

BAND 21 | SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

PATRIC JAHN

BEWERTUNGSMODELL ZUR EVALUATION
HOCHAUFLÖSENDER, LICHTBASIERTER
FAHRERASSISTENZSYSTEME



Patric Jahn

**Bewertungsmodell zur Evaluation hochauflösender,
lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme**

Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bewertungsmodell zur Evaluation hochauflösender, lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme

von
Patric Jahn

Karlsruher Institut für Technologie
Lichttechnisches Institut

Bewertungsmodell zur Evaluation hochauflösender,
lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme

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

von M.Sc. Patric Jahn

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Dezember 2019
Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller

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 978-3-7315-1009-3
DOI 10.5445/KSP/1000105371

„Failure is simply the opportunity
to begin again more intelligently.“

Henry Ford

I DANKSAGUNG

Mein Dank gilt zunächst Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann, der meine Begeisterung für die automobilen Lichttechnik geweckt und mir die Promotion ermöglicht hat. Mit seiner freundschaftlichen Art trug er zu meiner fachlichen wie auch persönlichen Entwicklung entscheidend bei.

Für die Übernahme des Korreferats und das damit verbundene Interesse an meiner Arbeit möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller ganz herzlich bedanken.

Meine Kollegin der „ersten Stunde“, Melanie Helmer, begleitete mich erfolgreich von der O-Phase bis zur Promotion. Für viele gemeinsame Stunden, seien es die produktiven oder einfach die unterhaltsamen Kaffeerunden, kann ich daher nur sagen: Danke Melli!

Ohne sie und die weiteren Kollegen aus den Arbeitsgruppen *OTIA* und *AGL* hätte ich die Promotion wahrscheinlich nie begonnen. Danke daher auch an die ehemaligen LTI'ler Steffen Michenfelder und Christian Jebas und die aktuellen LTI'ler Maximilian Baumann, Markus Katona, Jan Feßler, Tino Weiß und Klaus Trampert für eine tolle Zeit, überragendes Teamwork und fachlich stets konstruktive Diskussionen!

DANKSAGUNG

Auch unseren guten Seelen am LTI, Claudia Holeisen, Astrid Henne und Felix Geislhöringer sowie dem Werkstattteam gebührt ein Dank, ohne euch würde am Institut wahrscheinlich Stillstand herrschen.

Dem *Bundesministerium für Bildung und Forschung* danke ich für die Finanzierung im Rahmen des Förderprojektes *iLaS* (FKZ 13N13089).

Abschließend möchte ich meiner Familie für den steten Rückhalt danken. Meinen Eltern Inge und Wolfgang, die mir das alles ermöglichen haben. Meiner Frau Patricia, die mir wann immer möglich den Rücken freigehalten hat. Meiner Tochter Elsa für den ganz besonderen Motivationsschub auf den letzten Metern!

II INHALTSVERZEICHNIS

I	Danksagung	I
II	Inhaltsverzeichnis	3
1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziel der Arbeit und Eingrenzung des Untersuchungsgegenstands	4
2	Grundlagen und Stand der Technik	7
2.1	Adaptive Scheinwerfersysteme für das Fernfeld.....	8
2.2	Adaptive Scheinwerfersysteme für das Nahfeld	10
2.2.1	LCD – VoLiFa2020.....	11
2.2.2	DMD – Digital Light.....	11
2.3	Propix	13
2.4	Lichtbasierte Fahrerassistenz	14
2.5	Gesetzgebung und ECE-Homologation	16
2.6	Statistik.....	17

3	Anforderungen an hochauflösende Scheinwerfersysteme	27
3.1	Auflösung.....	27
3.1.1	Fernfeld.....	28
3.1.2	Nahfeld	29
3.2	Kontrast	32
4	Untersuchte Lichtfunktionen	43
4.1	Studie 1: Wirkpotenzial des Baustellenlichts.....	46
4.1.1	Ziel der Studie und Eingrenzung des Untersuchungsgegenstands.....	46
4.1.2	Material und Methoden.....	47
4.1.3	Datenaufbereitung	56
4.1.4	Statistische Auswertung.....	60
4.1.5	Ergebnisse	63
4.1.6	Fazit.....	80
4.2	Studie 2: Ablenkpotenzial des Baustellenlichts	86
4.2.1	Ziel der Studie und Eingrenzung des Untersuchungsgegenstands.....	86
4.2.2	Material und Methoden.....	88
4.2.3	Ergebnisse	97
4.2.4	Fazit.....	110
4.3	Studie 3: Navigationspfeile	111
4.3.1	Ziel der Studie.....	112
4.3.2	Material und Methoden.....	113

INHALTSVERZEICHNIS

4.3.3	Ergebnisse	120
4.3.4	Fazit	124
5	Entwicklung einer Bewertungsfunktion	125
5.1	Kriterien	127
5.2	Bewertung.....	131
5.2.1	Geometrie und Homogenität	133
5.2.2	Dynamik	142
5.2.3	Betrachter	151
5.2.4	Geschwindigkeit	156
5.3	Die Bewertungsfunktion.....	162
5.4	Gewichtung	165
5.5	Interpretation des Ergebnisses.....	167
6	Zusammenfassung und Ausblick	171
III	Literatur	177
IV	Abbildungsverzeichnis.....	191
V	Tabellenverzeichnis	201
VI	Veröffentlichungen	205
VII	Betreute Arbeiten.....	207
VIII	Anhang.....	209
A:	Abkürzungen, Symbole und Formelzeichen	209
A.1	Abkürzungen.....	209
A.2	Formelzeichen.....	211

INHALTSVERZEICHNIS

B:	Dokumente zu den Probandenstudien	213
B.1	Baustellenlicht – Wirksamkeit.....	213
B.2	Baustellenlicht – Ablenkung	221
B.3	Umfrage visuelle Komplexität	228
C:	Messwerte, Rohdaten und Statistiken	231
C.1	Kontraststudie	231
C.2	Studie Navigationspfeile	232
C.3	Visuelle Komplexität	236
C.4	Dynamik.....	237
D:	Skripte	239
D.1	Exportskript von CorelDraw ins SVG Format zur Bestimmung der VC	239
D.2	Matlab-Skript zur Berechnung der Koeffizienten des VC-Modells $G(x)$	240

Kapitel 1

EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Heutige Automobile verfügen über eine steigende Zahl an Fahrerassistenzsystemen. Diese können die Sicherheit, den Komfort oder auch beides erhöhen. Beispiele für solche Systeme sind Abstandsregeltempomat (Adaptive Cruise Control, ACC), Verkehrszeichenerkennung oder Fernlichtassistenten. Doch die Ideen der Automobilhersteller für zukünftige Fahrzeuge gehen noch weiter. Anhand verschiedenster Technologien soll die nächste Fahrzeuggeneration in der Lage sein, mittels ihres Scheinwerfers beliebige Symbole direkt auf die Straße zu projizieren, was einige Vorteile mit sich bringen kann. Im Gegensatz zum klassischen Kombiinstrument muss der Fahrer den Blick nicht von der Straße abwenden, wodurch Gefahren jederzeit sicher erkannt werden. Weiterhin fällt auch die Akkommodation auf den Nahbereich und zurück auf den Fernbereich weg. Diese Vorteile haben heutige Head-up-Displays (HUD) zwar auch, mittels Scheinwerferprojektion jedoch sind auch augmented Reality (AR-) Anwendungen einfach umzusetzen. Ein Beispiel für solch eine AR-Lichtfunktion ist das Baustellenlicht, welches dem Fahrer die Breite des eigenen Fahrzeugs

in Form zweier projizierter Streifen direkt auf der Fahrbahn anzeigt (Abbildung 1.1).



Abbildung 1.1: Konzept des Baustellenlichtes von Audi, welches dem Fahrzeugführer die Breite seines Fahrzeuges mittels zweier projizierter Linien anzeigt [AUD15].

Doch die Möglichkeiten gehen noch weiter. Es gibt immer wieder Situationen im Straßenverkehr, in denen eine Kommunikation zwischen dem Fahrzeugführer und seiner Umwelt notwendig ist. Projektionen können solche kooperativen Situationen unterstützen. Daran wurde und wird momentan in verschiedensten Projekten geforscht [BMB16, KRA17, MER15]. Zwei Beispiele für Kommunikation zwischen Fahrzeug und anderem Verkehrsteilnehmer sind in Abbildung 1.2 veranschaulicht.

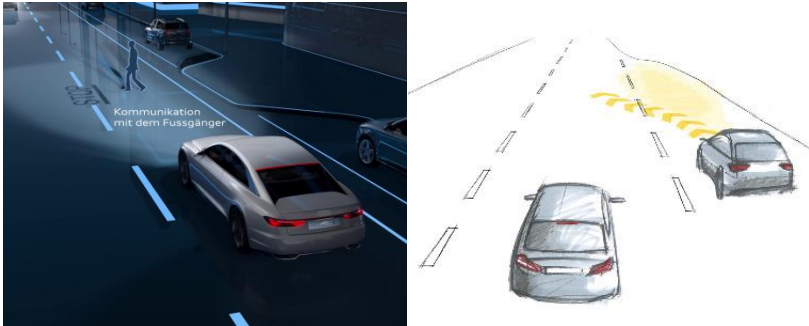


Abbildung 1.2: Beispiele für Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern [AUD15, KRA17]

All diese Themen berücksichtigen dabei aber zunächst einmal nur die Vorteile, die sich für den Fahrer und gegebenenfalls andere Verkehrsteilnehmer ergeben. Risiken, die sich durch eine potenzielle Ablenkung ergeben, dürfen jedoch keinesfalls außer Acht gelassen werden. Die technische Realisierungsmöglichkeit und die Vorteile für den Fahrer sind daher auch kein hinreichendes Kriterium, um die notwendige Zulassung für eine solche Funktion zu erhalten. Vielmehr ist es notwendig, mittels teils aufwendiger Probandenstudien die Unbedenklichkeit eines solchen Systems nachzuweisen – und zwar für jede einzelne Lichtfunktion, für die eine Zulassung angestrebt wird.

Solche neuartigen, hochauflösenden Lichtfunktionen können rein auf Softwarebasis entwickelt und per Update auf dem jeweiligen Fahrzeug installiert werden. Dadurch beträgt die Entwicklungsdauer lichtbasierter Fahrerassistenz auch nur einen Bruchteil der Dauer, die für neue Hardware oder ganz neue Technologien erforderlich sind. Somit steigt der relative zeitliche Anteil von Probandenstudien im Entwicklungs-

prozess überproportional schnell an und auch deren Kosten können gegenüber der restlichen Entwicklung nicht mehr als vernachlässigbar angesehen werden.

Da sich, auch auf Seite der Zulassungsbehörden, noch nicht auf ein einheitliches und objektives Verfahren zur Bewertung solcher Lichtfunktionen geeinigt wurde, wird eine Methode benötigt, die den Wunsch nach einer schnellen und kostengünstigen Evaluation erfüllt. Auch wenn Probandenstudien sich um Objektivität bemühen, so sind Versuchsdesign, Datenauswertung und Interpretation stets einem subjektiven Einfluss des Versuchsleiters unterworfen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll daher eine Bewertungsfunktion entwickelt werden, die beliebige hochauflösende Lichtfunktionen anhand definierter Kriterien objektiv evaluiert und die Notwendigkeit von zeitaufwendigen, kostenintensiven und nur bedingt objektiven Probandenstudien auf ein Minimum reduziert.

1.2 ZIEL DER ARBEIT UND EINGRENZUNG DES UNTERSUCHUNGSGEGENSTANDS

Zuerst werden die Anforderungen an hochauflösende Scheinwerfersysteme hinsichtlich Auflösung und Kontrast definiert. Anschließend folgen drei Probandenstudien, die zeigen, dass

- Lichtbasierte Fahrerassistenz das Fahrverhalten beeinflussen kann,
- hochauflösende Bodenprojektionen für andere Verkehrsteilnehmer nicht zwangsläufig ablenkend sind
- aber auch das Gegenteil der Fall sein kann.

Anschließend wird eine Bewertungsfunktion entwickelt, mit deren Hilfe auch bei zukünftigen, beliebigen auf Bodenprojektion basierenden Lichtfunktionen entschieden werden kann, ob diese zulassungsfähig sind oder nicht. Dabei steht die Objektivität der Bewertung stets im Vordergrund.

Die Quantifizierung des Wirkpotenzials soll nicht Teil der Bewertung und auch zukünftig nur über Probandenstudien möglich sein. Bringt ein Assistenzsystem dem Fahrer keinen ihm ersichtlichen Vorteil, so kann er diese ohnehin deaktivieren. Ebenfalls findet die Frage, ob eine Funktion nicht eher für ein HUD prädestiniert wäre, keine weitere Berücksichtigung in der vorliegenden Arbeit.

Kapitel 2

GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK

Nachfolgendes Kapitel soll zunächst einen Überblick über die sich am Markt befindlichen sowie in aktuellen Forschungsprojekten entwickelten Scheinwerfersysteme geben. Analog zu konventionellen Systemen erfolgt dabei eine Unterteilung in Nahfeld (Bereich des Abblendlichtes bis zur Hell-Dunkel-Grenze, HDG) und Fernfeld (alles oberhalb der HDG), da bisherige Seriensysteme nicht in der Lage sind, beide Bereiche gleichzeitig abzudecken.

Weiterhin wird ein Blick auf die rechtliche Situation und den Zulassungsprozess (Homologation) geworfen. Abschließend werden die in der vorliegenden Arbeit verwendeten statistischen Verfahren kurz erläutert. Ausführliche Informationen finden sich in der einschlägigen Fachliteratur [HAR09, SCH16].

2.1 ADAPTIVE SCHEINWERFERSYSTEME FÜR DAS FERNFELD

Das Abblendlicht stellt stets einen Kompromiss zwischen Erkennbarkeitsentfernung und Blendungsvermeidung dar. Adaptive Scheinwerfersysteme versuchen die Schwächen des Kompromisses auszugleichen und möglichst den gesamten Verkehrsraum auszuleuchten. Die einfachste Manipulation der Lichtverteilung wird in der adaptiven Hell-Dunkel-Grenze (aHDG) umgesetzt, wie in Abbildung 2.1 links zu sehen ist. Die HDG eines statischen Abblendlichtes hat einen fixen Neigungswinkel von -1% ($= -0,57^\circ$), bei der aHDG hingegen kann diese beliebig weit bis auf Fernlichtniveau angehoben werden. Werden von der Kamera eines oder mehrere Fahrzeuge detektiert, erfolgt zur Vermeidung von Blendung eine kontinuierliche Absenkung der HDG bis an das nächstgelegene Fahrzeug heran. Dies hat zusätzlich den Vorteil, dass auch topographische Umstände wie Kuppen nicht zu Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führen [AMS10].

Als Weiterentwicklung der aHDG kann die vHDG, also die vertikale Hell-Dunkel-Grenze gesehen werden (Abbildung 2.1 rechts). Diese reduziert nicht die Reichweite der gesamten Lichtverteilung sondern nur in dem Winkelbereich, in dem sich andere Fahrzeuge befinden. Die restliche Lichtverteilung bleibt auf Fernlichtniveau. Realisiert wird dies entweder durch Schwenkmodule oder durch einen manipulierbaren Shutter [HEL17b].

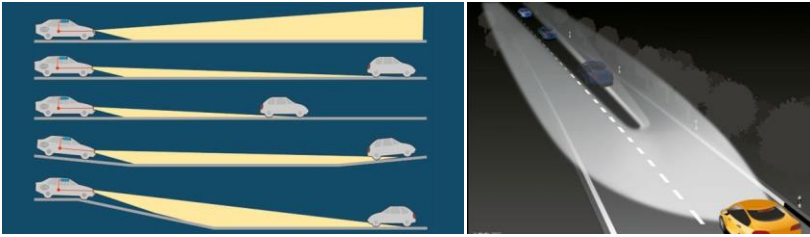


Abbildung 2.1: aHDG (links) und vHDG (rechts) [HEL17b]

Die beiden genannten Systeme bringen bereits einige Vorteile im Vergleich zu einem statischen Abblendlicht, leuchten den Verkehrsraum aber noch nicht optimal aus. Während die vHDG bei einem einzelnen Fahrzeug noch nahezu alle umliegenden Bereiche (bis auf oberhalb des Fahrzeugs) ausleuchtet, ist die Reichweite bei der aHDG bis an die Stoßstange des nächsten Fahrzeuges begrenzt. Bei mehreren auszublendenden Fahrzeugen kann auch die vHDG den zwischenliegenden Bereich nicht mehr ausleuchten.

Die logische Weiterentwicklung war daher der sogenannte Matrix-Beam. Bei dieser Technologie kommen mehrere einzeln ansteuerbare Lichtquellen zum Einsatz, die jeweils nur einen Teil des gesamten Verkehrsraums ausleuchten. Somit können Lichtverteilungen mit mehr als einer Lücke realisiert werden, wobei die Präzision der Ausblendung dabei maßgeblich von der Anzahl an steuerbaren Lichtquellen abhängt. Auch wenn das erste Patent eines Matrix-Beams bereits 1967 eingereicht wurde [ZUS67], so war es erst 2013 im *Audi A8* in einem Serienfahrzeug mit insgesamt 50 Segmenten [AUD13] verfügbar. Heute reicht die Spanne von 16 Segmenten im *Opel Astra* [OPE17] bis hin zu 168 im MULTIBEAM LED Scheinwerfer von *Hella* [HEL16].

Erstere unterteilen den Verkehrsraum dabei nur in vertikale Segmente, letzterer arbeitet hingegen mit 3 Zeilen und 28 Spalten je Scheinwerfer.

Zukünftige Matrix-Beam-Scheinwerfer werden diese Zahl noch deutlich übersteigen. So wurde im BMBF-geförderten Forschungsprojekt μ AFS ein Matrix-Beam mit 1024 Pixeln je Emitter entwickelt, wobei jeweils drei Emitter in einen Scheinwerfer integriert werden. Somit ergeben sich insgesamt 6144 Pixel [MÖL16] und die Möglichkeit, auch das Nahfeld damit adaptiv auszuleuchten.

2.2 ADAPTIVE SCHEINWERFERSYSTEME FÜR DAS NAHFELD

Die Aufgabe eines Scheinwerfers im Fernfeld besteht überwiegend in der optimalen Ausleuchtung des Verkehrsraums ohne Blendung anderer Verkehrsteilnehmer. Dies kann wie im vorigen Kapitel gezeigt schon mit rudimentären Manipulationen der Lichtverteilung erfolgen. Das Abblendlicht kann dabei in der Regel statisch sein oder wird als Kurvenlicht geschwenkt.

Um adaptive Lichtfunktionen im Nahfeld (auch Vorfeld genannt) umzusetzen, sind sehr viel feinere Strukturen nötig, da zumeist statische oder gar dynamische Symbole dargestellt werden sollen. Derzeit sind noch keine derartigen Scheinwerfer in Serienfahrzeugen verbaut, jedoch gibt es diverse Ansätze zur Realisierung dieser hohen Auflösungen, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden. Die Auflistung beschränkt sich dabei auf Scheinwerfer mit weißem Licht,

da andere Farben für Scheinwerfer nach geltenden Regelungen (ECE Regelung 123 Abs. 7.1) nicht zulässig sind [ECE13b].

2.2.1 LCD – VoLiFa2020

Im April 2014 begann das vom BMBF geförderte Forschungsprojekt VoLiFa 2020, welches die Umsetzung eines hochauflösenden Scheinwerfers mittels Flüssigkristalldisplay (LCD) zum Ziel hatte [VOL15]. Das Resultat war ein Scheinwerfer mit 30.000 Pixeln und einem Öffnungswinkel von 30° horizontal (-10° bis +20°) und 10° vertikal (+/-5°) [DUH17]. Damit bietet er eine Pixelauflösung von 0,1° x 0,1° und dient gleichermaßen dem Nahfeld wie auch dem Fernfeld.

Die Auflösung ist dabei nur bedingt geeignet, um sämtliche adaptiven Funktionen optimal abzubilden (vgl. Kapitel 3.1). Eine höhere Anzahl an Pixeln ist aus Effizienzgründen aber nicht sinnvoll.

2.2.2 DMD – DIGITAL LIGHT

Mercedes-Benz bietet mit seinem zukünftigen Scheinwerferkonzept „Digital Light“ eine Auflösung von theoretisch 1,3 Mio. Pixeln je Scheinwerfer zur Projektion von Symbolen auf die Straße [GUT17, MER18]. Dabei wird auf ein Mikrospiegelarray der Firma *Texas Instruments (TI)*, Typ *DLP5531-Q1* zurückgegriffen [SCH18]. Bei der von TI als *Digital Light Processing (DLP®)* bezeichneten Technologie

wird das Licht einer Lichtquelle (hier LED) auf ein DMD (*Digital Micromirror Device*) gelenkt. Jeder Spiegel hat dabei zwei mögliche Positionen. In der einen Position wird das Licht zur Sekundäroptik und somit auf die Straße gelenkt. In der anderen Position wird es auf einen Absorber umgelenkt, wodurch ein schwarzes Pixel im Verkehrsraum entsteht. Abbildung 2.2 verdeutlicht das Prinzip des DLPs.

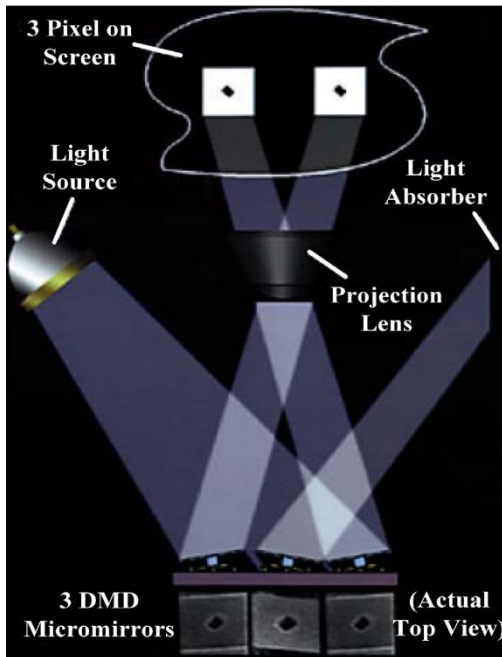


Abbildung 2.2: Funktionsprinzip eines DMD Arrays. Je nach Spiegelstellung wird das Licht entweder zur Projektionsoptik (helles Pixel) oder zum Absorber (dunkles Pixel) gelenkt [HUN10].

Um den Anforderungen an Lichtverteilungen im Verkehrsraum gerecht zu werden, greift *TI* auf eine Diamantanordnung der Mikrospiegel zurück wie in Abbildung 2.3 zu sehen. Diese staucht die Zeilen um einen Faktor 2, was in einem Seitenverhältnis des Arrays von 2:1 resultiert. Da allerdings immer nur 2 Pixel gleichzeitig angesteuert werden, halbiert sich die effektive Auflösung auf 1152x576 Pixel [TEX16].

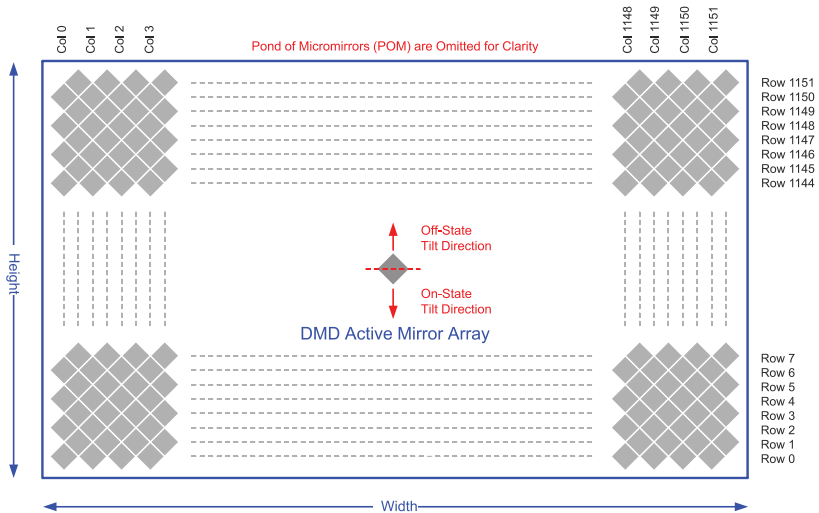


Abbildung 2.3: Diamantanordnung des *DLP5531* von *Texas Instruments* [TEX16]

2.3 PROPIX

Propix ist das Akronym für „Projektor-Pixellicht“ und bezeichnet einen von Michenfelder entwickelten Forschungsscheinwerfer [MIC15]. Als Lichtquelle dienen sechs FullHD-Projektoren auf *DLP*®-

Basis [BEN14], die sich in bestimmten Bereichen überlagern und insgesamt in einen Öffnungswinkel von $\pm 32^\circ$ horizontal und $-14^\circ \dots 11^\circ$ vertikal abdecken. Die Ansteuerungssoftware, die die Bildausgabe jedes einzelnen Projektors in Echtzeit berechnet, wurde eigens dafür am *Lichttechnischen Institut (LTI)* entwickelt.

