for optical simulations. 2018
ISBN 978-3-7315-0750-5
- Band 18 Inca Leopoldo Sayanca
Sensorfusion zur Kompensation von Messfehlern bei kamerabasierter Farbverteilungsmessung. 2018
ISBN 978-3-7315-0830-4
- Band 19 Benjamin Schulz
Weiterentwicklung der Beleuchtungseinheit LED-basierter Projektionssysteme. 2019
ISBN 978-3-7315-0865-6
- Band 20 Said Omerbegovic
Prädiktive Lichtfunktionen für volladaptive Scheinwerfersysteme. 2019
ISBN 978-3-7315-0875-5
- Band 21 Patric Jahn
Bewertungsmodell zur Evaluation hochauflösender, lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme. 2020
ISBN 978-3-7315-1009-3
- Band 22 Maximilian Barthel
Aufmerksamkeitslenkung mithilfe Innenraumbeleuchtung im Automobil. 2020
ISBN 978-3-7315-1011-6
- Band 23 Melanie Helmer
Methode zur Messung des Einflusses von Lichtimpulsen auf die visuelle Leistungsfähigkeit. 2020
ISBN 978-3-7315-1013-0
- Band 24 Marina Budanow
Entwicklung eines lichtbasierten Fahrerassistenzsystems. 2020
ISBN 978-3-7315-1018-5



Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines lichtbasierten Fahrerassistenzsystems mittels Projektionen auf der Fahrbahn. Es wurde geprüft, ob eine Informationsübertragung an den Fahrer bei Nacht mittels Projektionen vor dem Fahrzeug möglich ist. In einer Simulator-Studie erzielten parallele Linien die vielversprechendsten Ergebnisse bezüglich der Kommunikation mit dem Fahrer während der Fahrt. Unter realitätsnahen Bedingungen zeigte sich, dass Probanden damit sicherer durch Engstellen fahren und früher auf Hindernisse reagieren. Zuletzt konnte in einem straßentauglichen Prototyp die seriennahe Umsetzung eines solchen Scheinwerfer-Projektionssystems nachgewiesen werden. Die Ergebnisse der Arbeit flossen in den Entwurf zur Änderung der „UN Regulation No. 48“ ein, die die Zulassung von Lichtprojektionen im Straßenverkehr regelt.

ISSN 2195-1152
ISBN 978-3-7315-1018-5