Propix ermöglicht die Durchführung von Probandenstudien mit hochauflösenden, dynamischen Lichtfunktionen wie auch in Arbeiten von Hollmig, Hofner, Cristea und Geßner (vgl. Kapitel 3.2) gezeigt wurde [CRI17, GEß18, HOF14, HOL14].

2.4 LICHTBASIERTE FAHRERASSISTENZ

Der Begriff der Fahrerassistenz (engl. Advanced Driver-Assistance Systems, ADAS) ist nicht eindeutig definiert. Allgemein lässt sich aber festhalten, dass Fahrerassistenzsysteme (FAS) „den Fahrer in allen Verkehrssituationen unterstützen“ sollen [WAL06]. Beispiele für solche Systeme sind ACC, Spurwechsel- und Spurhalteassistent oder Verkehrszeichenerkennung. Aber auch im Bereich der Lichttechnik sind die Assistenzsysteme fest verankert. Noch umfassen diese lediglich die genannten Fernlichtassistenten, die auch blendfreies Fernlicht ermöglichen. Doch bereits jetzt wird die Zukunft in der Projektion von hochauflösenden Symbolen im Nahfeld gesehen [AUD15, BMW15, MER16b]. Mittels Licht soll sowohl mit dem Fahrer als auch mit der Umwelt kommuniziert werden. Beispiele hierfür sind das Baustellenlicht (Anzeige der Fahrzeugbreite in engen Situationen),

der Einfädelassistent [KRA16] oder die Warnung vor Hindernissen [ROT14].

Je nach Intention der Funktion kann das Symbol sehr schlicht und intuitiv oder eher komplex gehalten werden. Vier Beispiele sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

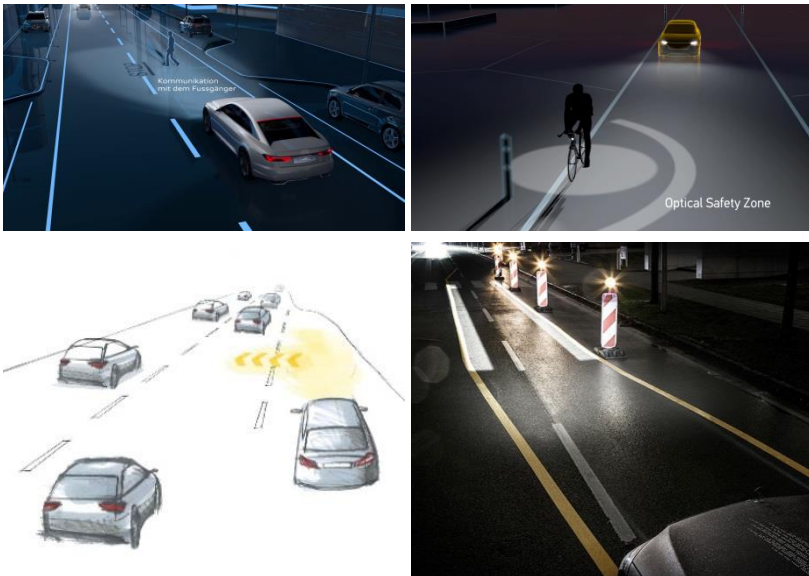


Abbildung 2.4: Beispiele lichtbasierter Fahrerassistenz. l.o. Fußgängerkommunikation [AUD15], r.o. Radfahrermarkierung mit Sicherheitsbereich [HEL17a], l.u. Einfädelassistent [KRA17], r.u. Baustellenlicht [MER16a]

Stand heute ist noch keine dieser Funktionen zugelassen. Welche Bedingungen hier gelten und wie das Zulassungsverfahren aufgebaut ist, wird im nächsten Kapitel näher beschrieben.

2.5 GESETZGEBUNG UND ECE-HOMOLOGATION

Hochauflösende Lichtfunktionen, wie sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit diskutiert werden, benötigen wie jede Scheinwerferlichtverteilung eine Zulassung, um im öffentlichen Verkehrsraum verwendet werden zu dürfen. Im Allgemeinen wird die Zulassung adaptiver Lichtfunktionen in der UNECE Regelung 123 geregelt [ECE13b]. Die Projektion von hochauflösenden Symbolen fällt jedoch nicht unter diese Regelung, da es einer starken Inhomogenität im Erscheinungsbild entspricht. Vielmehr muss der Hersteller hier auf die Richtlinie 2007/46/EG, Artikel 20 „Ausnahmen für neue Techniken oder Konzepte“ zurückgreifen [EUR07]. Diese erlaubt es ihm, eine Sonderzulassung bei der national zuständigen Behörde (in Deutschland das Kraftfahrtbundesamt, KBA) zu beantragen, welche die Funktion für das beantragte Fahrzeugmodell vorläufig genehmigen kann. Die Behörde muss sich dabei an die EU Richtlinie halten, die insbesondere fordert, dass „eine Beschreibung der davon [hier: die Lichtfunktion] berührten Sicherheits- und Umweltschutzaspekte sowie der getroffenen Maßnahmen“ [EUR07] vorgelegt wird. Weiterhin gefordert wird „eine Beschreibung der durchgeführten Prüfungen und ihrer Ergebnisse zum Nachweis, dass Sicherheit und Umweltschutz mindestens in dem gleichen Maße gewährleistet sind wie durch die Anforderungen, von denen eine Ausnahme beantragt wird.“ [EUR07] Dies heißt im Umkehrschluss, dass eine neuartige Lichtfunktion insbesondere die Sicherheit (auch anderer Verkehrsteilnehmer) nicht gefährden darf. Dieser Nachweis kann momentan nur über

Probandenstudien von einer oder mehreren unabhängigen Institutionen erbracht werden.

Soll diese Sondergenehmigung in die EU-weit (und darüber hinaus) geltenden UNECE Regelungen überführt werden, so müssen die Forschungsergebnisse zu den genannten Sicherheitsaspekten zunächst der *Working Party on Lighting and Light-Signalling (GRE)* vorgestellt werden. Diese stellt ein Untergremium des *World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29)* dar und erarbeitet einen Vorschlag für den Gesetzestext. Über diesen kann dann von WP.29 abgestimmt und dieser anschließend in die entsprechende vorhandene oder eine neue Regelung aufgenommen werden. Ab dem Zeitpunkt der Gültigkeit der UNECE-Regelung, kann die Typzulassung dann in einem beliebigen Mitgliedsstaat erfolgen und gewährleistet die Zulassung in allen Mitgliedsstaaten des Abkommens.

2.6 STATISTIK

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die in der vorliegenden Arbeit verwendeten statistischen Methoden geben. Es erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Für weitergehende Informationen sei auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen, wie beispielsweise Bortz, Döring oder Hartung [BOR99, DÖR16, HAR09]. Zur Berechnung der Statistiken sowie Grafikerstellung wurden in der Regel *IBM SPSS Statistics 24*, *G*Power* oder *Microsoft Excel* verwendet.

Zur Darstellung von Messwerten wird häufig der sogenannte Box-Whisker-Plot oder kurz Boxplot verwendet. Dieser gibt, im Gegensatz zu einem einfachen Säulendiagramm mit Fehlerbalken, besseren Aufschluss über die Verteilung der Werte. Abbildung 2.5 zeigt einen fiktiven Boxplot zur Veranschaulichung. Die grüne Box wird durch das untere und obere Quartil (25% und 75%) begrenzt und enthält somit die mittleren 50% der Messwerte. Der Median wird als Strich in der Box dargestellt und lässt Rückschlüsse auf die Verteilung der Daten respektive deren Schiefe zu. Die Antennen (*Whisker*) reichen bis zum 1,5-fachen Interquartilsabstand (IQR). Dieser berechnet sich zu $Q_{75}-Q_{25}$ und entspricht somit der Länge der Box. Alles außerhalb der Antennen sind Ausreißer, wobei bis zum 3-fachen IQR von milden (Kreissymbol), darüber von extremen (Sternsymbol) Ausreißern gesprochen wird.

Der aufgenommene Messwert (z. B. Erkennbarkeitsentfernung) wird als abhängige Variable (AV) bezeichnet. Die vom Versuchsleiter manipulierte Variable, auch unabhängige Variable (UV) genannt, spiegelt das Treatment wider (z. B. kein Licht vs. Abblendlicht vs. Fernlicht).

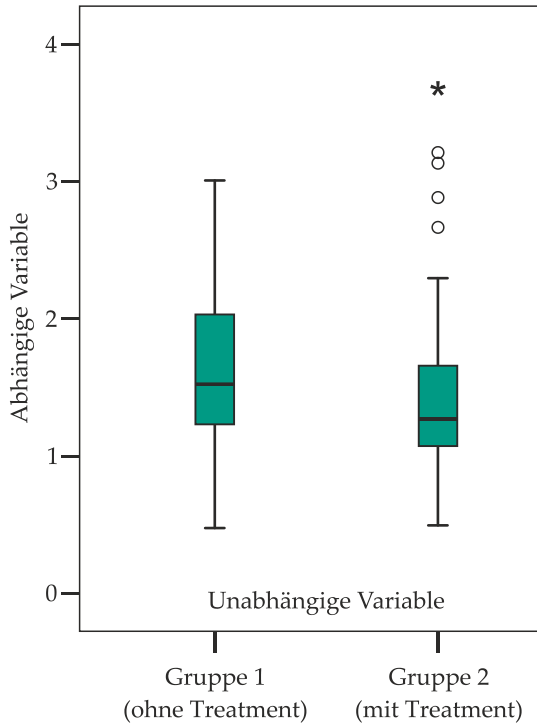


Abbildung 2.5: Beispielhafter Boxplot. Kreise markieren milde Ausreißer, Sterne extreme Ausreißer

Bevor eine Probandenstudie durchgeführt wird, müssen zunächst die zu überprüfenden Forschungshypothesen aufgestellt werden. Diese formulieren eine Vermutung über den erwarteten Einfluss des Treatments auf die AV. Sofern der aktuelle Stand der Forschung (beispielsweise durch ähnliche, bereits durchgeführte Studien) dies zulässt, sollten die Hypothesen dabei nicht nur ausdrücken, worauf das Treatment einen Einfluss hat, sondern auch in welche Richtung

sich die AV durch das Treatment verändert. Im ersteren Fall wird von einer ungerichteten, zweiseitigen Hypothese gesprochen, im letzteren Fall von einer gerichteten, einseitigen Hypothese. Es werden immer zwei Hypothesen aufgestellt: die Nullhypothese H_0 sowie die Alternativhypothese H_1 . Die Nullhypothese besagt stets, dass das Treatment keinen Einfluss auf die AV hat. Unterscheiden sich die Messwerte mit Treatment stark in die vermutete Richtung von den Messwerten ohne Treatment, so wird die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese angenommen.

Wie wahrscheinlich es ist, dass wirklich das Treatment Ursache der Messunterschiede ist und nicht der Zufall, wird mittels statistischer Methoden evaluiert. Das Ergebnis ist ein Signifikanzwert (p-Wert), welcher ausdrückt, wie hoch die Irrtumswahrscheinlichkeit bei Annahme der Alternativhypothese ist. Die fälschliche Annahme der Alternativhypothese wird als Fehler 1. Art oder auch α -Fehler bezeichnet. Eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% hat sich als Akzeptanzniveau etabliert, p-Werte kleiner 5% werden somit als „statistisch signifikant“ bezeichnet. Umgekehrt besteht allerdings auch die Möglichkeit, dass das Ergebnis statistisch nicht signifikant ist, die Alternativhypothese aber dennoch der Realität entspricht. Dies ist dann ein Fehler 2. Art, auch β -Fehler genannt. Die möglichen Kombinationen sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Entscheidungstabelle mit Wahrscheinlichkeiten P nach Döring [DÖR16]

		Realität entspricht	
		H ₁	H ₀
Signifikanztest entscheidet für	H ₁	Effekt vorhanden Effekt gefunden $P = 1 - \beta$	Effekt nicht vorhanden Effekt gefunden $P = \alpha$
	H ₀	Effekt vorhanden Effekt nicht gefunden $P = \beta$	Effekt nicht vorhanden kein Effekt gefunden $P = 1 - \alpha$

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Probandenstudien wurden alle im within-subjects-Design durchgeführt, d. h. jeder Proband durchlief jede untersuchte Situation. Dies hat einige Vorteile gegenüber getrennten Probandengruppen, wie z. B. eine höhere Teststärke wodurch die Zahl der notwendigen Probanden reduziert werden kann. Zur Überprüfung der Signifikanz wurde daher ein Allgemeines Lineares Modell (ALM) mit Messwiederholung herangezogen. Messwiederholung bezieht sich hier auf das within-subjects-Design und ist nicht zu verwechseln mit der mehrfachen Messwertaufnahme eines Probanden in derselben Situation. Die mehrfache Messwertaufnahme wird zur Reduzierung der Streubreite und Erhöhung der Validität genutzt, da Messwertausreißer weniger ins Gewicht fallen.

Teil des ALM ist die Varianzanalyse (ANOVA, engl. für Analysis of Variances), bei der es sich um einen parametrischen Test handelt. Die Verwendung solcher Tests hat einige Grundvoraussetzungen. So muss u. a. die Stichprobe normalverteilt sein sowie eine Varianzhomogenität

(Homoskedastizität) vorliegen. Der Test auf Normalverteilung erfolgt mittels Shapiro-Wilk- und Kolmogorov-Smirnov-Test, die Varianzgleichheit überprüft der Levene-Test. Wird eine oder beide dieser Voraussetzungen verletzt, so wäre die Verwendung nicht-parametrischer Tests erforderlich. Diese sind allerdings a priori weniger aussagekräftig, sodass Rasch et al. empfehlen, dennoch parametrische Tests zu verwenden. Bei nicht zu kleinen Stichproben sind diese sehr robust gegenüber der Verletzung und liefern „in den meisten Fällen zuverlässige Ergebnisse“. [RAS14]

Eine weitere Voraussetzung der Varianzanalyse mit Messwiederholung ist die Sphärizität (auch Zirkularität). Einfach ausgedrückt bedeutet dies, dass die Varianzen zwischen mehreren Stufen eines Faktors homogen sein müssen. Dies kann z. B. mittels Mauchly-Test überprüft werden. Sollte keine Sphärizität vorliegen, kann eine Korrektur der Freiheitsgrade erfolgen. Für leichte Verletzungen ($\epsilon > 0,75$) wird die Korrektur nach Huyn-Feldt angewandt, bei stärkeren Verletzungen ($\epsilon < 0,75$) die Korrektur nach Box [BOX54] (in SPSS fälschlicherweise als Greenhouse-Geisser ausgegeben [RAS14]).

Weiterhin ist zu beachten, dass beim ALM je nach Studiendesign mit demselben Datensatz mehrere Signifikanztests gerechnet werden. Dadurch würde sich der akzeptierte α -Fehler kumulieren, was unbedingt vermieden werden muss. Für n durchgeführte Tests steigt die Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha_{kumuliert}$ auf

$$\alpha_{kumuliert} = 1 - (0,95)^n \quad (2.1)$$

an. Daher wurden die Daten in diesem Fall stets einer Bonferroni-Korrektur unterzogen, eine konservative aber bewährte Methode, diesem Problem entgegenzuwirken. Dazu wird das α -Niveau der einzelnen Tests so weit reduziert, dass der kumulierte α -Fehler wieder den ursprünglichen 5% entspricht. Damit nicht bei jedem Test der errechnete p-Wert gegen ein anderes α -Niveau verglichen werden muss, berücksichtigt SPSS dies und die Werte können immer gegen 5% verglichen werden.

Eine festgestellte Signifikanz alleine sagt noch nichts über die Stärke des gefundenen Effekts aus. Der Einfluss einer unabhängigen Variablen kann zwar statistisch signifikant sein, der Effekt jedoch so klein, dass er in der Praxis keine Relevanz hat. Daher gibt es in der Statistik verschiedene Methoden, die Effektstärke zu schätzen. Einen ersten Anhaltspunkt gibt η_p^2 , das partielle Eta-Quadrat. Dieses beschreibt den Anteil der Varianz, der durch den Haupteffekt aufgeklärt wird. Zusätzlich lässt sich hieraus gemäß Formel 2.2 Cohens f bestimmen, welches die Stärke des Gesamteffekts eines Faktors wiedergibt.

$$f = \sqrt{\frac{\eta_p^2}{1 - \eta_p^2}} \quad (2.2)$$

Für den paarweisen Vergleich von Mittelwerten (ähnlich große Gruppen vorausgesetzt) hat sich die standardisierte Differenz d bzw. Cohens d als Maß etabliert. Für ähnliche Standardabweichungen wird dazu der Mittelwertunterschied gemäß Formel 2.3 ins Verhältnis zur Standardabweichung gesetzt.

$$D = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sigma} \quad (2.3)$$

μ bezeichnet dabei den jeweiligen Mittelwert der beiden Stichproben und σ die Standardabweichung. Unterscheiden sich die beiden Varianzen, so kann die Formel angepasst werden:

$$d = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}{2}}} \quad (2.4)$$

Die Interpretation von Cohens f und der standardisierten Differenz d hinsichtlich ihrer Effektstärke ist in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Tabelle 2.2: Cohens f und Cohens d mit zugehöriger Effektstärke

f	d	Effektstärke
$\geq 0,1$	$\geq 0,2$	kleiner Effekt
$\geq 0,25$	$\geq 0,5$	mittlerer Effekt
$\geq 0,4$	$\geq 0,8$	großer Effekt

Abschließend sei noch angemerkt, dass die Interpretation der Effektstärken stets kritisch zu betrachten ist. Insbesondere bei kleinem Stichprobenumfang wird die Effektstärke durch die erläuterten Methoden häufig überschätzt. Zwar gibt es viele weitere Methoden, jedoch sind auch diese nicht uneingeschränkt nutzbar. Eine ausführliche Diskussion kann bei Döring [DÖR16] nachgelesen werden.

Im Gegensatz zu den bisher genannten Statistiken, die Unterschiede zwischen Gruppen vergleichen, gibt es auch noch Analysemethoden,

um die Gemeinsamkeit, genauer gesagt die (lineare) Abhängigkeit zwischen zwei Messgrößen zu bestimmen. Das typische Beispiel wäre die Korrelationsstatistik. Hier ist es besonders wichtig, auf das Skalenniveau zu achten. Die häufig verwendete Korrelation nach Pearson setzt zwei intervallskalierte (metrische) Variablen voraus und gibt deren linearen Zusammenhang wieder. Sind eine oder beide Variablen allerdings ordinalskaliert, so muss die Rangkorrelation nach Spearman (Spearman's ρ) oder Kendall (Kendall's τ) herangezogen werden. Kendall's τ stellt dabei die robustere Methode dar und wird insbesondere für kleine Stichproben empfohlen [CRO10].

Kapitel 3

ANFORDERUNGEN AN HOCH- AUFLÖSENDE SCHEINWERFERSYSTEME

Nachfolgend soll überprüft werden, welche Anforderungen an hochauflösende Scheinwerfer gestellt werden müssen. Diese Anforderungen beinhalten zunächst eine hinreichend hohe Auflösung, um die gewünschte Lichtverteilung darstellen zu können. Weiterhin muss der Kontrast einerseits hoch genug sein, damit die Lichtfunktion gut wahrzunehmen ist und andererseits auch nicht so hoch, dass es stört. Die Anforderungen an die Auflösung werden dabei analytisch bestimmt, während der optimale Kontrast als subjektive Größe über eine Probandenstudie ermittelt wurde.

3.1 AUFLÖSUNG

Der Begriff Auflösung bezieht sich im Kontext der (automobilen) Lichtverteilungen auf einen Öffnungswinkel. Dabei wird, je nach System, zwischen zwei oder drei Arten unterschieden [GUT15, JAH16]: Die Einblendauflösung ist der kleinstmögliche Spot, den das System ausleuchten kann, beispielsweise ein Pixel. Die Ausblendauflösung ist der kleinste Bereich, den ein System aus der Lichtverteilung

„ausschneiden“ kann. Diese kann aufgrund von Überlappung der Pixel je nach Entfernung deutlich kleiner sein, als die Einblendauflösung. Einen Spezialfall stellt die Verschiebeauflösung dar. Sie definiert, wie präzise ein Spot oder eine Ausblendung (konstanter Größe) verschoben werden kann. Hierin unterscheiden sich vor allem diskrete Systeme (Matrixbeam) von kontinuierlichen Systemen (Schwenkmodule, scannende Systeme).

Für die Anforderungen an die Auflösung muss aufgrund der verschiedenen Anwendungsgebiete zwischen dem Nahfeld und dem Fernfeld unterschieden werden (vgl. auch Kapitel 2.1 und 2.2). Während beim Fernfeld vor allem andere Verkehrsteilnehmer oder Objekte im Verkehrsraum die Funktion bestimmen, steht beim Nahfeld der Fahrer selbst im Fokus. Als Fernfeld wird in dieser Arbeit der Bereich ab der Hell-Dunkel-Grenze (HDG) definiert.

3.1.1 FERNFELD

Generelle Anforderungen an die Auflösung von adaptiven Scheinwerfersystemen im Fernfeld finden sich bei Jahn [JAH14] wieder. Die Arbeit kommt dabei zu dem Schluss, dass die präzise Markierung von Fußgängern und Wild, die Entblendung von Verkehrsschildern zur Reduktion der Eigenblendung sowie eine gesetzeskonforme Darstellung der HDG mit ihren hohen Anforderungen an Form und Gradient unter Verwendung quadratischer Pixel mit einer Auflösung von $0,1^\circ$ machbar sind.

Diese Auflösung findet sich auch bei Reinprecht et al. [REI15], Courcier et al. [COU15] und im VOLIFA 2020 Projekt [VOL15] wieder.

3.1.2 NAHFELD

Im Nahfeld ist vor allem die Projektion von Mustern und Formen interessant. Eine mögliche Lichtverteilung stellt dabei das Baustellenlicht dar, welches Kapitel 4 ausführlich behandelt. Bei einer exemplarisch gewählten Linienbreite von 15 cm gemäß der Breite der Fahrbahnmarkierung auf Autobahnen [FOR93], ergibt sich aus geometrischen Überlegungen ein entfernungsabhängiger Projektionswinkel, der in Abbildung 3.1 als Funktion aufgetragen ist. An der HDG beispielsweise, welche sich bei 65 cm Einbauhöhe in einer Entfernung von 65 m befindet [ECE13a, ECE13b], entspricht 15 cm einem Projektionswinkel von $0,13^\circ$.

Dennoch ist dies nicht die Mindestauflösung mit der eine solche Linie dargestellt werden kann. Um eine Linie konstanter Breite auf eine nicht-orthogonale Fläche zu projizieren, muss das projizierte Bild aufgrund der optischen Verzerrung trapezförmig sein. Unter der Annahme rechteckiger Pixeln bilden die diskretisierten Schrägen des Trapezes eine Treppenform aus (sog. „Treppeneffekt“) [SZA78]. Die Diskretisierung sei beispielhaft mit 3-facher, 9-facher und 142-facher Auflösung in Abbildung 3.2 (oben) dargestellt, d. h. die schmale Kante wird bereits in 3, 9 bzw. 142 Pixel unterteilt. Selbst bei 9-facher Auflösung, was einem Pixelöffnungswinkel von $0,0147^\circ$ entspräche, ist die Diskretisierung noch deutlich sichtbar. Antialiasing hilft diesen zu

reduzieren, indem mit Graustufen gearbeitet wird [WAT09] (vgl. Abbildung 3.2 unten). Zusätzlich wird der Effekt in der Praxis noch durch die Rauheit der Straße aufgrund ihrer diffusen Reflexionscharakteristik abgeschwächt. Dennoch ist deutlich zu sehen, dass aus technischer Sicht von zu großen Projektionsdistanzen abgeraten werden kann.

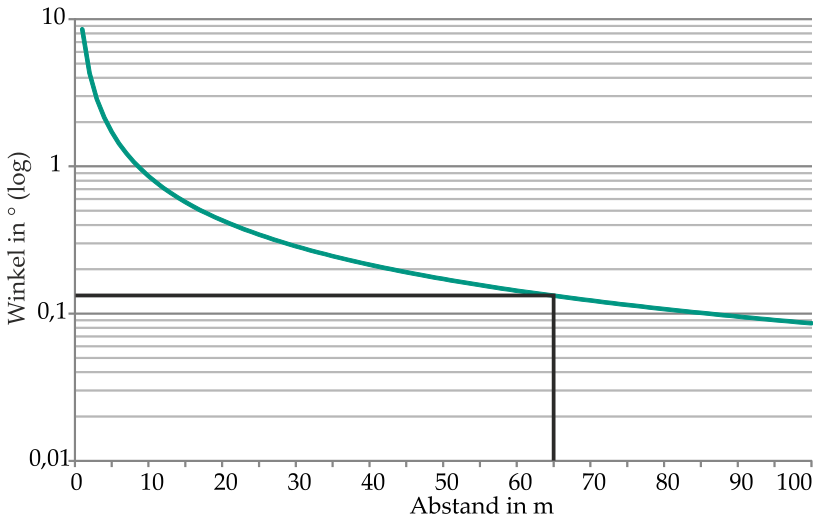


Abbildung 3.1: Projizierter Winkel einer 15 cm breiten Linie in Abhängigkeit vom Abstand vor dem Fahrzeug. Die markierte Entfernung von 65 m entspricht der Position der HDG.

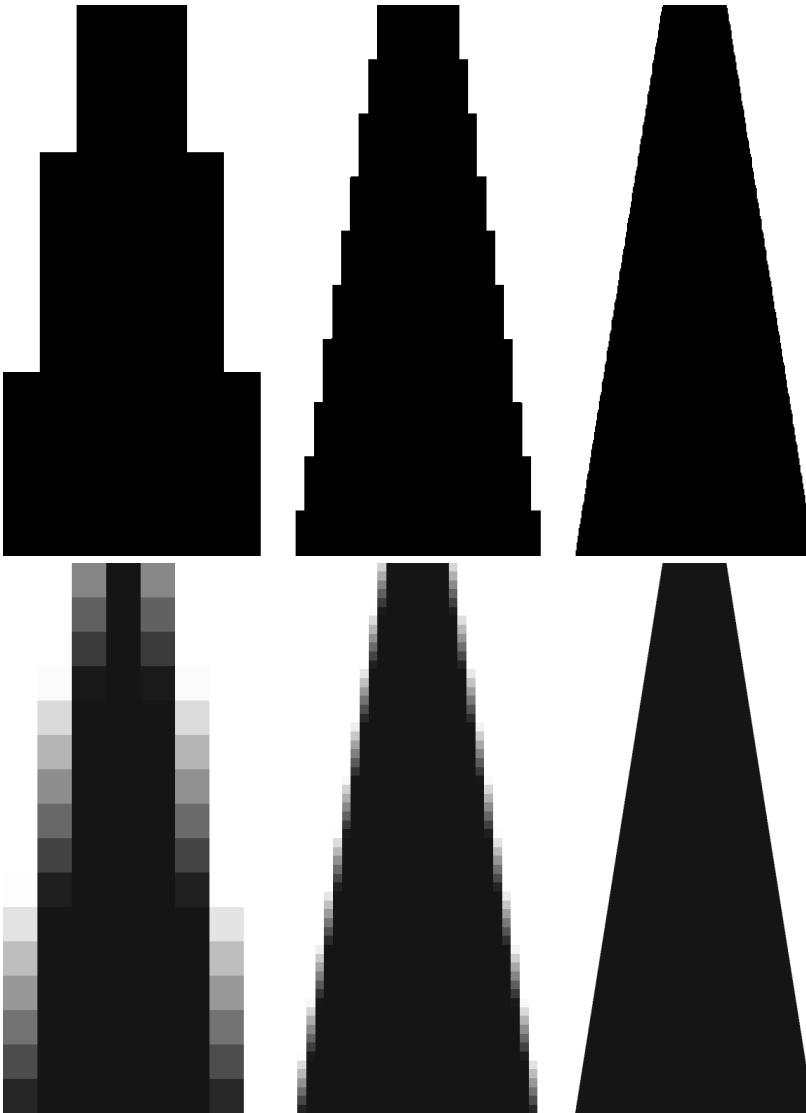


Abbildung 3.2: Trapez zur Projektion eines Baustellenlichts in 3-facher, 9-facher und 142-facher Auflösung der Mindestbreite ohne (oben) und mit (unten) Antialiasing.

3.2 KONTRAST

Die Frage nach dem optimalen Kontrast hochauflösender Lichtfunktionen wurde in Zusammenarbeit mit Cristea [CRI17] in einer statischen Probandenstudie untersucht. Da der als angenehm empfundene Kontrast ein sehr subjektiver Wert ist, wurde eine möglichst artifizielle Umgebung mit gut zu kontrollierenden Parametern benötigt. Die Wahl fiel dabei auf eine Tiefgarage ohne dauerhafte Beleuchtung. Über die Decke reflektierende LED-Streifen mit PWM-Dimmung gewährleisteten eine diffuse Umgebungshelligkeit mit elf äquidistanten Stufen. Retroreflektierende Schilder wurden verdeckt und der glänzende Boden aufgrund zu hoher Vorwärtsreflexion mit Malervlies bedeckt, um eine asphaltähnliche Charakteristik zu erreichen. In Abbildung 3.3 ist eine Leuchtdichteaufnahme mit einem Stück des Malervlieses auf Asphalt zu sehen. Die Reflexionscharakteristik ist hinreichend ähnlich.

Der in Kapitel 2.3 beschriebenen Versuchsscheinwerfer *Propix*, montiert an einem *Audi A6 C7*, projizierte sowohl die Lichtfunktion als auch das Abblendlicht. Als mögliche Parameter mit Einfluss auf den als angenehm empfundenen Kontrast wurden vorab die Fläche einer Lichtfunktion, die Umgebungshelligkeit und das daraus resultierende Adaptationsniveau sowie der Gradient, also der Übergang zwischen Lichtfunktion und umgebendem Abblendlicht, präsumiert. Folglich musste eine Lichtfunktion gewählt werden, deren Fläche und Gradient variabel ist, ohne dass dies einen Einfluss auf deren Funktionalität hat. Die Wahl fiel auf das Baustellenlicht, da sich über die Linienbreite die leuchtende Fläche bei gleichbleibender umschließender Fläche

variieren lässt. Ebenfalls können die Kanten mit einem weichen Gradienten versehen werden ohne die Funktionalität zu beeinträchtigen, was bei Darstellung eines komplexeren Symbols, beispielsweise der Warnung vor einem Stauende, nicht als sinnvoll erachtet wird.

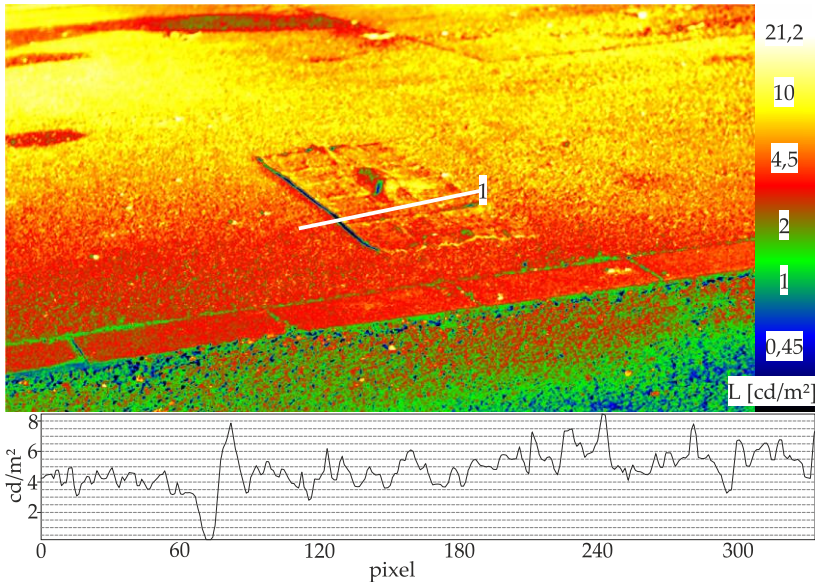


Abbildung 3.3: Leuchtdichteaufnahme eines Stücks Malervlies auf Asphalt in 2-fach logarithmischer Darstellung mit Grauwertbildschnitt (Linie 1)

Es wurden drei Größen definiert, bei denen sich die leuchtende Fläche jeweils verdoppelt. Um den zeitlichen Aufwand für die Probanden gering zu halten, wurde der Einfluss des Gradienten nur bei einer Größe untersucht, sodass sich die vier in Abbildung 3.4 skizzierten Lichtverteilungen ergaben.

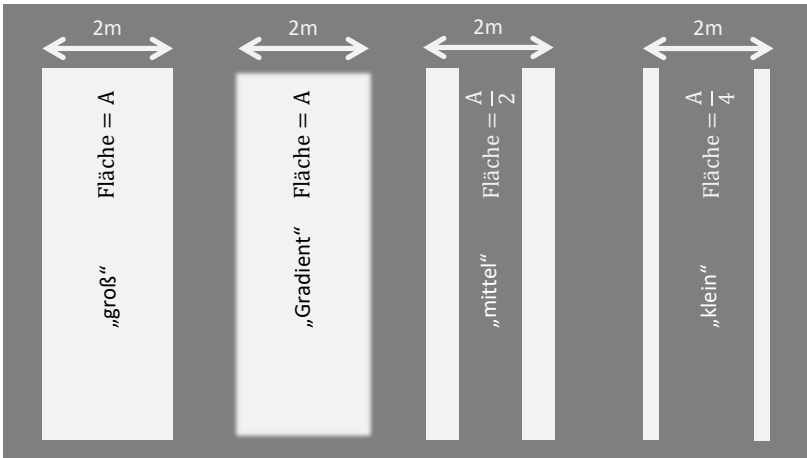


Abbildung 3.4: Varianten des Baustellenlichtes mit sich jeweils halbierender Fläche bzw. einem Gradienten

Aufgabe der Probanden war es, mithilfe eines Drehreglers die „Helligkeit der Lichtfunktion“ auf ein für sie angenehmes Maß einzustellen. Zur Bestimmung des daraus resultierenden Kontrastes nach Weber (vgl. Formel 3.1) war es nötig, dass im Gegensatz zu Serienfahrzeugen auch das die Lichtfunktion umgebende Abblendlicht eine möglichst isotrope Leuchtdichte hatte. Die Lichtfunktion inkl. Abblendlicht ist in den Fotos der Abbildung 3.5 dargestellt.

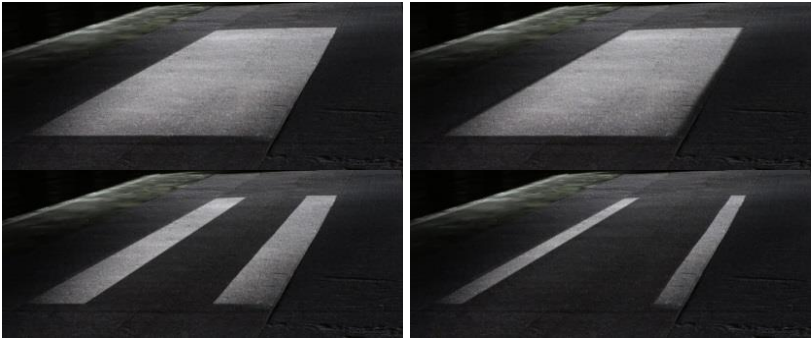


Abbildung 3.5: Fotos der vier Varianten in der Tiefgarage inkl. homogenem Abblendlicht.

Die Lichtfunktionen wurden nur bei vier der elf realisierbaren Umgebungsleuchtdichten präsentiert, abermals um den zeitlichen Aufwand zu reduzieren. Aus demselben Grund erfolgte die Untersuchung des Gradienten nur bei der niedrigsten und bei der höchsten Umgebungsleuchtdichte. Die lichttechnischen Werte der Umgebungsleuchtdichte können Tabelle 3.1 entnommen werden:

Tabelle 3.1: Gemessene Umgebungsleuchtdichten bei vier definierten Dimmstufen der LED-Streifen

PWM-Stufe	0%	30%	60%	90%
Leuchtdichte [cd/m^2]	0,002	0,242	0,562	0,896

War der Proband mit seiner eingestellten Helligkeit zufrieden, wurde eine Leuchtdichteaufnahme gemacht. In dieser lassen sich dann die Leuchtdichten der Lichtfunktion und der Umgebung auswerten und daraus der Kontrast nach Weber berechnen:

$$K_W = \frac{L_O - L_U}{L_U} \quad (3.1)$$

Hier bezeichnet L_O ganz allgemein die Objektleuchtdichte und L_U die Umgebungsleuchtdichte. Die Bereiche wurden wie beispielhaft in Abbildung 3.6 gezeigt definiert.

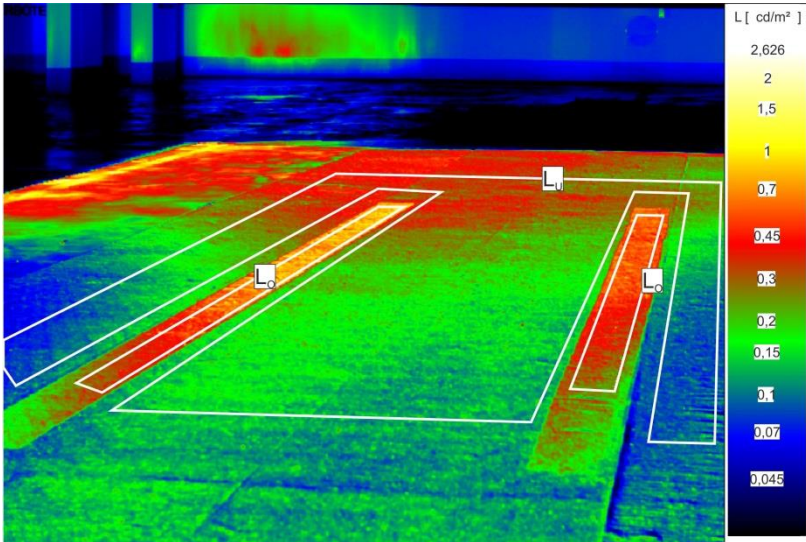


Abbildung 3.6: Leuchtdichtebilder der Variation „klein“ in 2-fach logarithmischer Darstellung. Die weißen Linien umranden die ausgewerteten Regionen für Objekt und Umfeld.

Somit ergab sich insgesamt eine 3-dimensionale Datenmatrix die den Kontrast in Abhängigkeit von der Umgebungsleuchtdichte und der Fläche wiedergibt sowie ein zweistufiger Paarvergleich der Lichtfunktion mit und ohne Gradient bei zwei Umgebungsleuchtdichten.

Die Mittelwerte der Kontraste, aufgetragen über der Umgebungsleuchtdichte und der Fläche, ergeben das in Abbildung 3.7 dargestellte Diagramm.

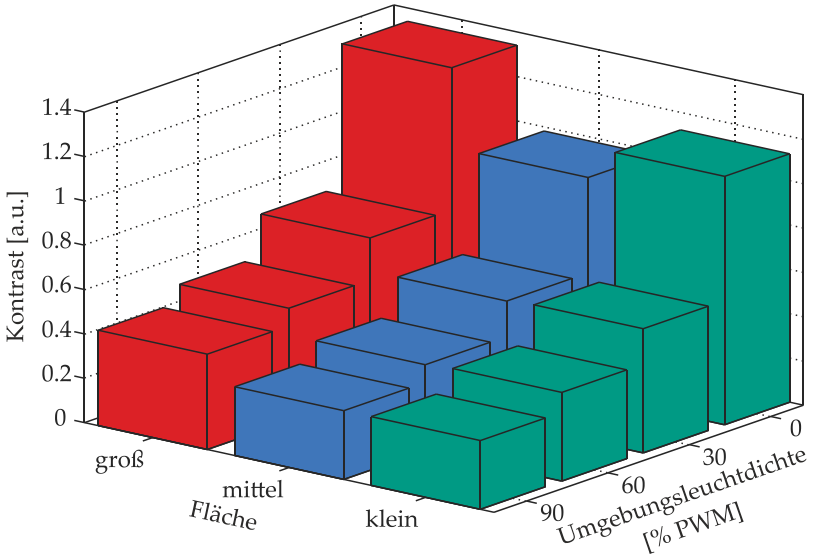


Abbildung 3.7: Mittelwerte des ermittelten angenehmen Kontrasts über der Umgebungsleuchtdichte und der Fläche

Ein differenzierteres Bild ergibt sich bei Betrachtung der Boxplots in Abbildung 3.8. Hier sticht vor allem die hohe Streubreite hervor, die bei Messdaten, die auf subjektiver Einstellung des Wertes basieren, zu erwarten war. Eine Profillinie der eingestellten Kontraste für jeden Probanden zeigt, dass alle eine ähnliche Charakteristik aufweisen, was die Belastbarkeit der Studie bestätigt (Abbildung 3.9).

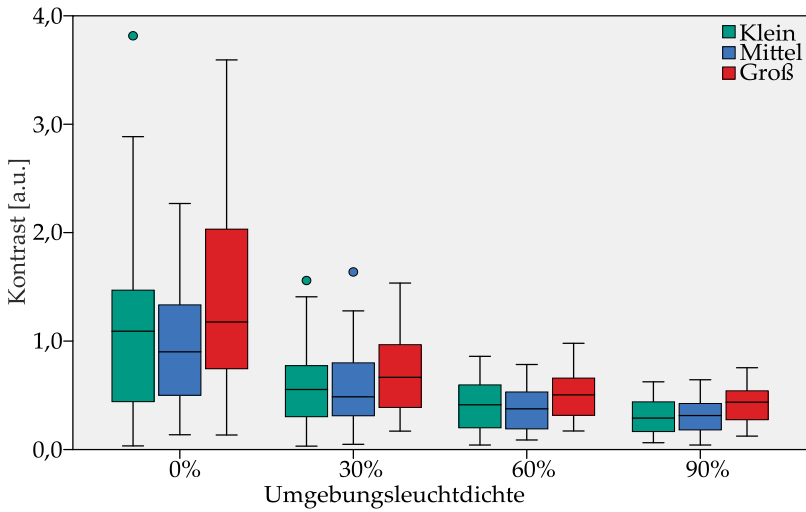


Abbildung 3.8: Boxplots der als angenehm empfundenen Kontraste

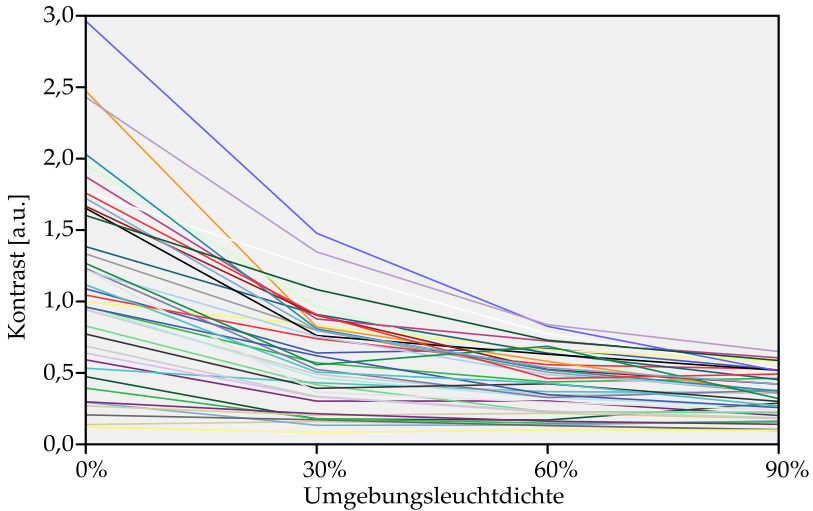


Abbildung 3.9: Liniendiagramm des eingestellten Kontrasts jedes Probanden über der Umgebungsleuchtdichte

In den Diagrammen lässt sich bereits erkennen, dass die Umgebungsleuchtdichte einen klaren Einfluss auf den als angenehm empfundenen Kontrast hat. Bei der Fläche ist dies nicht mehr so eindeutig. Zwar ist der Kontrast der Fläche „groß“ immer höher, „mittel“ und „klein“ hingegen unterscheiden sich kaum.

Eine statistische Auswertung bestätigt diese Annahmen. Da für jede Kombination von Fläche und Umgebungsleuchtdichte eine Stichprobe von $N = 40$ vorlag, konnte gemäß zentralem Grenzwertsatz die Normalverteilung sowie Sphärizität als gegeben angesehen werden. Die durchgeführte ANOVA ergab hochsignifikante Ergebnisse hinsichtlich der Abhängigkeit von der Umgebungsleuchtdichte ($F(3;117)=71,61$; $p<0,001$) und der Fläche ($F(2;78)=33,55$; $p<0,001$). Das partielle Eta-Quadrat zeigte, dass sich durch den Haupteffekt „Fläche“ 46,2%, durch die „Umgebungsleuchtdichte“ sogar 64,7% der Varianzen erklären lassen. Die aus Eta-Quadrat resultierenden Effektstärken gemäß Cohen sind groß ($f_{\text{Umgebungsleuchtdichte}}=1,35$; $f_{\text{Fläche}}=0,93$).

Auch die paarweisen Vergleiche zeigen hochsignifikante Unterschiede zwischen allen eingestellten Umgebungsleuchtdichten ($p<0,001$), die Effektstärken sind überwiegend groß. Die vollständig berechneten Werte können Anhang C.1 entnommen werden.

Überraschender ist der Paarvergleich der verschiedenen Flächen. Statistisch signifikant waren nur die jeweiligen Vergleiche mit der großen Fläche, zwischen der kleinen und mittleren Fläche bestand kein statistisch signifikanter Unterschied. Tabelle 3.2 fasst die Statistik zusammen.

Tabelle 3.2: Statistische Auswertung der Paarvergleiche bzgl. des Innersubjektfaktors „Fläche“

Vergleich	p-Wert
groß – mittel	<0,001
groß – klein	<0,001
mittel – klein	0,229

Dies wirft die Frage auf, ob die Fläche an sich überhaupt einen Einfluss auf den wahrgenommen Kontrast hat oder eher die Geometrie. Die Variante „groß“ ist eine zusammenhängende Fläche, ein „Lichtteppich“, während die Varianten „mittel“ und „klein“ sich durch zwei breite bzw. schmale Balken beschreiben lassen. Eine mögliche Erklärung wäre die Anzahl der Kanten im Erscheinungsbild, die sich bei den Streifen erhöht. Dies erhöht die Ortsfrequenz, was einen Einfluss auf die Kontrastsensitivität hat. Siebel untersuchte dies in einer weiterführenden Studie [SIE19], auf deren Ergebnisse an dieser Stelle aber nicht eingegangen wird. Sie können der entsprechenden Arbeit entnommen werden.

Der Vergleich von hartem und weichem Gradienten zeigt mit einem p-Wert von 0,021 zwar auch eine Signifikanz, mit einer standardisierten Differenz von $d = 0,105$ hatte diese allerdings nach Cohen keinen Effekt.

Für die Projektion von Lichtfunktionen lässt sich zusammenfassend festhalten, dass der (Weber-)Kontrast sich ungefähr im Bereich 1..2 bewegen sollte und eine automatische Anpassung an die Umgebungsleuchtdichte anzuraten ist. Um der hohen Streubreite zu begegnen

wird weiterhin empfohlen, dem Fahrzeugführer eine Verschiebung der Kennlinie vergleichbar mit dem Rad zur Einstellung der Helligkeit der Innenraum- und Instrumentenbeleuchtung zu ermöglichen.

Kapitel 4

UNTERSUCHTE LICHTFUNKTIONEN

Nachdem in den vorigen Kapiteln erläutert wurde, welche Anforderungen an hochauflösende Lichtfunktionen gestellt werden und welche Realisierungsmöglichkeiten Stand der Technik und Gegenstand aktueller Forschung sind, soll in diesem Kapitel auf die vom Autor der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen konkreter Lichtfunktionen eingegangen werden.

Ziel dieser Untersuchungen ist zunächst der Nachweis, dass eine hochauflösende Lichtfunktion das Fahrverhalten überhaupt signifikant beeinflussen kann. Dies ist Voraussetzung dafür, dass eine Lichtfunktion überhaupt die Möglichkeit eines Wirkpotenzials besitzt. Der Nachweis eines direkten Nutzens für den Fahrer ist hinsichtlich der Zulassung allerdings von geringerer Relevanz als die Ablenkung. Die zweite Probandenstudie soll daher zeigen, dass es hochauflösende Lichtfunktionen gibt, die in Bezug auf die Ablenkung anderer Verkehrsteilnehmer unbedenklich sind. Beide Untersuchungen wurden anhand des Baustellenlichts vorgenommen.

Es sollte stets darauf geachtet werden, dem Fahrer immer nur so viel Information und Assistenz wie nötig, jedoch nicht so viel wie möglich zu bieten. Ein Übermaß an Information kann den Fahrer und andere

kognitiv wie auch visuell so sehr fordern, dass er dadurch abgelenkt ist und das Fahrzeug somit nicht mehr sicher führen kann.

Die letzte Untersuchung zeigt deshalb anhand projizierter Navigationspfeile, dass selbst ein instruierter Fahrer durch die Projektion solcher Lichtfunktionen irritiert sein kann, eine Analyse des Ablenkpotenzials also notwendig ist.

BAUSTELLENLICHT

Das Baustellenlicht stellt eine hochauflösende, lichtbasierte Fahrerassistenzfunktion dar, die den Fahrzeugführer in baustellenähnlichen Situationen unterstützen soll. Dazu werden ihm die Breite sowie Trajektorie seines Fahrzeuges als Bodenprojektion angezeigt. Die Ausführung kann dabei grundsätzlich in 4 Varianten erfolgen, die die möglichen Kombinationen von 2 Ausprägungen darstellen: statisch/dynamisch sowie Streifen/Teppich. Zur Veranschaulichung sind die Varianten in Abbildung 4.1 dargestellt, wobei bewusst eine Kurvenfahrt gewählt wurde, um den Unterschied zwischen statisch und dynamisch abzubilden. Die dynamische Variante wird gelegentlich als „mitlenkend“ bezeichnet, so auch in der vorliegenden Arbeit.

BAUSTELLENLICHT

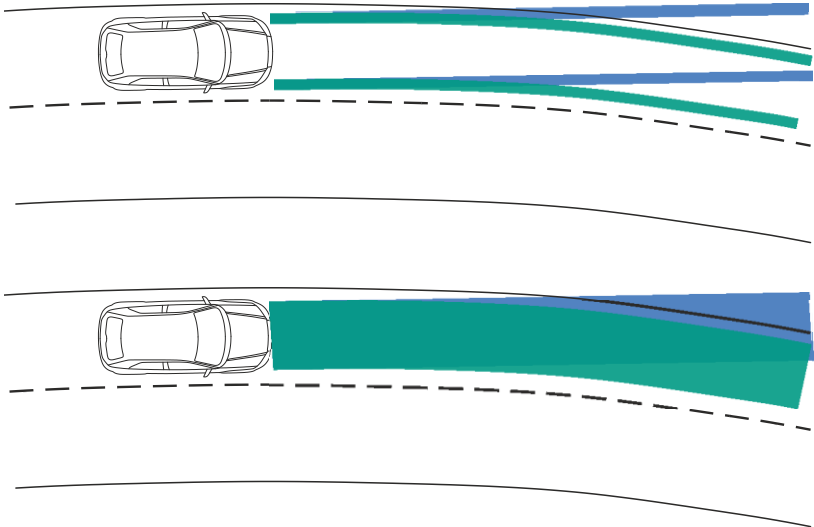


Abbildung 4.1: 4 Varianten des Baustellenlichts: oben Streifen, unten Teppich, statische Variante jeweils in blau, dynamische (mitlenkende) Variante in grün

Für die Untersuchungen zum Baustellenlicht stand ein freundlicherweise von der *AUDI AG* bereitgestellter *Audi A8L* mit integriertem DMD-Scheinwerfermodul zur Projektion hochauflösender Lichtfunktionen zur Verfügung. Die Studie zur Wirksamkeit wurde dabei im Rahmen des *iLaS*-Projektes durchgeführt und hierüber finanziert, während die Ablenkung eine Auftragsarbeit zur Vorlage der Ergebnisse beim KBA war. Für beide Studien wurde ein Abschlussbericht angefertigt und der *AUDI AG* übergeben. Nachfolgendes Kapitel kann sich daher inhaltlich wie auch wörtlich mit diesen (nicht veröffentlichten) Berichten decken. Da diese aber ausschließlich vom Autor der hier vorliegenden Arbeit verfasst wurden, werden Zitate hier nicht gesondert als solche gekennzeichnet.

4.1 STUDIE 1: WIRKPOTENZIAL DES BAUSTELLENLICHTS

4.1.1 ZIEL DER STUDIE UND EINGRENZUNG DES UNTERSUCHUNGSGEGENSTANDS

Anhand von aufgenommenen Fahrdaten soll evaluiert werden, ob das Baustellenlicht in einer baustellenähnlichen Situation einen Einfluss auf die beiden Fahrparameter „Lenkverhalten“ sowie „gefährere Durchschnittsgeschwindigkeit“ hat. Diese stellen dabei die abhängigen Variablen (AVs) dar, das Baustellenlicht die unabhängige Variable (UV). Ein ruhigeres Lenkverhalten mit weniger Lenkkorrekturen sowie eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit werden als Indiz gewertet, dass der Proband ein sichereres Fahrgefühl hat. Das Lenkverhalten wird dabei über die sogenannte Hochfrequenzkomponente (HFC, High Frequency Component) bestimmt (vgl. Kapitel 4.1.4).

Die beiden zu überprüfenden Forschungsfragen lauten folglich:

- Gibt es einen Unterschied in der HFC zwischen Situationen mit und Situationen ohne Baustellenlicht?
- Gibt es einen Unterschied in der gefahrenen Durchschnittsgeschwindigkeit in Situationen mit und Situationen ohne Baustellenlicht?

Explizit von der Untersuchung ausgeschlossen ist die Risikokompensation, also ob die Fahrzeugführer eine eventuell durch das Baustellen-

licht gewonnene Sicherheit durch riskanteres Fahren kompensieren oder gar überkompensieren. Das Berücksichtigen der Straßenverkehrsordnung sowie der Witterungsbedingungen etc. obliegt grundsätzlich dem Fahrer.

4.1.2 MATERIAL UND METHODEN

4.1.2.1 DATENAUFZEICHNUNG UND DATENAUFBEREITUNG

Als objektive Messdaten wurden die CAN-Bus-Daten von einem CarPC aufgezeichnet und in das *Vector*-ASCII-Format konvertiert. Das Extrahieren, Aufbereiten und Auswerten der relevanten Fahrdaten (Geschwindigkeit über ESP-Sensor und Lenkbewegungen über Lenkwinkelsensor) erfolgte in *MATLAB*.

4.1.2.2 BAUSTELLENLICHT

Für die Wirkpotenzialanalyse wurde das Baustellenlicht in der Variante mit zwei mitlenkenden Streifen untersucht. Dies unterscheidet sich von der Untersuchung des Ablenkpotenzials (siehe Kapitel 4.2.1ff) insofern, als dass dort die Version des „Lichtteppichs“ eingestellt war.

Entgegen der originalen Einstellungen wurde die Sensitivität für das Mitlenken der Linien herabgesetzt, sodass die Linien beim Lenken

schwächer mitlenkten als sie dies dem Kurvenradius entsprechend tun müssten. Dies wurde aufgrund der Tatsache geändert, dass die ersten drei Probanden einstimmig äußerten, das Licht „knicke viel zu stark ab“ und vermittele dann den Eindruck, man führe in die als Fahrbahnbegrenzung dienenden Leitkegel. Eine Überprüfung ergab außerdem, dass auch die initiale Kalibrierung nicht stimmte und das Fahrzeug bereits einen größeren Kurvenradius fuhr, als die Linien anzeigten. Als problematisch wurde die neue Konfiguration für die Messstrecke nicht gesehen, da die Messung des Lenkwinkels nur innerhalb der aufgestellten Baustellensituation stattfand, innerhalb derer keine Kurven auftraten.

Die Lichtfunktion wurde auch photometrisch hinsichtlich Leuchtdichte vermessen, die zugehörigen Aufnahmen sind in Abbildung 4.2 zu sehen. Die Linien sowie deren Umfeld lassen sich in Regionen einteilen, woraus sich nachfolgende Tabelle ergibt:

Tabelle 4.1: Auswertung der Leuchtdichteaufnahmen des Baustellenlichtes (BAST)

Bild	Fläche [Pixel]	Min [cd/m²]	Max [cd/m²]	Mittelwert [cd/m²]
BAST fern	72140	0,1405	8,179	0,8857
Umfeld fern	575000	0,02541	4,282	0,2636
BAST nah	66260	0,2663	12,22	1,021
Umfeld nah	694500	0,0395	4,555	0,3753

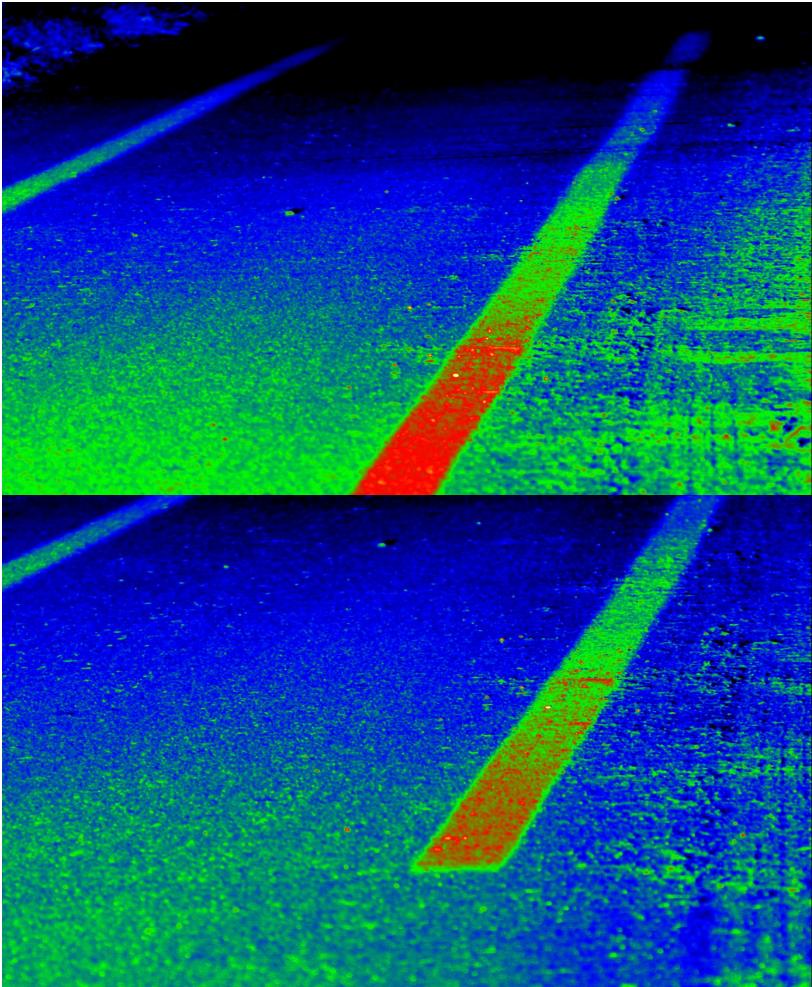


Abbildung 4.2: Leuchtdichteaufnahme des Baustellenlichts. Oben: Bereich weit vor dem Fahrzeug. Unten: Bereich direkt vor dem Fahrzeug.

Aus den Werten von Tabelle 4.1 und Formel 3.1 lassen sich direkt die Kontraste nach Weber bestimmen:

$$K_{nah} = \frac{1,021 - 0,3753}{0,3753} = 1,72$$

$$K_{fern} = \frac{0,8857 - 0,2636}{0,2636} = 2,36$$

Somit weist das Baustellenlicht auf Asphalt mit eingeschaltetem Abblendlicht ca. einen Weberkontrast von 2 auf, was gemäß den Untersuchungen von Cristea [CRI17, JAH17] einem angenehmen, tendenziell eher höheren Kontrast entspricht (vgl. hierzu auch Kapitel 3.2).

4.1.2.3 BAUSTELLE

Die Studie musste aus Gründen der Reproduzierbarkeit auf einem dem öffentlichen Straßenverkehr nicht zugänglichen Gelände durchgeführt werden. Dieses Gelände musste über eine hinreichend lange Gerade verfügen, entlang derer eine baustellenähnliche Situation aufgebaut werden konnte. Die Wahl fiel auf den Verkehrsübungsplatz der Fahrschulgemeinschaft Pforzheim. Wie Abbildung 4.3 zu entnehmen ist, besitzt er eine Außenbahn mit zwei langen Geraden à ca. 300 m, einem leichten Gefälle und ist durch den umgebenden Wald gut von Störlichtquellen geschützt.



Abbildung 4.3: Verkehrsübungsplatz der Fahrschulgemeinschaft Pforzheim [GOO]

Die Baustelle wurde auf der längeren, nordöstlichen Geraden (hier oben im Bild) aufgebaut. Die linke Fahrbahnbegrenzung wurde mit Verkehrsleitkegeln gemäß VwV-StVO (75 cm hoch, retroreflektierend) [VWV17] realisiert, die auf einer Länge von 250 m im Abstand von je 7,50 m geradlinig aufgestellt wurden. Der zulässige Maximalabstand zwischen zwei Leitkegeln auf Bundesautobahnen beträgt 10 m. Auf der rechten Seite kamen ebenfalls Leitkegel zum Einsatz, die im mittleren Bereich allerdings auf einer Länge von 50 m durch höhere (ca. 1,50 m), senkrechte Holzlatten ersetzt wurden. Diese waren auch weiter eingerückt, sodass sich hierdurch innerhalb der Baustelle noch eine Engstelle ergab, die ein Überholmanöver simuliert. Bei einer Geschwindigkeit von 70-75 km/h dauert dieser dann ca. 2,5 s an. Die breiten Bereiche wurden zu ca. 3,20 m gewählt, die Engstelle 2,70 m. Dies mag zunächst recht breit erscheinen, jedoch weist bereits das Fahrzeug eine Breite von 2,12 m auf. Gemäß den *Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen Teil-D* muss die Fahrbahnbreite bei einspurigen Baustellen mindestens 3,25 m betragen, auf kurzen Strecken sind 3,00 m zulässig. Im Falle von mehrspurigen Baustellen gilt dieses Maß für die rechte Spur, die linke Spur kann mit 2,50 m Breite ausgelegt werden, sofern sie nur für Fahrzeuge mit einer Breite von max. 2,00 m freigegeben wird [RSA15].

Somit kann die Baustellensituation als hinreichend eng bezeichnet werden und wurde von unsichereren Fahrern insbesondere aufgrund des fremden Fahrzeuges auch so empfunden. Regelmäßige Abbremsvorgänge vor der Engstelle unterstreichen diesen Eindruck. Abbildung 4.4 zeigt den Gesamtaufbau mit eingeschaltetem Baustellenlicht im Bereich der Verjüngung. Es sei angemerkt, dass das Bild bei Nässe aufgenommen wurde, die Versuchsfahrten aber stets bei trockener Fahrbahn stattfanden, um gleichbleibende Reflexionseigenschaften des Asphalts zu gewährleisten.



Abbildung 4.4: Baustellensituation mit eingeschaltetem Baustellenlicht

4.1.2.4 VERSUCHSDESIGN

Die Untersuchung fand in Form einer volldynamischen Probandenstudie im within-subjects-Design mit mehreren Durchgängen statt, d. h. jeder Proband durchlief jede Situation mehrfach. Die Situationen mit und ohne Baustellenlicht wurden abwechselnd durchgeführt um

einen auftretenden Gewöhnungseffekt hinsichtlich Fahrzeug und Baustelle gleichmäßig zu verteilen und somit dessen Einfluss auf die Auswertung auszuschließen. Mit einer vollständig randomisierten Reihenfolge wäre dies nicht möglich. Um einen Positionseffekt zu vermeiden begann die eine Hälfte der Probanden mit der Situation **ohne** Baustellenlicht, die andere Hälfte mit der Situation **mit** Baustellenlicht. Um die Validität zu erhöhen und einen Lerneffekt ermitteln zu können wurde jede Situation vier Mal durchlaufen. Aus technischen Gründen wurde die Aufzeichnung von 2 Situationen nicht korrekt gespeichert, weshalb bei den beiden betroffenen Probanden von den insgesamt acht Situation nur sieben Sätze an Messwerten ausgewertet wurden.

Das Probandenkollektiv wurde in zwei Gruppen unterteilt, eine Gruppe mit Personen im Alter von maximal 30 Jahren, die andere von mindestens 50 Jahren. Dies ermöglicht prinzipiell einen Einfluss des Alters auf den Untersuchungsgegenstand festzustellen. Die Hypothese eines möglichen Alterseinflusses wird dadurch gestützt, dass jüngere Fahrer in der Regel weniger Fahrerfahrung haben und somit per se unsicherer fahren, ältere Fahrer hingegen stehen neuer Technik und Assistenzsystemen tendenziell skeptischer gegenüber ([DVR14, SZ17]). Das Probandenkollektiv umfasste sowohl Laien, als auch im Bereich Automobilentwicklung tätige Personen sowie drei Probanden, die in der automobilen Lichttechnik tätig sind. Dadurch sollte das Feedback der Probanden so differenziert wie möglich ausfallen.

Da davon auszugehen ist, dass einem Fahrzeugführer die Funktionsweise eines Fahrerassistenzsystems bekannt ist, wenn er dieses in

seinem eigenen Fahrzeug verwendet, wurde den Probanden die Funktion des Baustellenlichts vor Versuchsbeginn ausführlich erklärt und im Stillstand demonstriert. Dies ist insofern wichtig, als dass dies ein grundlegender Unterschied zu Untersuchungen der Ablenkung darstellt. Dort sollen die Probanden unvoreingenommen und naiv an der Studie teilnehmen, um sie weder zu besonders hoher noch zu besonders geringer Aufmerksamkeit gegenüber dem Untersuchungsgegenstand zu motivieren.

Zusätzlich zu den objektiven Daten des CAN-Busses wurden mittels eines Fragebogens subjektive Daten erhoben. Der Fragebogen (zu finden in Anhang B.1) sollte dabei u. a. den Eindruck des Baustellenlichts auf die Probanden erforschen, ob sie sich davon persönlich assistiert oder gestört gefühlt haben und ob sie generell Vorteile oder Nachteile darin sehen.

4.1.2.5 VERSUCHSABLAUF

Zuerst bekam jeder Proband ein Informationsblatt über den Versuchsablauf sowie eine Datenschutzerklärung ausgehändigt (Anhang B.1). Nach der Einwilligung wurden über einen Fragebogen demographische Daten, Fahrerfahrung und Kenntnisstand hinsichtlich Ausstattungsmerkmalen von KFZ abgefragt. Anschließend wurde er in das Versuchsfahrzeug eingewiesen, gebeten seinen Sitz entsprechend einzustellen und ggf. die Bedienung des Automatikgetriebes erläutert. Weiterhin wurde dem Proband wie bereits in Kapitel 4.1.2.4 beschrieben die Funktion des Baustellenlichts erklärt. Zum besseren

4.1.3 DATENAUFBEREITUNG

Nach Konvertierung der aufgenommenen CAN-Traces in das *Vector-ASCII*-Format konnten diese mithilfe eines dbc-Files¹ vollständig in *MATLAB* weiterverarbeitet werden. Diese Weiterverarbeitung umfasste mehrere Schritte:

1. Extraktion der relevanten Parameter (Lenkwinkelsensor und Geschwindigkeitssignal aus ESP-Sensoren)
2. Korrektur des Lenkwinkeloffsets
3. Entfernen der Wendebereiche
4. Filtern von Ausreißern

In den so bereinigten Datensätzen konnten dann die jeweiligen Baustellensituationen analysiert und statistisch ausgewertet werden.

EXTRAKTION DER RELEVANTEN PARAMETER

Zur Analyse des Fahrverhaltens sollten zwei Signale ausgewertet werden: Die gefahrene Durchschnittsgeschwindigkeit sowie das Lenkverhalten. Die Geschwindigkeit wurde dabei aus dem Signal *ESP_01.ESP_v_Signal* gewonnen, welches sich aus dem Durchschnitt der vier ESP-Signale der einzelnen Räder berechnet und somit ein sehr präzises Maß ist. Der Lenkradwinkel wurde aus dem Signal

¹ dbc = data base CAN, Dateiformat welches beim CAN-Bus verwendet wird

LWI_01.LWI_Lenkradwinkel sowie dem zugehörigen Vorzeichen *LWI_01.LWI_VZ_Lenkradwinkel* zusammengesetzt.

KORREKTUR DES LENKWINKELOFFSETS

Bei der ersten Sichtung der Daten fiel auf, dass die aufgezeichneten Lenkwinkel auf der Geraden überwiegend Werte unter 0 aufwiesen, welche einem Lenkradeinschlag nach links entsprächen. Da die Baustellensituation aber keine Kurve aufwies, musste hier ein ungewollter Offset vorliegen (vgl. Abbildung 4.6). Eine Mittelung der Werte innerhalb des Bereiches, in dem der Soll-Wert 0° beträgt, ergab einen Wert von $-2,75^\circ$. Daher wurden im ersten Schritt zur Korrektur alle Lenkwinkel um diesen Offset nach oben verschoben.

UNTERSUCHTE LICHTFUNKTIONEN

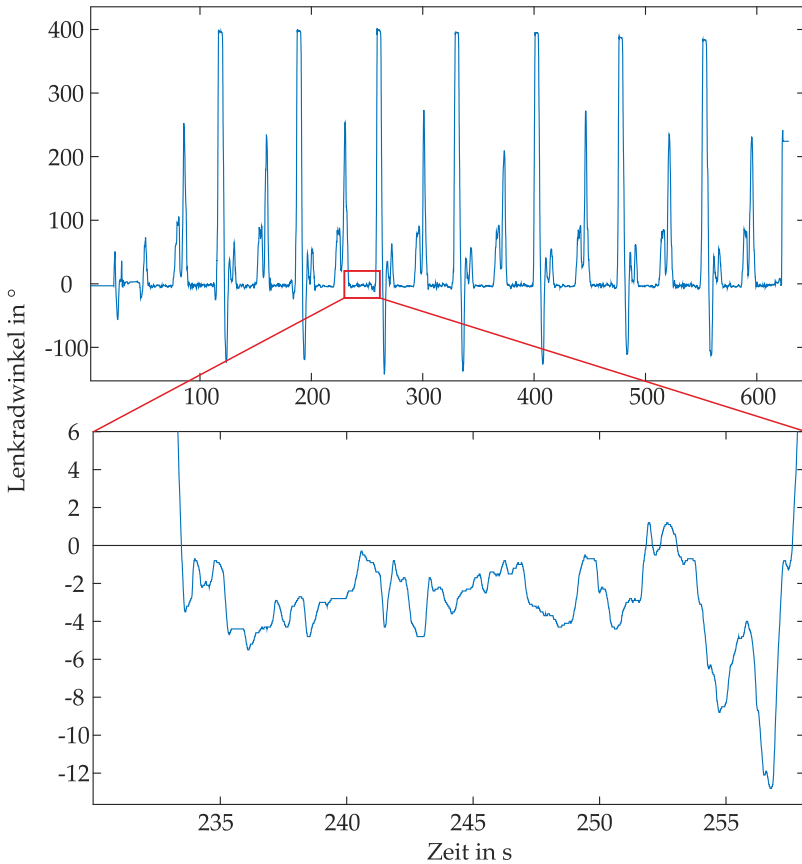


Abbildung 4.6: Rohdaten des Lenkradwinkels einer Versuchsfahrt und gezoomte Ansicht mit hervorgehobener 0°-Linie

ENTFERNEN DER WENDEBEREICHE

Da die Baustelle auf der Geraden aufgebaut war, wurden im nächsten Schritt die beiden Wendebereiche der Versuchsstrecke herausgefiltert.

Anstatt die Werte zu löschen wurden zunächst alle Winkel, deren Betrag größer als 15° war auf einen willkürlich gewählten, konstanten Wert von 200° gesetzt. Das Resultat ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

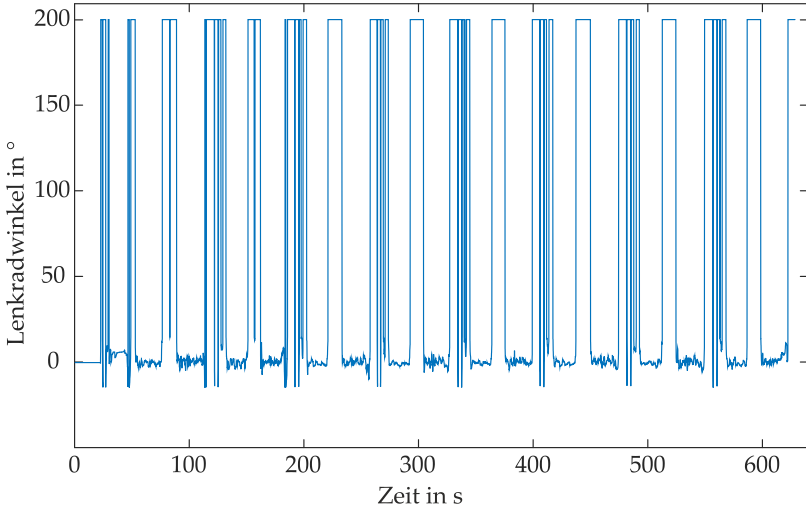


Abbildung 4.7: Lenkradwinkel nach erstem Schritt der Entfernung der Wendebereiche

FILTERN VON AUSREIßERN

Da es auch beim Wenden Lenkradeinschläge von unter 15° gab, mussten diese nachträglich noch manuell entfernt werden. Als Resultat ergibt sich eine Messkurve, bei der die 16 geraden Abschnitte der Versuchsfahrt (8 Runden mit je 2 Geraden, jede zweite Gerade eine Baustellensituation) deutlich zu sehen sind und eine weitere Auswertung ermöglichen (vgl. Abbildung 4.8).

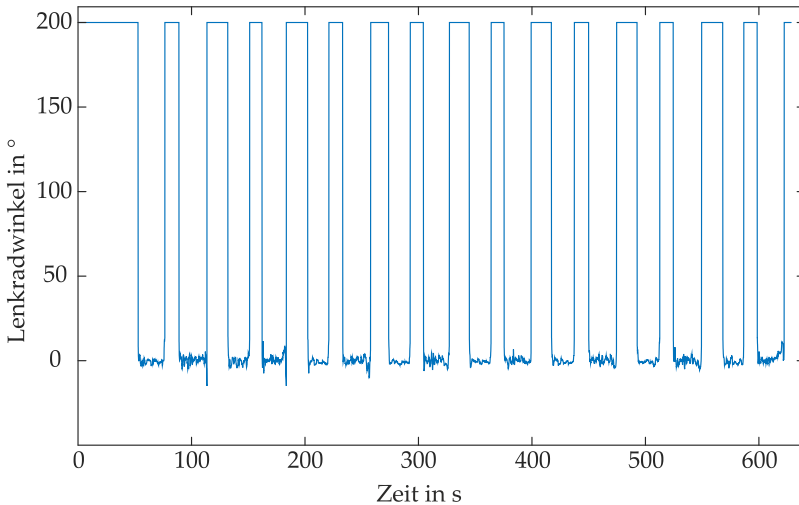


Abbildung 4.8: Vollständig gefiltertes Lenkwinkelsignal

4.1.4 STATISTISCHE AUSWERTUNG

Nachfolgend sind die verwendeten Testmethoden kurz erläutert, anhand derer beurteilt werden sollte, ob das Baustellenlicht einen positiven, negativen oder gar keinen Einfluss auf das sichere Führen des Fahrzeugs in Engstellen hat.

Der erste Parameter ist die Geschwindigkeit, wobei die Durchschnittsgeschwindigkeit der Situationen mit und ohne Baustellenlicht direkt miteinander verglichen werden kann. Eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit ist ein Indiz dafür, dass der Fahrer zumindest subjektiv sicherer durch die Situation manövrieren konnte.

Als zweiter Parameter sollte das Lenkverhalten herangezogen werden. Dabei kann allerdings kein Durchschnittswert direkt miteinander verglichen werden (dieser wäre auf einer Gerade gemittelt immer 0°). Stattdessen wird wie bei Östlund et al. [ÖST04] beschrieben der Hochfrequenzanteil des Lenksignals betrachtet, der maßgeblich die Lenkkorrekturen widerspiegelt. Hierzu wird das Signal zunächst mittels eines Butterworth-Filters zweiter Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 0,6 Hz tiefpassgefiltert. Dies eliminiert das hochfrequente Rauschen auf dem Signal und ergibt als Resultat das sogenannte **Gesamtlenksignal**. Anschließend wird dieses erneut mittels Butterworth zweiter Ordnung gefiltert, dieses Mal allerdings mit einem Hochpass und einer Grenzfrequenz von 0,3 Hz. Übrig bleibt ein **Frequenzbandsignal**. Dann werden die Leistungen des Frequenzbandsignals und des Gesamtlenksignals (jeweils ermittelt als quadratisches Mittel, RMS) zueinander ins Verhältnis gesetzt und ergeben die Hochfrequenzkomponente *HFC* gemäß Formel 4.1.

$$HFC = \frac{P_{Band}}{P_{Gesamt}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum |f_{Band}|^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum |f_{Gesamt}|^2}} \quad (4.1)$$

Dabei bezeichnet f_{Band} das Frequenzbandsignal, f_{Gesamt} das Gesamtlenksignal und N die Anzahl der aufgenommenen Lenkwinkel innerhalb der ausgewerteten Situation.

Somit steigt die HFC mit der Anzahl hochfrequenter Lenkbewegungen (also Korrekturen) sowie mit deren Amplitude. Eine niedrige HFC spricht demnach für ein sicheres Durchfahren der Baustelle mit weniger und/oder kleineren Lenkkorrekturen.

Beim Mittelwertsvergleich von Durchgängen mit und ohne Baustellenlicht sollten die folgenden Nullhypothesen angenommen oder verworfen werden:

H_{0,a}: Es gibt keinen Unterschied im Lenkverhalten bei Fahrten mit Baustellenlicht und Fahrten ohne Baustellenlicht.

H_{0,b}: Es gibt keinen Unterschied in der gefahrenen Durchschnittsgeschwindigkeit bei Fahrten mit Baustellenlicht und Fahrten ohne Baustellenlicht.

Da sich hierzu in der Literatur noch keine belastbaren Aussagen finden lassen, welchen der beiden Parameter das Baustellenlicht in welcher Richtung beeinflussen könnte, sind die zugehörigen Alternativhypothesen ungerichtet (zweiseitig):

H_{1,a}: Es gibt einen Unterschied im Lenkverhalten bei Fahrten mit Baustellenlicht und Fahrten ohne Baustellenlicht.

H_{1,b}: Es gibt einen Unterschied in der gefahrenen Durchschnittsgeschwindigkeit bei Fahrten mit Baustellenlicht und Fahrten ohne Baustellenlicht.

Weiterhin sollte überprüft werden, ob die Parameter einem Lerneffekt unterliegen, also ob sich im Verlauf des Versuchs die HFC verringert und/oder die Durchschnittsgeschwindigkeit erhöht und ob es eine Altersabhängigkeit gibt. Zur Überprüfung der Nullhypothesen wurde ein Allgemeines Lineares Modell mit Messwiederholung herangezogen.

4.1.5 ERGEBNISSE

Nachfolgend sollen die Ergebnisse der statistischen Auswertung präsentiert werden. Dabei wird der Einfluss des Baustellenlichts auf die HFC und auf die Durchschnittsgeschwindigkeit getrennt betrachtet, sowie bei Bedarf über den normalen Mittelwertvergleich hinausgehende Tests angewendet. Ebenfalls werden die Ergebnisse des Fragebogens dargestellt. Abschließend folgt eine Interpretation der Ergebnisse.

4.1.5.1 HFC

Wie Abbildung 4.9 zu entnehmen ist, war die HFC der Probanden sehr unterschiedlich, sowohl was den Absolutwert anbelangt als auch hinsichtlich des Einflusses des Baustellenlichts.

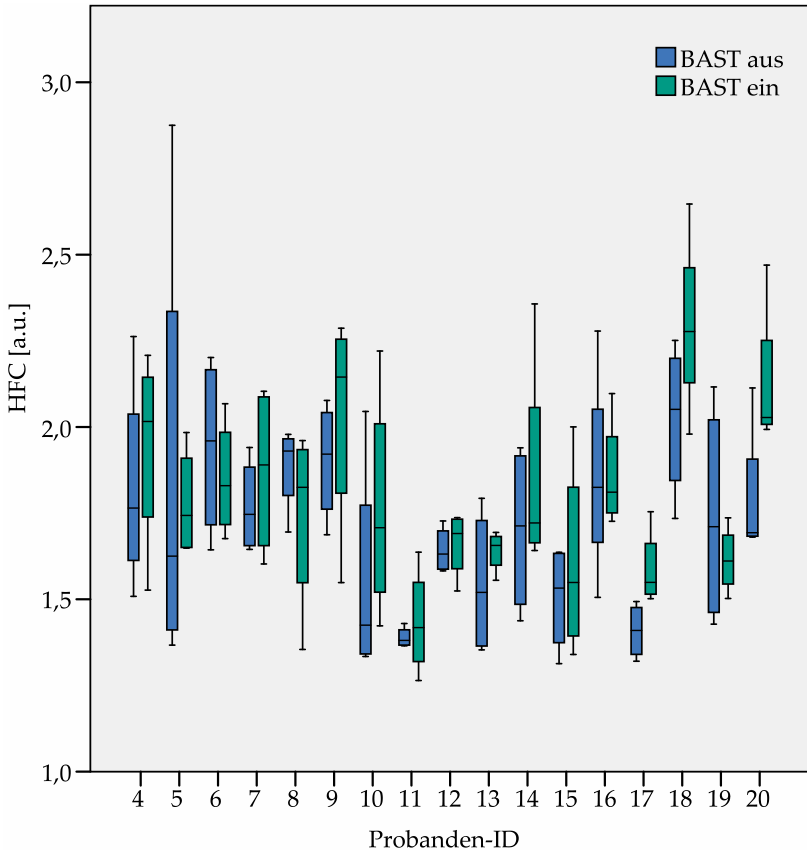


Abbildung 4.9: Boxplots der HFC über die 17 ausgewerteten Probanden

Bei Probandenstudien, in denen der Proband eine Situation mehrfach durchläuft, ist a priori von zwei Lerneffekten auszugehen: Einem richtigen Lerneffekt, der durch das Erlernen des Systems zustande kommt und auch in der Praxis auftritt und erwünscht ist sowie einem Gewöhnungseffekt, bei dem der Proband sich an die immer gleiche

Situation (hier: die Baustelle) gewöhnt und dadurch sicherer im Fahrverhalten wird. Letzterer lässt sich nicht in jedem Versuchsdesign vermeiden, allerdings kann sich bei einem großen Einfluss der Gewöhnung auf die letzten Messwerte beschränkt werden, bei denen der Gewöhnungsprozess bereits abgeschlossen ist. Die beiden Lerneffekte überlagern sich in den Messwerten, können jedoch anhand eines Liniendiagramms einfach erkannt werden, sofern sie vorhanden sind. Abbildung 4.10 zeigt ein solches exemplarisches Liniendiagramm. Dies setzt sich aus einem kontinuierlichen Anstieg durch die fortwährende Wiederholung der Situation und einem treppenförmigen Anteil zusammen. Die Treppen stellen die Gewöhnung an die unabhängige Variable dar, wobei immer 2 Situationen auf etwa gleicher Höhe sein müssen, da zum Ausschluss von Positionseffekten die Hälfte der Probanden den Versuch mit Baustellenlicht begann, die andere Hälfte ohne Baustellenlicht.

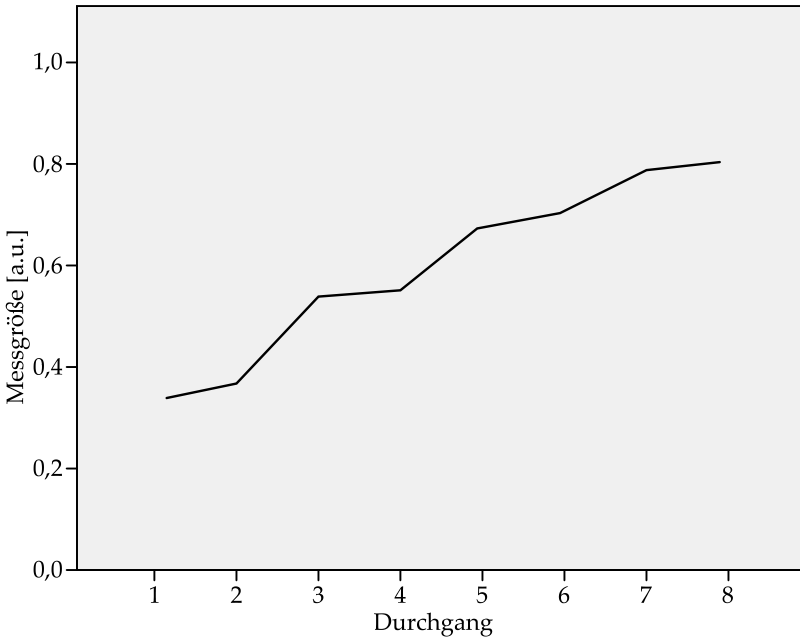


Abbildung 4.10: Beispiel einer Lerneffektkurve, basierend auf Pseudodaten

Für die berechnete HFC in dieser Studie sah die Lerneffektkurve wie in Abbildung 4.11 aus. Für die HFC ist also nicht von einem Lerneffekt auszugehen, das Lenkverhalten wird also weder durch die Gewöhnung an die Baustelle noch durch die Gewöhnung an das Baustellenlicht maßgeblich beeinflusst. Daher ist ein Lerneffekt für die weitere Betrachtung der HFC nicht relevant.

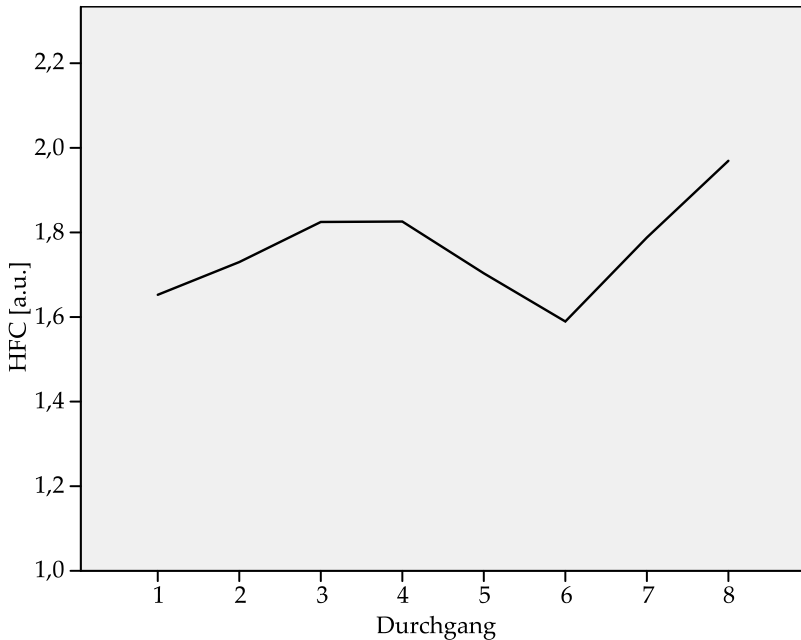


Abbildung 4.11: Mittlere HFC über die Durchgänge zum Feststellen eines Lerneffekts

Somit konnten für die Statistik der HFC alle 8 Situationen berücksichtigt werden. Als AV wurde daher der jeweilige Mittelwert des Probanden aus den Situationen mit bzw. ohne Baustellenlicht gebildet. Der Shapiro-Wilk-Test zeigte, dass die Mittelwerte der HFC normalverteilt waren ($p_{\text{HFC_ohne}}=0,396$; $p_{\text{HFC_mit}}=0,725$). Die Varianzhomogenität wurde mittels Levene-Test überprüft und bestätigt ($p_{\text{HFC_ohne}}=0,627$; $p_{\text{HFC_mit}}=0,223$).

Die deskriptive Statistik zur HFC findet sich in Tabelle 4.2. Hier fällt bereits ein Unterschied der Mittelwerte in den Situationen mit und ohne Baustellenlicht auf.

UNTERSUCHTE LICHTFUNKTIONEN

Tabelle 4.2: Deskriptive Statistik der HFC

Situation	Alters- gruppe	Mittelwert	Standard- abweichung	N
BAST aus	bis 30	1,6717	0,2022	9
	über 50	1,7906	0,1662	8
	Gesamt	1,7276	0,1905	17
BAST ein	bis 30	1,7681	0,2570	9
	über 50	1,8459	0,1660	8
	Gesamt	1,8047	0,2160	17

Die Berechnung des ALM mit Messwiederholung mit einem p -Wert von $p=0,043$ ($F(1,15)=4,898$) einen statistisch signifikanten Einfluss des Baustellenlichtes auf die HFC. Dem partiellen Eta-Quadrat kann entnommen werden, dass sich lediglich 24,6 % der Unterschiede im Lenkverhalten durch den Einfluss des Baustellenlichts erklären lassen, der resultierende Gesamteffekt nach Cohen ist jedoch groß ($f=0,57$).

Tabelle 4.3: Ergebnisse des ALM mit Messwiederholung für den Vergleich der Situationen mit und ohne Baustellenlicht für die HFC

p	Partielles Eta- Quadrat	Cohens f	Effektstärke
0,043	0,246	0,571	großer Effekt

Die Altersabhängigkeit kann mit dem Test der Zwischensubjekteffekte überprüft werden. Dieser ist jedoch mit einem p -Wert von 0,306 nicht signifikant (Tabelle 4.4).

Tabelle 4.4: Test der Zwischensubjekteffekte zur Überprüfung einer möglichen Altersabhängigkeit

F	p	Partielles Eta- Quadrat
1,125	0,306	0,070

Somit kann beim Einsatz des Baustellenlichts in Bezug auf die HFC nicht von einer Altersabhängigkeit ausgegangen werden.

4.1.5.2 GESCHWINDIGKEIT

Auch für die in der Baustelle gefahrene Durchschnittsgeschwindigkeit wird überprüft, ob ein Lerneffekt vorliegt. Abbildung 4.12 sieht dem für einen Lerneffekt typischen Verlauf ähnlich und lässt daher einen solchen vermuten. Da dieser die Daten verzerrt, wird für die weitere Auswertung nur die jeweils vierte Situation (also Durchgänge 7 und 8) verwendet, da der Proband sich in dieser schon am besten an das Baustellenlicht gewöhnen konnte. Bei einem Probanden brach die Datenaufzeichnung während der letzten Baustellensituation ab, weshalb dieser nicht mit in die Auswertung einfließen kann.

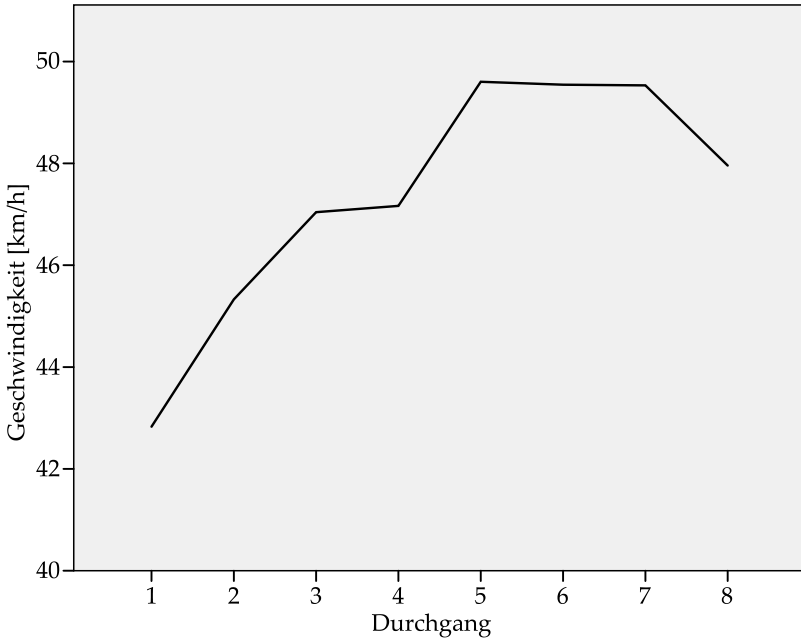


Abbildung 4.12: Mittlere Geschwindigkeit über die Durchgänge zum Feststellen eines Lerneffekts

Eine grafische Darstellung der Messwerte bietet Abbildung 4.13, Tabelle 4.5 fasst die deskriptive Statistik für die gefahrene Geschwindigkeit zusammen.

STUDIE 1: WIRKPOTENZIAL DES BAUSTELLENLICHTS

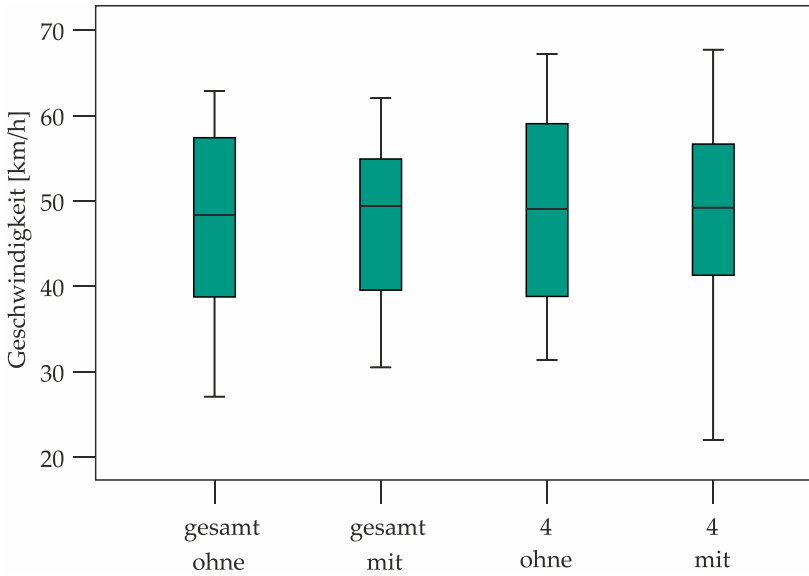


Abbildung 4.13: Boxplot der gefahrenen Durchschnittsgeschwindigkeit aller acht Durchgänge (links) bzw. des jeweils letzten Durchgangs (rechts) jeweils mit und ohne Baustellenlicht

Tabelle 4.5: Deskriptive Statistik der Geschwindigkeit mit und ohne Baustellenlicht

Situation	Altersgruppe	Mittelwert [km/h]	Standardabweichung [km/h]	N
BAST aus	bis 30	52,34	11,27	9
	über 50	44,51	9,64	7
	Gesamt	48,92	11,00	16
BAST ein	bis 30	52,94	10,10	9
	über 50	42,79	11,57	7
	Gesamt	48,50	11,62	16

Hier kann kein Einfluss des Baustellenlichts auf die gefahrene Geschwindigkeit erkannt werden. Da Normalverteilung nach Shapiro-Wilk-Test ($p_{ohne}=0,716$, $p_{mit}=0,918$) und Varianzhomogenität nach Levene-Test ($p_{ohne}=0,637$, $p_{mit}=0,824$) vorlag, konnte erneut das ALM mit Messwiederholung zur Überprüfung herangezogen werden. Die Vermutung wurde bestätigt, das Baustellenlicht hatte weder einen signifikanten Einfluss auf die gefahrene Geschwindigkeit ($F(1,14)=0,316$; $p=0,583$), noch konnte ein Alterseffekt festgestellt werden ($F(1,14)=2,886$; $p=0,111$).

Tabelle 4.6: Ergebnisse des ALM mit Messwiederholung für die gefahrene Geschwindigkeit

Test	F	p	Partielles Eta-Quadrat
Baustellenlicht	0,316	0,583	0,022
Alterseinfluss	2,886	0,111	0,171

Somit hat das Baustellenlicht keinen direkten Einfluss auf die von den Probanden gefahrene Geschwindigkeit. Insbesondere aufgrund des kleinen partiellen Eta-Quadrats von 2,2 % wäre die Durchschnittsgeschwindigkeit auch bei einer aufgetretenen Signifikanz ein nur begrenzt aussagekräftiges Maß.

4.1.5.3 FRAGEBÖGEN

Die Fragebögen ermittelten zunächst den Gesamteindruck, den die Probanden vom Baustellenlicht hatten, gefolgt von der Frage, ob sie

sich durch das Baustellenlicht unsicherer fühlten. Diese wurde später in einer inversen Form wiederholt um zu überprüfen, ob die Probanden die Fragen aufmerksam lesen und ehrlich antworten oder ob die Bewertungen rein willkürlich abgegeben werden, nur um den Fragebogen schnell auszufüllen oder gar, um das Experiment zu sabotieren (vgl. *Demand Characteristics* nach Orne [ORN62]). Gibt ein Proband bei Frage 2 an, er habe sich durch das Baustellenlicht unsicherer gefühlt und gleichzeitig bei Frage 5, er habe sich durch das Baustellenlicht sicherer gefühlt, so ist dies unplausibel. In diesem Fall wird dieser Proband von der weiteren Auswertung der Fragebögen ausgeschlossen. Die möglichen Kombinationen von Frage 2 und Frage 5 mit der zugehörigen Plausibilität sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst. Die Kombination von weder sicherer noch unsicherer (beides mit -3 bewertet, „Stimme nicht zu“) gilt als plausibel, da dies bedeutet, der Proband sieht keinen Einfluss des Baustellenlichts auf seine Fahrsicherheit.

Tabelle 4.7: Plausibilitätstabelle für die Inverse Frage nach Sicherheit und Unsicherheit durch das Baustellenlicht

		Frage 5	sicherer	sicherer
Frage 2	Zustimmung		+++	---
unsicherer	+++		unplausibel	plausibel
unsicherer	---		plausibel	plausibel

Da die Bewertungen von -3 bis +3 gingen, kann der Tabelle entnommen werden, dass die Addition der Wertung von Frage 2 und Frage 5 direkt die unplausiblen Werte aufzeigt. Lediglich die Wahl einer sinnvollen Schwelle ist notwendig. Werden leichte Tendenzen hin zu

positiven Werten (je +1 und somit in der Summe +2) noch zugelassen, da subjektive Einschätzungen immer einer gewissen Unsicherheit unterliegen, so ist nur eine Plausibilitätsprüfung der Probanden nötig, deren Wertung in der Summe größer als 2 ist. Wie Abbildung 4.14 zu entnehmen ist, muss kein Proband aufgrund fehlender Plausibilität von der Auswertung ausgeschlossen werden.

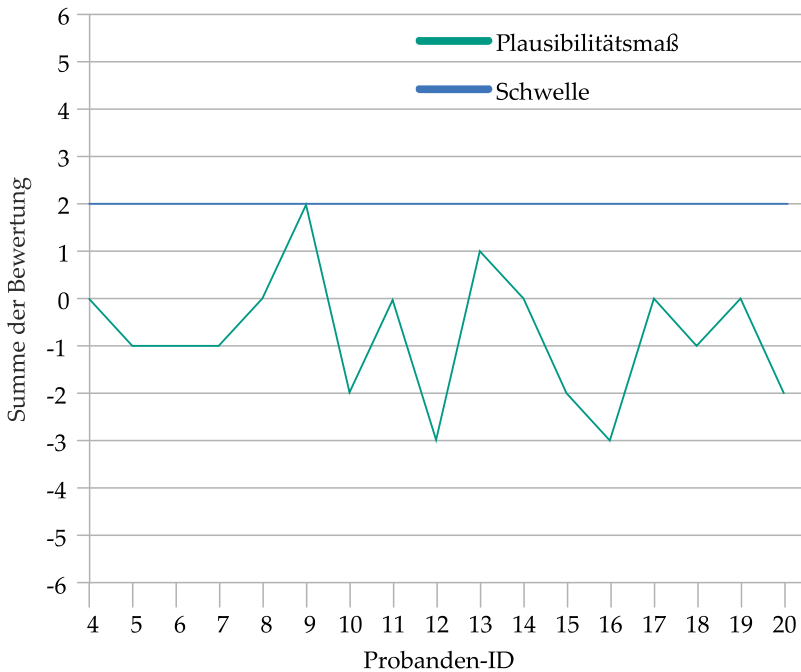


Abbildung 4.14: Plausibilitätsprüfung für die Fragebögen

Der Gesamteindruck der Probanden war eher heterogen, tendiert aber zum Positiven (vgl. Abbildung 4.15). Die weiteren Fragen des

Fragebogens sollen daher ein differenzierteres Bild abgeben. Dazu wurden diese der Übersichtlichkeit wegen in Positivfragen und Negativfragen gesplittet (Abbildung 4.16 und Abbildung 4.17).

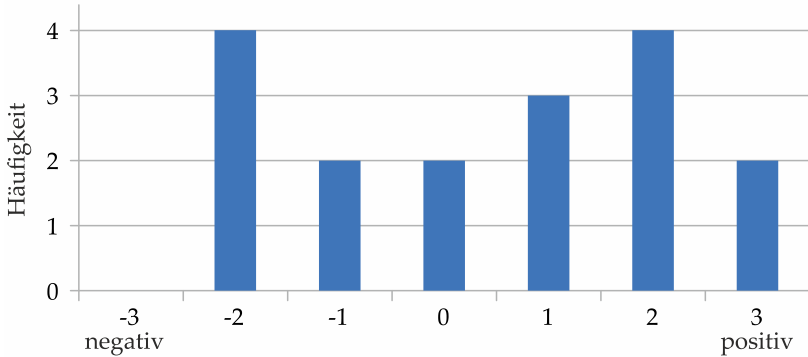


Abbildung 4.15: Gesamteindruck der Probanden zum Baustellenlicht

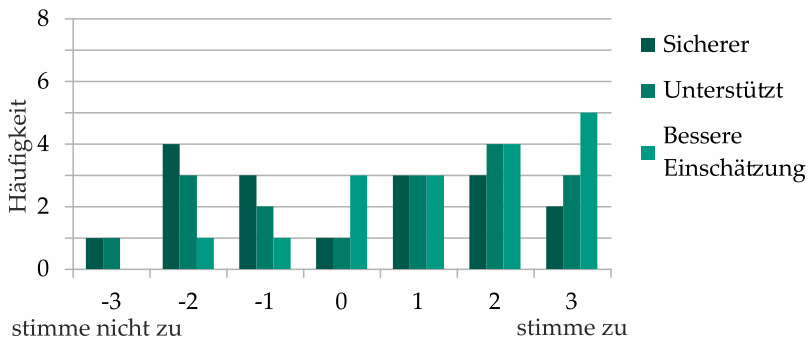


Abbildung 4.16: Meinung der Probanden, ob sie sich mit Baustellenlicht sicherer gefühlt haben, das Baustellenlicht sie bei der Fahraufgabe unterstützt und beim Einschätzen der Fahrzeugbreite geholfen hat

UNTERSUCHTE LICHTFUNKTIONEN

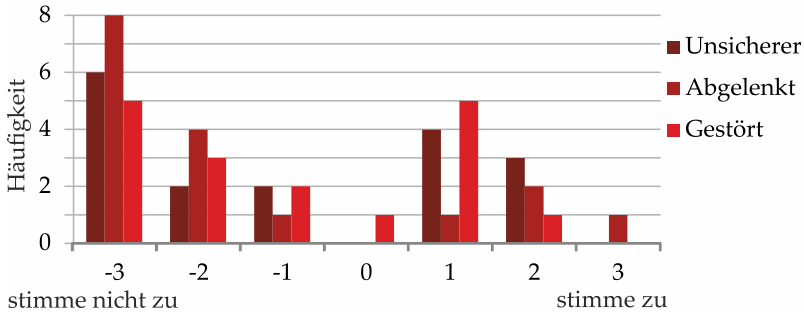


Abbildung 4.17: Meinung der Probanden, ob sie sich durch das Baustellenlicht unsicherer, abgelenkt oder gestört fühlten

Den Positivfragen kann entnommen werden, dass das Baustellenlicht vor allem bei der besseren Einschätzung der Fahrzeugbreite hilft (Mittelwert: 1,35). Den geringsten Einfluss hat es auf das Sicherheitsgefühl mit einem Mittelwert von 0,06. Dies bedeutet aber nicht automatisch, dass sich die Probanden deshalb unsicherer gefühlt haben. Mit einem Mittelwert von -0,82 stimmen die Probanden der Frage, ob sie sich durch das Baustellenlicht unsicherer gefühlt hätten, nicht zu. Ebenso haben sich die Probanden durch das Baustellenlicht weder abgelenkt (Mittelwert: -1,47) noch gestört (Mittelwert: -0,94) gefühlt.

Nachfolgend werden noch die Fragen mit den freien Antwortmöglichkeiten aufgeführt (Abbildung 4.18 bis Abbildung 4.23). Um die Darstellung übersichtlicher zu gestalten, wurden die Antworten der Probanden zu sinnvollen Kategorien kombiniert, anstatt die genauen Wortlaute wiederzugeben.

Hat das Baustellenlicht Ihr Blickverhalten beeinflusst? Wenn ja, inwiefern?

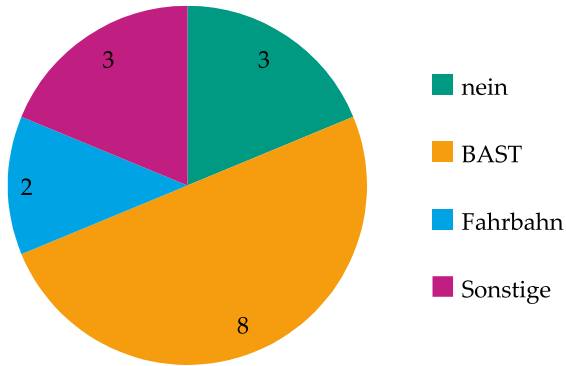


Abbildung 4.18: Einfluss auf das Blickverhalten. „BAST“ bedeutet mehr Blicke auf das Baustellenlicht

Denken Sie, das Baustellenlicht hat Vorteile? Wenn ja, welche?

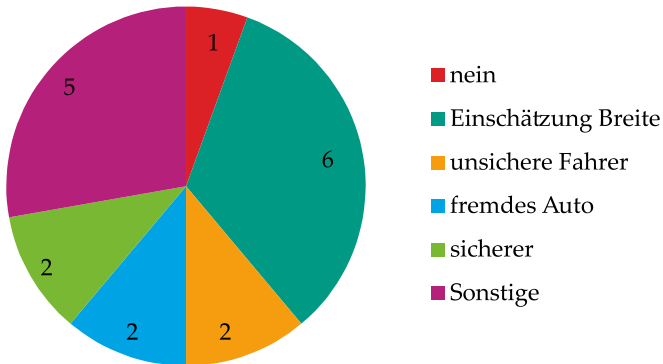


Abbildung 4.19: Von den Probanden genannten Vorteile des Baustellenlichts. Die Einschätzung der Breite bezieht sich auf das eigene Auto, fremdes Auto meint die Unterstützung, wenn man ein fremdes oder neues Fahrzeug lenkt.

UNTERSUCHTE LICHTFUNKTIONEN

Denken Sie, das Baustellenlicht hat Nachteile? Wenn ja, welche?

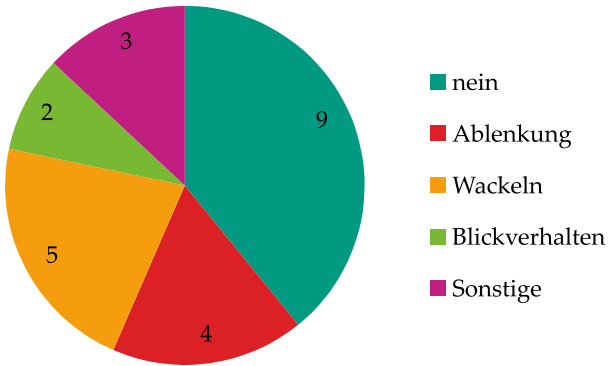


Abbildung 4.20: Von den Probanden genannten Nachteile des Baustellenlichts.

Hätten Sie hinsichtlich der Größe des Baustellenlichts einen Änderungswunsch?

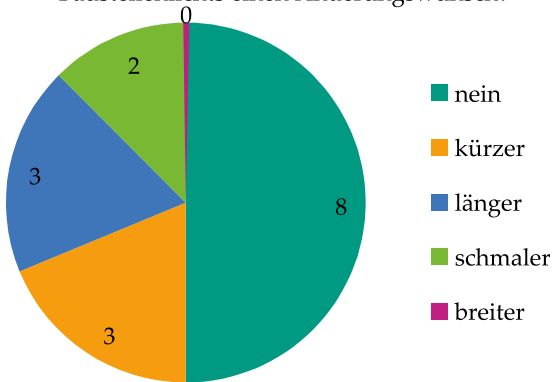


Abbildung 4.21: Änderungswünsche hinsichtlich der Größe des Baustellenlichts.

Hätten Sie hinsichtlich der Position des Baustellenlichts einen Änderungswunsch?

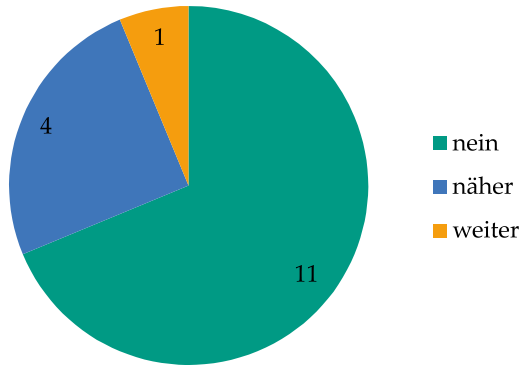


Abbildung 4.22: Änderungswünsche hinsichtlich der Position des Baustellenlichts. Näher und weiter beziehen sich auf die Entfernung zum eigenen Fahrzeug.

Hätten Sie das Baustellenlicht gerne in Ihrem eigenen Fahrzeug?

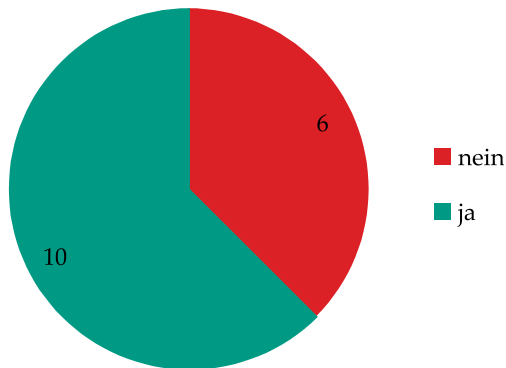


Abbildung 4.23: Wunsch, das Baustellenlicht im eigenen Fahrzeug zu haben.

In Tabelle 4.8 sind die gegebenen Antworten der Kategorie „Sonstige“ zusammengefasst.

Tabelle 4.8: Übersicht über die gegebenen Antworten, die in die Kategorie „Sonstige“ einsortiert wurden.

Frage	Antwort
Blickverhalten	Mehr in die Ferne Abgleich zwischen Baustellenlicht und Fahrbahnbegrenzung Abwechselnd Baustellenlicht und mögliche Hindernisse
Vorteile	Positionierung auf der eigenen Fahrbahn kleine Abweichung vom Kurs schneller bemerkbar Ja, wenn es nicht wackelt In sehr engen Situationen Auf längeren Baustellenabschnitten
Nachteile	Mitlenken zu stark gewöhnungsbedürftig kann in Kurven oder holprigen Strecken verwirren

4.1.6 FAZIT

Insgesamt konnte durch das Baustellenlicht in der untersuchten Form keine Steigerung der Fahrsicherheit in einer baustellenähnlichen Situation nachgewiesen werden. Die Auswertung des Lenkverhaltens ergab einen statistisch signifikant höheren Wert der Hochfrequenzkomponente HFC in Situationen mit Baustellenlicht. Dies bedeutet, dass die Probanden hier häufigere und oder stärkere Lenkkorrekturen vornehmen mussten als in den Situationen ohne Baustellenlicht. Als Hauptursache konnte vor allem die mitlenkende Eigenschaft sowie das

Wackeln der Lichtverteilung identifiziert werden. Das Baustellenlicht an sich wäre Probandenaussagen zufolge durchaus eine hilfreiche Funktion. Auch lässt der schnelle Lerneffekt bei der gefahrenen Geschwindigkeit den Schluss zu, dass man sich als Fahrer erst an das System gewöhnen muss. Eine Durchführung der Studie mit Probanden, die mehrere Tage oder Wochen Zeit hatten, sich an das System zu gewöhnen, war technisch aber nicht möglich.

Untersuchungen von Budanow zeigen, dass eine statische Variante das Fahrverhalten durchaus positiv beeinflussen kann [BUD19]. Das störende Wackeln kann einerseits durch eine aktive Fahrwerks- oder Dämpferregelung verringert werden, andererseits durch eine softwareseitige Verschiebung der Lichtverteilung entgegen der Nickbewegung auf Basis von Sensordaten, beispielsweise durch eine lasergestützte Abtastung der Fahrbahn [STR08]. Dies setzt allerdings eine sehr geringe Latenzzeit voraus. Eine einfache Möglichkeit, den Effekt visuell zu minimieren besteht darin, das Baustellenlicht bereits sehr nah am Fahrzeug beginnen zu lassen und entlang der longitudinalen Achse mit einem weichen Gradienten langsam auslaufen zu lassen.

Die Problematik des Mitlenkens hat eine komplexere Ursache. Eine kleine Lenkkorrektur, um das Fahrzeug wieder exakt in der gewünschten Fahrtrichtung zu positionieren, führt dazu, dass das Baustellenlicht im weiter entfernten Bereich die Fahrbahnmarkierung/-begrenzung kreuzt. Das Baustellenlicht zeigt somit zwar die korrekte Trajektorie des Fahrzeugs an, wenn der Fahrer diesen Lenkwinkel beibehalten würde. Doch in der Praxis wird der Fahrer das Lenkrad beim

Erreichen der gewünschten Fahrzeugausrichtung wieder auf die Nullposition bringen und somit geradeaus lenken. Die Linien des Baustellenlichtes zeigen also im vorderen Bereich eine Prädiktion an, die so nicht stattfinden wird, dem Fahrer aber das Gefühl vermittelt, er dürfte das Lenkrad so nicht einschlagen. Das Problem wird in Abbildung 4.24 verdeutlicht: Zum Zeitpunkt 1 habe das Fahrzeug eine beispielhafte Schrägstellung zur Fahrbahn von 3° , der Fahrer reagiert bereits und hat das Lenkrad eingeschlagen. In der statischen Variante wird hier vor allem eine Kollision mit dem linken Fahrbahnrand suggeriert, in der mitlenkenden Variante scheint das Fahrzeug diesen nur zu touchieren. Bereits kurz darauf hat das Fahrzeug durch den Lenkeingriff nur noch eine Schiefstellung von 1° . Hier impliziert die statische Variante, dass die Soll-Richtung fast wieder erreicht ist. Dafür ist jetzt die mitlenkende Variante suboptimal da sie suggeriert, das Lenkrad müsste bereits wieder gerade gestellt werden um die eigene Fahrbahn zu halten und nicht mit eventuellem Gegenverkehr zu kollidieren.

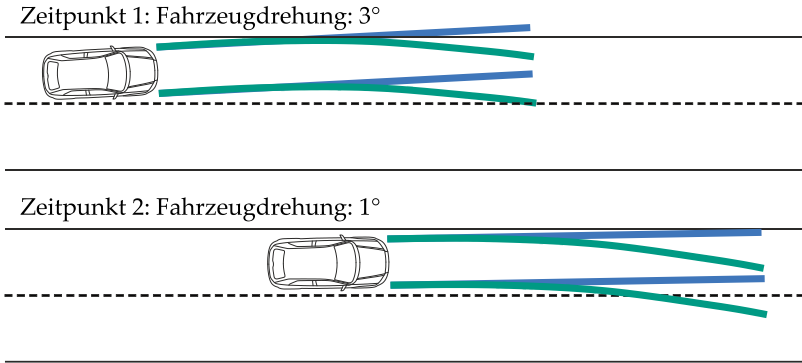


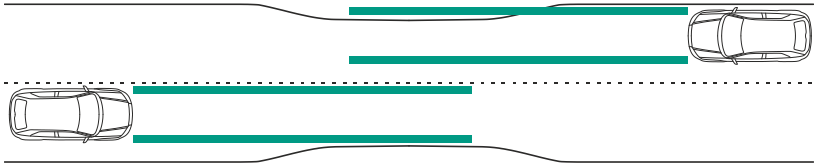
Abbildung 4.24: Problematik eines statischen (blau) und eines mitlenkenden (grün) Baustellenlichts.

Um dies zu vermeiden sollte darüber nachgedacht werden, die Lichtfunktion auf ihre eigentliche Intention zu beschränken: „Ist die Lücke breit genug, damit das Auto durchpasst?“ Dazu müsste das Baustellenlicht nicht relativ zum Fahrzeug sondern relativ zur Fahrspur positioniert werden. Sensorseitig wird diese durch den Spurhalteassistenten bereits erfasst. Somit ließe sich die Breite des Fahrzeugs mittig auf der Spur positionieren und die Entscheidung bleibt dem Fahrer überlassen, ob er beispielsweise den LKW überholen möchte. Dies funktioniert deutlich einfacher als bei einem mitlenkenden Baustellenlicht, dessen vordere Bereiche bei kleinen Lenkkorrekturen abwechselnd den LKW und die Betonmauer treffen würden.

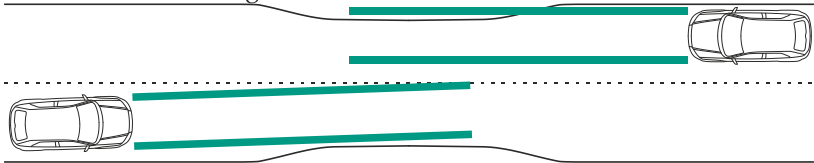
In dieser Form wäre das Baustellenlicht eventuell auch gut für Engstellen, beispielsweise an Ortseingängen zur Geschwindigkeitsreduzierung, einsetzbar. Sowohl der Fahrer als auch ein entgegenkommendes Fahrzeug können erkennen, ob die Durchfahrt für zwei

Fahrzeuge simultan machbar ist. Zur Illustration dient Abbildung 4.25. In den ersten beiden Varianten, die den Status Quo (egal ob mitlenkend oder statisch) darstellen, hat der jeweils linke Fahrzeugführer bereits darauf reagiert, dass sein Baustellenlicht den nicht befahrbaren Bereich trifft. Variante 3 ist der Vorschlag zur Orientierung des Baustellenlichts an der verfügbaren Fahrspur. Bei dieser Variante wissen beide Fahrzeugführer, dass ihre Fahrzeuge aneinander vorbeipassen werden. Dabei kann zu einem beliebigen Zeitpunkt reagiert werden oder auch die Entscheidung getroffen werden, zu warten um dem anderen Fahrzeug Vorrang zu gewähren. Dies könnte dann relevant sein, wenn der Gegenverkehr auf Bereiche des eigenen Baustellenlichts fährt. In diesem Fall weiß der Fahrer, dass der Gegenverkehr seine Spur nicht unbedingt so gut hält, wie es notwendig wäre. Bei Variante 1 und 2 hat das Überfahren des eigenen Baustellenlichts durch andere hingegen keinen zusätzlichen Informationsgehalt. Es sei angemerkt, dass es sich im letzten Absatz lediglich um Vorschläge des Autors handelt, Untersuchungen, ob diese Varianten dem Fahrzeugführer einen Vorteil bringen, sind bisher nicht bekannt.

Variante 1: Fahrt nah am Mittelstreifen



Variante 2: Frühzeitiges Lenken erforderlich



Variante 3: Keine Maßnahme aufgrund des BAST erforderlich

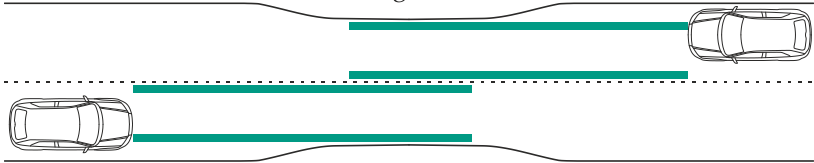


Abbildung 4.25: Engstellensituation mit Baustellenlicht. Die ersten beiden Varianten stellen den Status Quo dar, jeweils das linke Fahrzeug hat bereits auf die vermeintliche Kollision mit der Spurverengung reagiert. Variante 3: Baustellenlicht wird relativ zur Fahrbahn positioniert.

4.2 STUDIE 2: ABLENKPOTENZIAL DES BAUSTELLENLICHTS

4.2.1 ZIEL DER STUDIE UND EINGRENZUNG DES UNTERSUCHUNGSGEGENSTANDS

Die Untersuchung der Wirksamkeit des Baustellenlichts zeigte keine nennenswerten Vorteile, aber auch keine gravierenden Nachteile, insbesondere keine erhöhte Ablenkung des Fahrers. Ebenfalls wurden in der vorangehenden Studie die eruierten Probleme analysiert und Verbesserungsvorschläge erörtert, wodurch das Baustellenlicht in einer überarbeiteten Version den Fahrzeugführer effektiv unterstützen könnte.

Für eine erfolgreiche Homologation muss allerdings noch der Nachweis erfolgen, dass das Baustellenlicht keine anderen Verkehrsteilnehmer ablenkt. Dies erfolgte mittels einer weiteren, volldynamischen Probandenstudie. Als Referenzlichtverteilung für die statistische Auswertung diente das Abblendlicht ohne zugeschaltetes Baustellenlicht. Als Messgröße wurde mittels eines Eye-Tracking-Systems die Blickzuwendungsdauer auf die andere Fahrbahn in verschiedenen Situationen aufgenommen. Näheres dazu findet sich in Kapitel 4.2.2.3 wieder.

Es wurden zwei Hypothesen H_a und H_b aufgestellt. Die erste ergibt sich aus der Frage, ob das Baustellenlicht einen Einfluss auf die Blickzuwendungszeiten hat. Die Nullhypothese $H_{0,a}$ lautet:

H_{0,a}: „Es gibt keinen Unterschied in den Blickzuwendungszeiten zwischen Situationen mit und Situationen ohne Baustellenlicht.“

Da es keine sinnvolle Begründung dafür gibt, dass ein Proband bei Erscheinen des Baustellenlichts aktiv weg schaut, kann eine durch das Baustellenlicht hervorgerufene Änderung der Blickzuwendungsdauer diese nur verlängern. Folglich ist die Alternativhypothese einseitig zu formulieren. Die Alternativhypothese *H_{1,a}* lautet entsprechend:

H_{1,a}: „Die Blickzuwendungszeiten in Situationen mit Baustellenlicht sind länger als in Situationen ohne Baustellenlicht.“

Weiterhin sollte untersucht werden, ob das Baustellenlicht einem Lerneffekt unterliegt. Dies würde bedeuten, dass die Blickzuwendungsdauern bei mehrmaligem Sehen aufgrund der „Bekanntheit“ der Lichtfunktion abnehmen. Die zugehörige Nullhypothese *H_{0,b}* lautet:

H_{0,b}: „Es gibt keinen Unterschied in den Blickzuwendungszeiten zwischen Situationen, in denen das Lichtmuster das erste Mal gesehen wird und Situationen, in den das Baustellenlicht bereits bekannt ist.“

Da es in der Literatur keine belastbaren Indikatoren dafür gab, dass ein Lerneffekt zu erwarten wäre, ist die Alternativhypothese *H_{1,b}* daher zweiseitig.

H_{1,b}: „Die Blickzuwendungszeiten sind beim ersten Auftreten des Lichtmusters signifikant höher als in Folgesituationen.“

Sowohl eine zunehmende als auch eine abnehmende Blickzuwendungsdauer ließe sich plausibel erklären. Die abnehmende Dauer wird durch den Bekanntheitsgrad bzw. den fehlenden Neuheitswert

gestützt. Eine zunehmende Dauer wäre dadurch zu begründen, dass ein vermehrtes Auftauchen der Lichtfunktion das Interesse des Probanden daran steigern könnte.

4.2.2 MATERIAL UND METHODEN

Nachfolgendes Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die verwendeten Messsysteme, wie die aufgenommenen Rohdaten verarbeitet wurden und welche Software bei der Auswertung zum Einsatz kam. Weiterhin werden das Versuchsdesign sowie die Versuchsdurchführung erläutert.

4.2.2.1 EYE-TRACKING-SYSTEM

Um die Blickbewegungen der Probanden aufzunehmen wurde ein Remote Eye-Tracking-System der Firma *SmartEye* verwendet. Remote bedeutet hierbei, dass das System nicht am Kopf des Probanden montiert ist, sondern dessen Blickrichtung aus einiger Entfernung als fixe Installation im Fahrzeuginnenraum bestimmt. Dies hat den Vorteil, dass der Proband nicht gestört oder in seiner Sicht eingeschränkt wird. Um die Blickrichtung zu berechnen, werden die Reflexion von Licht auf der Hornhaut sowie die Detektion der Pupille genutzt. Hierzu sind drei Kameras auf den Probanden ausgerichtet (siehe Abbildung 4.26). Über eine Kalibrierung kann die Software die relative Position der Kameras (sowie der beiden daran montierten Infrarotstrahler) innerhalb eines Weltkoordinatensystems (WCS)

bestimmen. Solange die Augen des Probanden von mindestens zwei der Kameras erfasst werden, gibt es eine Verschiebung des Hornhautreflexes zwischen den beiden Kamerabildern, nicht jedoch der Pupille. Hierdurch kann ein Blickvektor errechnet werden. Zusätzlich ist es möglich durch eine Schnittpunktberechnung der Blickvektoren (rechtes und linkes Auge) eine Tiefeninformation zu generieren. Da diese Information für die Auswertung aber nicht von Nutzen ist, wurde sie nicht aufgenommen.



Abbildung 4.26: Eye-Tracking-System im Versuchsfahrzeug. Auf dem Armaturenbrett die drei Tracking-Kameras sowie die beiden Infrarotstrahler (rot markiert). Hinter der Windschutzscheibe ist die Szenenkamera montiert (blau markiert). Die Kartonagen dienen der Abschattung der Infrarotlichter vor der Szenenkamera.

Um den Blickvektor einem realen Punkt im Verkehrsraum zuzuordnen zu können, ist zusätzlich hinter der Windschutzscheibe eine sogenannte Szenenkamera angebracht. Über eine weitere Kalibrierung, die 9-Punkt-Kalibrierung, wird dieses Video ins WCS transformiert wodurch dann die Blickrichtung live im Video angezeigt werden kann. Das Ergebnis einer solchen Kalibrierung ist in Abbildung 4.27 zu sehen. Je mehr kleine Kreise (aufgenommene Blickdaten in Sollblickrichtung) innerhalb des großen Kreises (Sollblickrichtung) liegen, desto präziser funktioniert das Tracking.

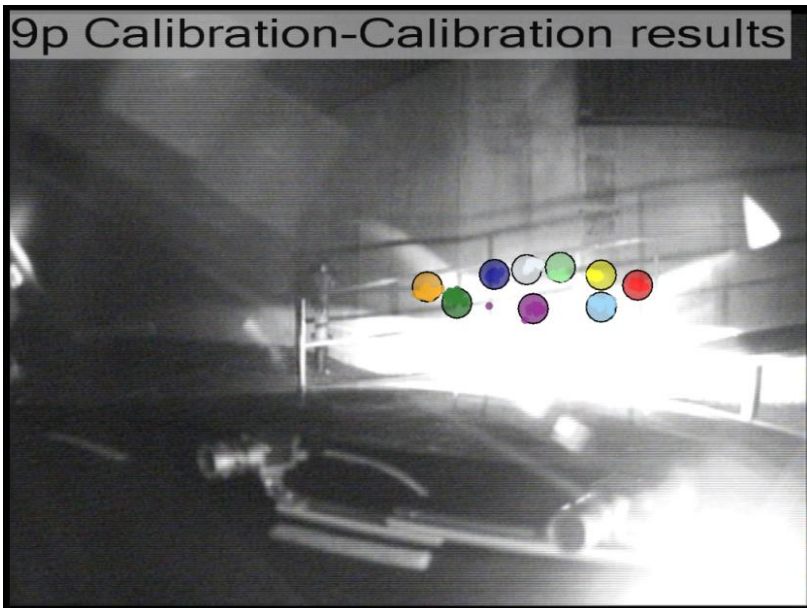


Abbildung 4.27: Beispiel einer 9p-Kalibrierung. Der Proband musste in Richtung des großen Kreises schauen, die kleinen Kreise entsprechen den zugehörigen, gemessenen Blickvektoren.

4.2.2.2 MAPPS

Die Analyse der aufgenommenen Eye-Tracking-Daten erfolgte in der Software *MAPPS (Multi-modal Analysis of Psychophysiological and Performance Signals)* des Herstellers *eyesDx*. Neben der reinen Darstellung des Videos mit überlagertem Blickvektor erlaubt *MAPPS* die Analyse der Daten mittels verschiedener Tools. So werden zunächst die Regions of Interest (ROI) definiert, sowohl ihre Form und Lage im Raum als auch der betreffende Zeitslot im Video. Im vorliegenden Falle waren die ROIs die eigene Fahrbahn und die benachbarte Fahrbahn während der zu untersuchenden Situationen. Hierauf wird in 4.2.3 näher eingegangen. Nachdem die ROIs definiert wurden, gibt *MAPPS* direkt einige Statistiken für diese aus, darunter die Anzahl der Blickzuwendungen, minimale, durchschnittliche und maximale Blickzuwendungsdauer sowie das Verhältnis der gesamten Blickzuwendungsdauer der beiden ROIs zueinander. Letzteres wurde dann auch für die statistische Auswertung der Studie verwendet, da eine erhöhte Blickzuwendungszeit in Richtung der Gegenfahrbahn, auf der das Baustellenlicht zu sehen war, ein Indikator für eine verstärkte Ablenkung darstellt. Ebenfalls Berücksichtigung fanden die absoluten Blickzuwendungszeiten. Die genaue Vorgehensweise wird ebenfalls in Kapitel 4.2.3 erläutert. Abbildung 4.28 zeigt einen Ausschnitt aus *MAPPS* mit einem grünen Kreis als aktueller Blickrichtung sowie den beiden ROIs in rot und blau umrahmt.



Abbildung 4.28: Screenshot aus *MAPPs*. In rot die ROI „linke Fahrbahn“, in blau die ROI „eigene Fahrbahn“. Der grüne Kreis ist die momentane Blickrichtung. Die scheinbare Blendquelle oberhalb der eigenen Fahrbahn ist lediglich Wärmestrahlung die von der IR-empfindlichen Szenenkamera, nicht jedoch vom Auge erfasst wird.

4.2.2.3 VERSUCHSDESIGN

Auch diese Untersuchung fand in Form einer volldynamischen Probandenstudie im within-subjects-Design mit Messwiederholung statt (vgl. auch Kapitel 4.1.2.4). Zur Vermeidung von Positionseffekten war die Reihenfolge vollständig randomisiert. Um die Belastbarkeit zu erhöhen, Ausreißer identifizieren und einen Lerneffekt ermitteln zu können musste jede Situation mindestens zwei Mal durchlaufen werden. Schlussendlich wurde jede Situation drei Mal durchlaufen,

was einerseits die Belastbarkeit weiter erhöht, andererseits im Falle eines Messfehlers die Möglichkeit bietet, den Messwert zu verwerfen anstatt den Durchlauf zu wiederholen. Ungeachtet des zusätzlichen Aufwands einer Wiederholung hätte dies den Nachteil, dass Probanden mit Messfehlern mehr Durchgänge hätten als Probanden ohne Messfehler, wodurch der Lerneffekt unterschiedlich stark ausgeprägt wäre.

Das Probandenkollektiv wurde in zwei Gruppen unterteilt, eine Gruppe mit Personen im Alter von maximal 30 Jahren, die andere von mindestens 50 Jahren. Dies ermöglicht prinzipiell einen Einfluss des Alters auf den Untersuchungsgegenstand festzustellen. Im Allgemeinen lassen sich jüngere Fahrer leichter ablenken, wie Studien von Stuttg [STU01] zeigten. Über den eigentlichen Untersuchungsgegenstand wurden die Probanden im Unklaren gelassen, um einer Präjudizierung vorzubeugen. Ihre Vorabinformationen beschränkten sich auf die Teilnahme einer Studie zur Untersuchung des Blickverhaltens in Überholsituationen.

Für die Untersuchung wurden zwei Situationen definiert: die Überholfahrt und die Parallelfahrt. Beide Situationen simulierten eine Fahrt durch eine Baustelle auf der Autobahn. Bei der Überholsituation wurde der Proband von dem mit Baustellenlicht ausgestatteten Fahrzeug überholt. Die Parallelfahrt stellte den Fall dar, dass der Fahrer mit Baustellenlicht sich nicht traut zu überholen und daher mit geringem Abstand auf der linken Fahrbahn versetzt dem Probanden folgt. Beide Situationen werden in Abbildung 4.29 skizziert.

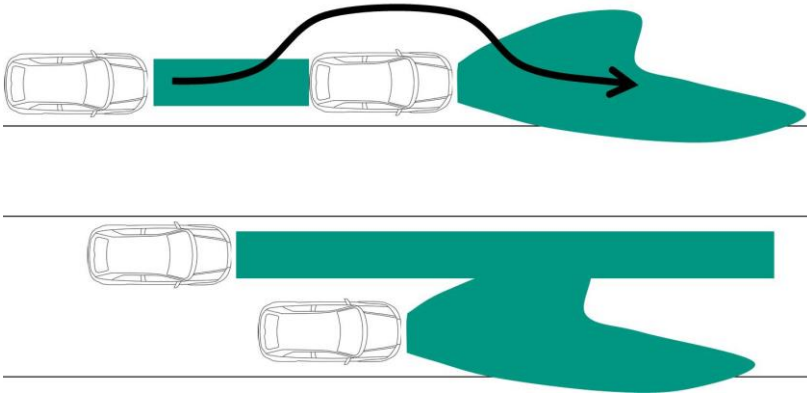


Abbildung 4.29: Schematische Darstellung der beiden Situationen; Überholfahrt oben, Parallelfahrt unten.

Als Testgelände wurde der Hockenheimring gewählt, da dieser weitestgehend frei von Störvariablen wie ortsfester Beleuchtung und anderer Verkehrsteilnehmer ist. Zwar ist dieser wesentlich breiter als eine Baustelle, auf einen Relativvergleich der beiden Situationen hat dies aber keinen Einfluss. Die Versuche fanden ausschließlich bei Trockenheit statt, da nasser Fahrbahnbelag die Ergebnisse aufgrund der erhöhten Vorwärtsreflexion [KÖH12] verfälscht hätte.

Zusätzlich zu den objektiven Daten des Eye-Tracking-Systems wurden mittels eines Fragebogens subjektive Daten erhoben. Der Fragebogen (zu finden in Anhang B.2) wurde den Probanden jedoch nicht vollständig vorgelegt, sondern eine Frage nach der anderen in einer vorgegebenen Reihenfolge. Ziel dieser Vorgehensweise war es, über den sukzessiven Aufbau (von allgemeinen hin zu detaillierten Fragen) herauszufinden, wie prägnant die Lichtfunktion für den jeweiligen

Probanden war, um somit eine unvoreingenommene Bewertung des Systems hinsichtlich der Ablenkung zu erhalten. Daher wurden die Probanden zunächst immer gefragt, ob ihnen generell etwas aufgefallen sei und in der Folgefrage, ob sie etwas gestört habe. Die Reihenfolge ging dabei von „einer Situation“ über „das andere Fahrzeug“ zum „Licht des anderen Fahrzeugs“. Durch eine Zuordnung der Zahlenwerte 1-3 entsprechend der drei Stufen, repräsentiert der Mittelwert ein Maß für die Auffälligkeit und subjektive Bewertung des Systems. Darüber hinaus mussten die Probanden, sofern sie „ja“ ankreuzten, begründen bzw. erläutern, was ihnen aufgefallen sei oder was sie gestört habe. Somit konnten falsch-positive Antworten gefiltert werden. Abschließend wurden die Probanden noch nach ihrer Meinung gefragt, ob sie sich vorstellen könnten, dass die neue Lichtfunktion einen Beitrag zur Verkehrssicherheit leisten und/oder diese gefährden könne.

4.2.2.4 VERSUCHSABLAUF

Zuerst bekam jeder Proband ein Informationsblatt über den Versuchsablauf, Datenschutz etc. ausgehändigt. Nach der Einwilligung wurden über einen Fragebogen demographische Daten, Fahrerfahrung und Kenntnisstand hinsichtlich Ausstattungsmerkmalen von KFZ abgefragt. Voraussetzung für die Teilnahme war das Bestehen eines Sehtestes um die Vergleichbarkeit der Probanden untereinander zu gewährleisten. Weiterhin musste eine ausreichende visuelle Leistungsfähigkeit der Probanden sichergestellt sein, um eine potenzielle

Ablenkung überhaupt feststellen zu können. Neben einem Mindestkontrastempfinden (5 % für unter 50-jährige, 10 % ab 50 J.) mussten die Probanden daher einen Visus von mindestens 0,8 (ab 50 Jahren) respektive 1,0 (unter 50 Jahren) aufweisen. Nach bestandenem Screening-Test wurde der Proband in das Versuchsfahrzeug des LTI (im folgenden „Probandenfahrzeug“) eingewiesen und zur Startposition geführt. Dort wurde das Eye-Tracking-Profil erstellt sowie die 9p-Kalibrierung durchgeführt (vgl. Kapitel 4.2.2.1). Nach erfolgreicher Verifikation der Kalibrierung passierte der Proband zwölf Mal den Versuchsdurchgang wie er in Kapitel 4.2.2.3 beschrieben ist. Nach der Versuchsfahrt wurde der Abschlussfragebogen (Anhang B.2) ausgehändigt. Der gesamte Versuchsablauf ist ebenfalls in Anhang B.2 als Ablaufdiagramm in Abbildung B.5 dargestellt.

Für den Versuch mussten einige Störvariablen eliminiert werden:

- Der Proband sollte die Lichtfunktion ausschließlich während der jeweiligen Situation sehen können:
 - Die Lichtfunktion wurde jedes Mal erst direkt nachdem der Proband losgefahren ist aktiviert und noch vor dem Wenden wieder deaktiviert
- Es sollte die Lichtfunktion an sich getestet werden, nicht jedoch das „Springen“ der Kanten bei Unebenheiten der Fahrbahn
 - Da keine aktive Regelung vorhanden war, wurde zumindest das Fahrwerk auf die weichste Stufe (Komfort) gestellt

- Äußere Faktoren, die Ablenken könnten:
 - Das Radio und Multi Media Interface (MMI) war ausgeschaltet, nur das MMI-Logo war als statisches Bild sichtbar

4.2.3 ERGEBNISSE

Zur Überprüfung der Nullhypothese $H_{0,a}$ wurden die mittleren Blickzuwendungsdauern aller Situationen ohne Baustellenlicht mit allen Situationen mit Baustellenlicht verglichen. Erstere werden in den Statistiken kurz als REF für „Referenz“ bezeichnet, letztere aufgrund des verwendeten Mikrospiegelarrays zur Erzeugung der Lichtverteilung als DMD. Da die kumulierten Blickzuwendungsdauern von der Dauer der Situation und somit von Geschwindigkeit, Überholzeitpunkt etc. abhängen würden, wurde nur das prozentuale Verhältnis „linke Fahrbahn“ zu „eigene Fahrbahn“ evaluiert. Das bedeutet, dass die Blickzuwendungszeiten innerhalb der beiden ROIs über eine Situation auch aufsummiert wurden, für die statistische Auswertung aber der hierin enthaltene Anteil der Blickzuwendung auf die linke Fahrbahn verglichen wurde. Dieser Anteil stellt somit die abhängige Variable dar.

Als statistischer Test wurde ein ALM mit Messwiederholung herangezogen, wobei bei der einseitigen Hypothese H_a darauf geachtet wurde, den von SPSS ausgegebenen p -Wert zu halbieren. Tritt beim Test eine Signifikanz auf, so heißt dies nicht automatisch, dass ein kritisches Ablenkpotenzial vorliegt. Es muss zunächst festgestellt

werden, ob die erhöhten Blickzuwendungszeiten auch einen negativen Effekt auf die Fahrsicherheit haben können. Blickabwendungszeiten vom eigentlichen Fahrgeschehen bis 1,5 s gelten laut Trefflich als „noch vertretbar“ [TRE10]. Daher wurden im Nachhinein zusätzlich alle Situationen mit einer Blickzuwendungsdauer von mehr als 1,5 s am Stück in die ROI individuell bewertet. Galt die Blickzuwendung beispielsweise dem wischenden Blinker, so kann dies nicht dem Baustellenlicht zugerechnet werden.

Weiterhin sollte überprüft werden, ob die Blickzuwendungsdauern über den Versuch hinweg kürzer werden, es also einen Lern- oder Gewöhnungseffekt gibt.

4.2.3.1 EYE-TRACKING-DATEN

Insgesamt wurden die Eye-Tracking-Daten von 20 Probanden ausgewertet. Bei einem Probanden wurde das Tracking jedoch zu häufig unterbrochen, sodass diese Daten nicht verwertbar waren. Die ausgewerteten Blickzuwendungsdauern auf die linke Fahrspur wiesen, wie dies auch zu erwarten war, eine sehr hohe Streubreite auf. Zusammengefasst werden die Ergebnisse im Boxplot in Abbildung 4.30. Auf der Ordinate ist der Anteil der Blickzuwendungsdauer auf die linke Fahrspur im Verhältnis zu der gesamten Blickzuwendungsdauer gemäß Formel 4.2 aufgetragen.

$$\text{Anteil} = \frac{\text{Kumulierte Fixationsdauer der ROI "linke Fahrspur"}}{\text{Kumulierte Fixationsdauer beider ROIs zusammen}} \quad (4.2)$$

Die Beschriftung der Boxen bezeichnet dabei jeweils den Mittelwert aus:

- DMD 1: Erste Überholsituation und erste Parallelfahrt mit Baustellenlicht
- DMD 3: Dritte Überholsituation und dritte Parallelfahrt mit Baustellenlicht
- REF alle: Alle sechs Situationen mit Abblendlicht (Referenz, Baustellenlicht ausgeschaltet)
- DMD alle: Alle sechs Situationen mit Baustellenlicht

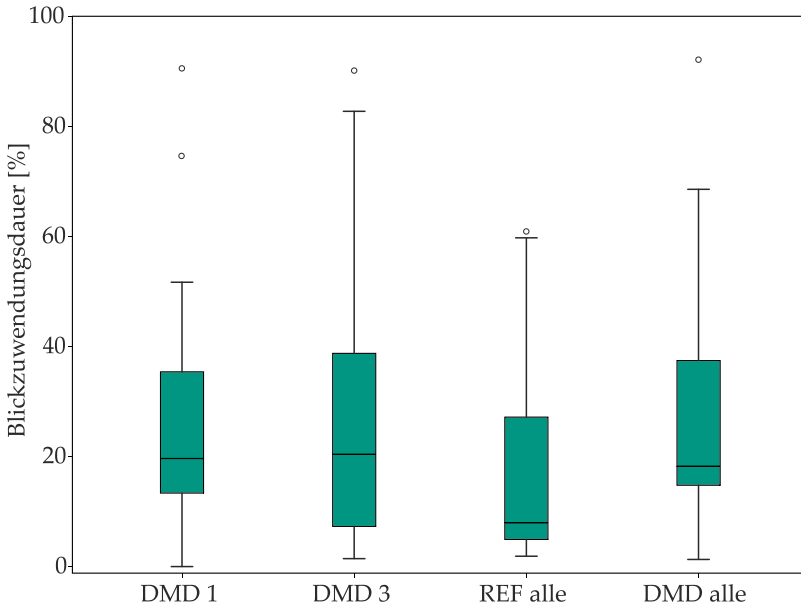


Abbildung 4.30: Boxplot der Blickzuwendungsdauern „linke Fahrspur“ in Prozent. 100% entspricht hierbei der kumulierten Blickzuwendungsdauer auf die linke und die eigene Fahrspur (N=19).

Die Annahme der Normalverteilung wurde nach Shapiro-Wilk-Test von allen vier Datensätzen verletzt ($p_{DMD_1}=0,012$; $p_{DMD_3}=0,013$; $p_{REF_alle}=0,001$; $p_{DMD_alle}=0,004$), die Annahme der Varianzhomogenität nach Levene-Test teilweise ($p_{DMD_1}=0,008$; $p_{DMD_3}=0,318$; $p_{REF_alle}=0,489$; $p_{DMD_alle}=0,120$). Dennoch wurde zur Überprüfung der Hypothesen das ALM mit Messwiederholung herangezogen, für die Begründung sei hier auf Kapitel 2.6 verwiesen.

Der visuelle Vergleich von DMD 1 mit DMD 3 lässt keinen Lerneffekt erkennen. Die Mittelwerte sind mit 27,35% für die jeweils erste

Situationskombination minimal geringer als bei der dritten Situationskombination (28,02%). Der statistische Vergleich zwischen den beiden Situationen zeigte einen interessanten Trend hinsichtlich einer möglichen Altersabhängigkeit des Lerneffekts. Während die ältere Probandengruppe über den zeitlichen Verlauf seltener die linke Fahrbahn fixierte, fixierte die jüngere Probandengruppe diese häufiger (vgl. Abbildung 4.31). Statistisch signifikant war dieser Effekt jedoch nicht ($F(1,17)=0,214$; $p=0,650$). Selbiges gilt für den Signifikanztest des Lerneffekts über die gesamte Probandengruppe ($F(1,17)=0,000$; $p=0,985$).

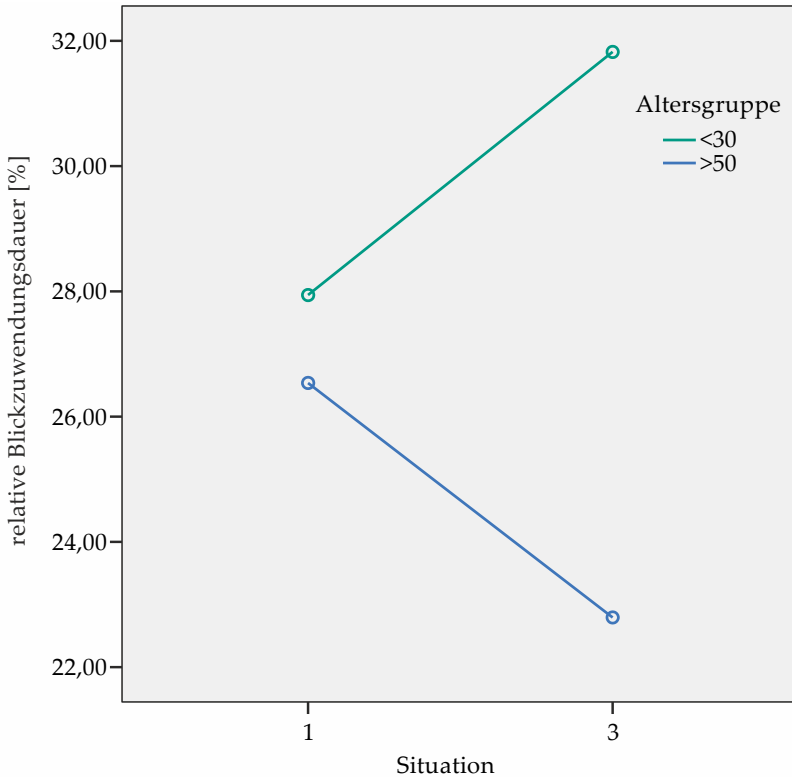


Abbildung 4.31: Relative Blickzuwendungsdauern der 1. und 3. Situation mit eingeschaltetem Baustellenlicht für die beiden Altersgruppen

Aufgrund der vergleichsweise kurzen Gewöhnungszeit gibt das Ergebnis aber lediglich einen Hinweis. Ein Lerneffekt über Wochen oder Monate kann damit nicht mit Bestimmtheit ausgeschlossen werden.

Für die Überprüfung der $H_{a,0}$ -Hypothese und somit die wichtigere und entscheidende Hypothese der vorliegenden Studie ist der Vergleich

zwischen allen Situationen ohne Baustellenlicht und allen Situationen mit Baustellenlicht relevant. Hier lässt bereits die Sichtprüfung signifikant höhere Blickzuwendungsdauern vermuten, was sich im ALM mit Messwiederholung auch bestätigt ($F(1,17)=12,745$; $p=0,001$). Mit einem partiellen Eta-Quadrat von $\eta^2=0,428$ und Cohens $f=0,87$ kann der Effekt als stark angesehen werden.

Die Ergebnisse beider Statistiken sind in Tabelle 4.9 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 4.9: Ergebnisse des ALM mit Messwiederholung, Effektstärke ohne signifikanten Unterschied der Mittelwerte nicht von Bedeutung

Test	<i>p</i> -Wert	Cohens <i>f</i>
DMD 1 vs. DMD 3	0,985	–
DMD alle vs. REF alle	0,001	0,865

Ein Alterseinfluss konnte auch hier nicht festgestellt werden ($F(1,17)=0,066$; $p=0,800$). Dieser wäre wissenschaftlich eventuell interessant, hätte aber keinen Einfluss auf die Zulassungsfähigkeit der untersuchten Lichtfunktion.

Zusätzlich zu den statistischen Tests wurden die absoluten Blickzuwendungsdauern bewertet. Als Bewertungsrichtlinie wurden hier zu lange Blickzuwendungen genau dann als unkritisch eingestuft, wenn die Blicke an sich bereits im Fernfeld, weit genug vorne im Vorfeld und/oder in der Entfernung, in der der Proband auch ohne Baustellenlicht die meisten Fixationen aufwies, waren. In diesem Fall war gewährleistet, dass potenzielle Gefahrenstellen nach wie vor rechtzeitig erkannt würden. Bei Blicken nah vor dem eigenen

Fahrzeug, noch dazu auf der linken Fahrbahnseite, hätte dies hingegen nicht gewährleistet werden können. Weiterhin wurde überprüft, dass der Proband zwischen mehreren Fixationen auf das Baustellenlicht den Blick auch ins Fernfeld richtet. Dies kann als Indiz gesehen werden, dass er sich noch auf die Fahraufgabe konzentriert und sich nicht gefährlich lange ablenken lässt. Unter allen ausgewerteten Fixationen (2636 auf die eigene Fahrbahn und 976 auf die Gegenfahrbahn) konnten lediglich zwei als „potenziell gefährlich“ eingestuft werden. In beiden Fällen handelte es sich nicht um die erste Situation mit Baustellenlicht sondern um die mittlere bzw. letzte Situation. Daher ist anzunehmen, dass den Probanden der Versuchsablauf bereits vertraut war und sie davon ausgingen, dass keine Gefahrensituationen absichtlich herbeigeführt wurden. Dennoch sind die Ergebnisse der Untersuchung belastbar, da ein dauerhaft unaufmerksames Fahren nicht möglich war. Alle Probanden wurden vor Versuchsantritt gewarnt, dass Kröten und vor allem Hasen des Öfteren die Strecke passieren, was durchaus der Realität am Hockenheimring entspricht und nahezu jeden Versuchsabend bestätigt werden konnte.

4.2.3.2 FRAGEBÖGEN

Wie in Kapitel 4.2.2.3 erläutert, wurde jede Frage mit einem Wert von 1-3 bewertet, wobei „1“ für das sofortige Identifizieren der neuartigen Lichtverteilung bereits bei allgemeinen Fragen sprach, „3“ erst bei der konkreten Nachfrage nach dem Licht des anderen Fahrzeuges. Der Extremfall, dass das Baustellenlicht gar nicht bemerkt wurde, wurde

mit „4“ bewertet. Die Häufigkeitsverteilung kann Abbildung 4.32 entnommen werden, der Mittelwert liegt bei 1,50. Zwar erwähnten 75% der Probanden direkt die Lichtverteilung, jedoch fühlten sich lediglich 35% aller Probanden (unabhängig vom Zeitpunkt der Erwähnung) überhaupt davon gestört. Hierfür mag es verschiedene Gründe geben, nicht nur die Lichtverteilung an sich. Zwei der Probanden gaben „Blendung“ oder die „Helligkeit“ als Grund an. Dies könnte noch am Prototypenstatus der Scheinwerfer liegen, durch den direktes Streulicht aus dem Scheinwerfer über die Außenspiegel ins Auge des Probanden traf. Eine Blendung durch die Lichtverteilung ist aufgrund der geringen Leuchtdichte von ca. 0,9...1,0 cd/m² (vgl. Tabelle 4.1 und Abbildung 4.2) eher unwahrscheinlich. Als weitere Ursache für die Störung wurden das Wackeln der Lichtverteilung aufgrund der Nickbewegungen bei Unebenheiten der Fahrbahn sowie das ungewohnte Erscheinungsbild genannt. Einige Antworten wie „Parallelfahrt“ oder „Das Licht“ können nur schwer interpretiert werden. Eine Übersicht der Answerhäufigkeiten findet sich in den Abbildungen 4.33-4.35.

UNTERSUCHTE LICHTFUNKTIONEN

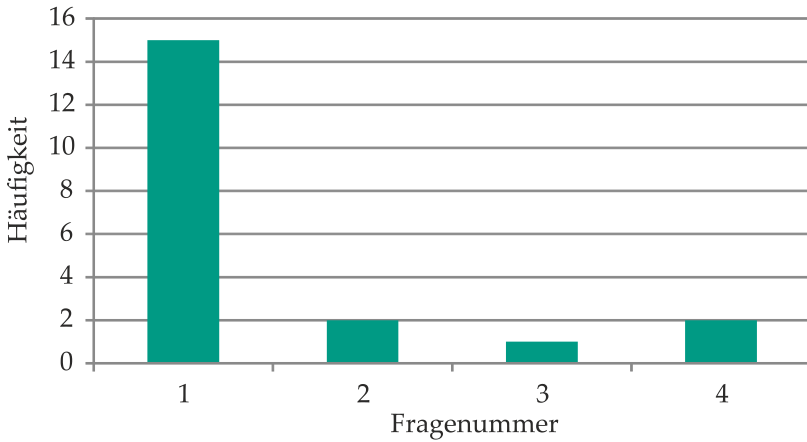


Abbildung 4.32: Histogramm der Fragennummer, wann das Baustellenlicht bemerkt wurde (1=sofort, 4=gar nicht; N=20).

2. Empfanden Sie in einer oder mehreren Situationen etwas als störend?

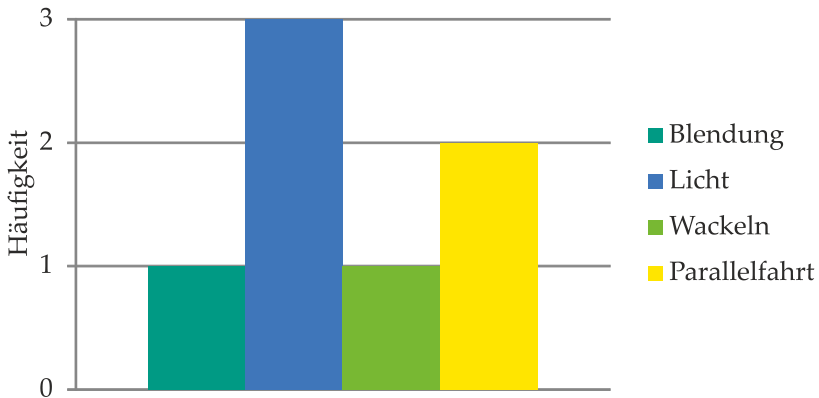


Abbildung 4.33: Verteilung der Antworthäufigkeit nach der Störungsursache bei Frage 2

4. Hat Sie etwas an dem anderen Fahrzeug, also nicht am Fahrverhalten des Fahrers, gestört?

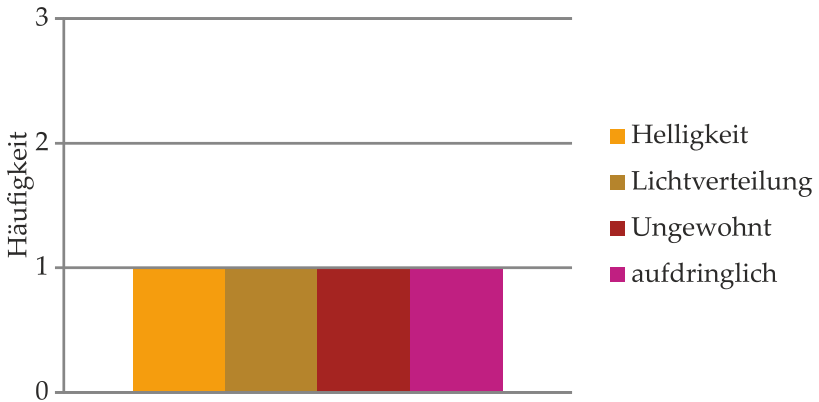


Abbildung 4.34: Verteilung der Antworthäufigkeit nach der Störungsursache bei Frage 4

6. Wurden Sie durch das Licht des anderen Fahrzeuges gestört?

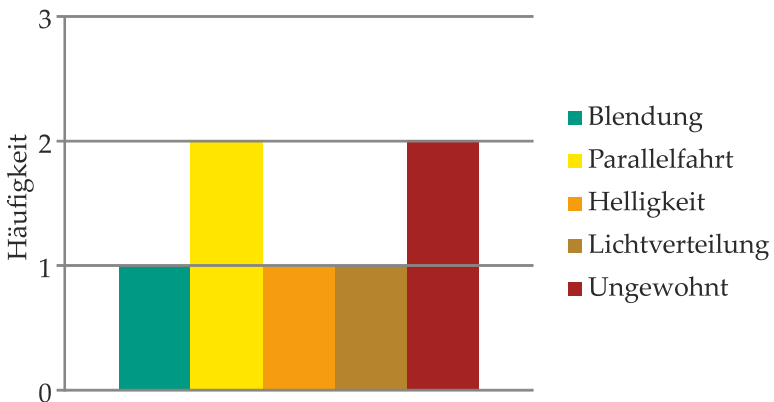


Abbildung 4.35: Verteilung der Antworthäufigkeit nach der Störungsursache bei Frage 6

Einen potenziellen Beitrag zur Verkehrssicherheit durch das Baustellenlicht sahen 15 Probanden, wohingegen nur 8 Probanden dem Baustellenlicht eine potenzielle Gefährdung zusprechen. Die Häufigste Begründung für einen Beitrag zur Verkehrssicherheit war das frühzeitige Erkennen eines Überholenden bzw. die fehlende Gefahr des toten Winkels (7 Mal), gefolgt von der Vermutung, dass man durch das hellere Vorfeld besser sehen kann (5 Mal). Ein Proband erwähnte auch die mögliche Prädiktion der Trajektorie des Überholenden, also z. B. Zeitpunkt und Distanz des Einschervorgangs. Dieser Effekt ist insofern bemerkenswert, als dass die Zahl der Unfälle mit Fahrzeugen, die in gleicher Richtung fahren (also genau die beiden untersuchten Situationen) sich im Jahr 2014 allein außerorts auf 6.913 belief. Durch Hinzunahme der Unfälle innerorts steigt die Zahl auf 18.209 an [STA14]. Einige dieser Unfälle wären durch das frühzeitige Erkennen des anderen Fahrzeuges sicher vermieden worden.

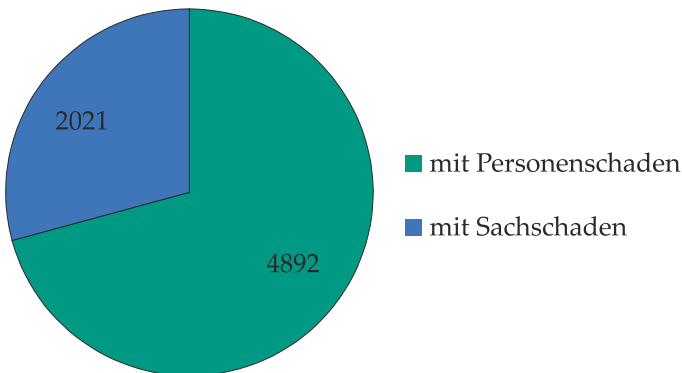


Abbildung 4.36: Zahl der Unfälle außerorts mit einem anderen Fahrzeug, das seitlich in gleicher Richtung fährt, für das Jahr 2014 [STA14].

Als Risiko wurde überwiegend das ungewohnte Erscheinungsbild genannt (vier Mal) sowie die Möglichkeit der Blendung (zwei Mal „es blendet“, einmal „es könnte blenden“). Es kann also davon ausgegangen werden, dass nach einer Gewöhnungsphase 17 der 20 Probanden kein Problem für die Verkehrssicherheit sehen würden.

Alle Antworten finden sich in den Abbildungen 4.37 und 4.38 wieder. Es sei darauf hingewiesen, dass aufgrund der freien Antwortmöglichkeit manche Probanden auch mehr als eine Begründung angaben, weshalb die kumulierte Häufigkeit der Antworten größer ist als die Anzahl der Probanden, die die Frage beantworteten.

7. Denken Sie, dass die Lichtfunktion des anderen Fahrzeuges einen Beitrag zur Verkehrssicherheit liefern kann?

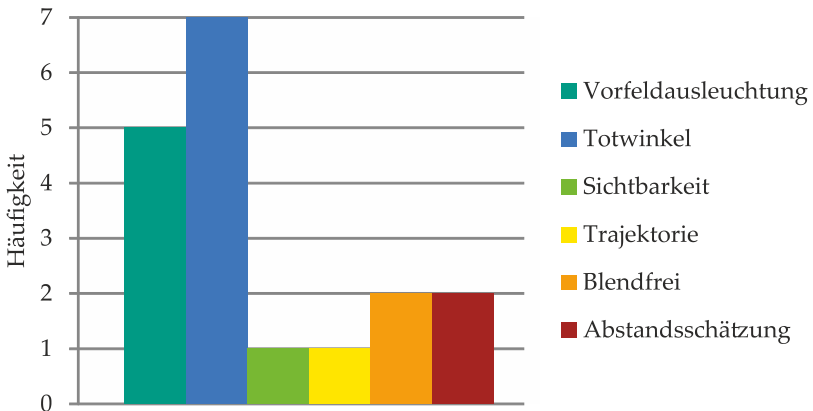


Abbildung 4.37: Verteilung der Antworthäufigkeit eines potenziellen Sicherheitsgewinns

8. Denken Sie, dass die Lichtfunktion des anderen Fahrzeuges die Verkehrssicherheit gefährden könnte?

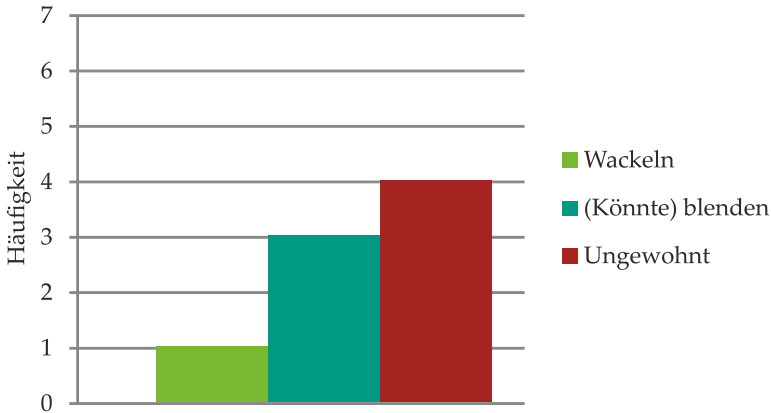


Abbildung 4.38: Verteilung der Antworthäufigkeit eines potenziellen Sicherheitsrisikos

4.2.4 FAZIT

Aus den Eye-Tracking-Daten geht hervor, dass das Baustellenlicht grundsätzlich ein visuell attraktives Muster darstellt. So war der Anteil der Blickzuwendungsdauer auf die linke Fahrspur bei eingeschalteter Lichtfunktion signifikant höher, als wenn diese deaktiviert war. Dies unterstreicht die Relevanz der Evaluation eines Ablenkpotenzials. Dennoch konnten die Blickzuwendungen insgesamt als unkritisch bewertet werden.

Die subjektive Datenerhebung über Fragebögen bestätigte die These. Da die Probanden den Untersuchungsgegenstand an sich bis zum Ende nicht kannten, sind einige scheinbare Kritikpunkte der Proban-

den am Baustellenlicht nicht auf die Funktionalität an sich zurückzuführen.

Weiterhin ist davon auszugehen, dass das System nach Implementierung einer aktiven Regelung gegen Bodenwellen sowie abschwächen der harten Kanten seltener als störend empfunden wird. Dies, sowie ein langfristiger Gewöhnungseffekt, kann aber nur durch weitere Untersuchungen bestätigt werden.

4.3 STUDIE 3: NAVIGATIONSPFEILE

Das vorab beschriebene Baustellenlicht stellt ein Fahrerassistenzsystem dar, da es den Fahrer bei seiner Fahraufgabe unterstützen kann. Klassische, nicht auf der Projektion basierende Fahrerassistenzsysteme wären z. B. ESP oder der Spurhalteassistent. Diese Systeme können auch arbeiten, ohne dem Fahrer ihren Eingriff aktiv mitzuteilen.

Demgegenüber stehen Fahrerinformationssysteme, die den Fahrer mit zusätzlichen, nicht für das Führen des Fahrzeugs notwendigen Informationen versorgen. Dies können Anzeigen des Bordcomputers über gefahrene Strecke, Verbrauch o.ä. sein, aber auch ein Navigationssystem zählt zu den Informationssystemen [WIN15]. Es schlägt dem Fahrer lediglich eine Route vor und informiert ihn rechtzeitig, wann er beispielsweise abbiegen sollte.

Sämtliche Informationen, die im Kombiinstrument oder der Mittelkonsole dargestellt werden können, lassen sich auch mittels hochauflösender Scheinwerfer auf die Straße projizieren. Gerade in Innenstädten,

wo sich zahlreiche Fahrzeuge auf engem Raum befinden, wäre aber die Wahrscheinlichkeit hoch, dass mehrere Informationen gleichzeitig von verschiedenen Fahrzeugen angezeigt werden. Hier stellt sich die Frage, ob die Fahrzeugführer dann noch in der Lage sind zu separieren, welche der Informationen für sie bestimmt sind und welche für jemand anderen und ob dies zu Irritationen oder Ablenkung führen kann.

In Zusammenarbeit mit Geßner [GEß18] wurde der Frage am Beispiel von Navigationspfeilen für den exemplarischen Fall von zwei Fahrzeugen nachgegangen, die beide ihre Richtungsanweisungen mittels Projektion angezeigt bekommen. Die Vorgehensweise sowie Ergebnisse der Studie werden nachfolgend kurz zusammengefasst. Ausführliche Informationen können der entsprechenden Bachelorarbeit entnommen werden.

4.3.1 ZIEL DER STUDIE

Ziel der Untersuchung war es, mithilfe einer Probandenstudie zu analysieren, ob es möglich ist, nur mittels Projektion von Navigationspfeilen eine Person entlang einer vorgegebenen Route zu navigieren, wenn sich noch ein weiteres, mit demselben System ausgestattetes Fahrzeug im direkten Umfeld befindet. Dabei liegt das Augenmerk in der hier vorliegenden Arbeit vor allem auf der Frage, ob die dargestellten Pfeile dem jeweiligen Fahrzeug zugeordnet werden können, oder ob die gleichzeitige Darstellung verschiedener Richtungsangaben für den Fahrzeugführer verwirrend sein kann.

4.3.2 MATERIAL UND METHODEN

4.3.2.1 PROJEKTION DER PFEILE

Da Fahrzeuge mit hochauflösender Projektion zum Zeitpunkt der Untersuchung noch nicht käuflich zu erwerben waren, wurde auf den institutseigenen Forschungsscheinwerfer Propix (vgl. Kapitel 2.3) zurückgegriffen. Dieser musste die Pfeile für beide Fahrzeuge darstellen und somit die Projektionen des zweiten Fahrzeuges emulieren. Dies brachte im Versuchsdesign die Notwendigkeit mit sich, dass die beiden Fahrzeuge nebeneinander und mit gleicher Geschwindigkeit fahren.

Aus technischen Gründen war es nicht möglich, die Pfeile an allen Positionen mit demselben Kontrast darzustellen. Insbesondere der Pfeil, der sich auf der Fahrspur links des Projektionsfahrzeuges befand, hatte einen deutlich niedrigeren Kontrast. Welche Regionen für die Kontrastbestimmung verwendet wurden ist exemplarisch in Abbildung 4.39 zu sehen, die resultierenden Kontraste sind dann in Tabelle 4.10 zusammengefasst. Die vollständigen Leuchtdichteaufnahmen sowie Statistiken können Anhang C.1 entnommen werden.

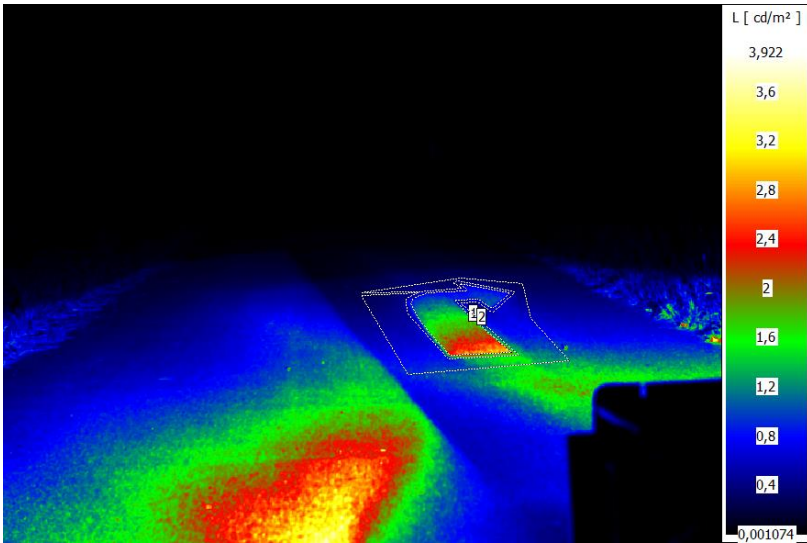


Abbildung 4.39: Leuchtdichteaufnahme des für den Probanden bestimmten Rechtspfeils

Tabelle 4.10: Übersicht über die Leuchtdichte der Navigationspfeile und der daraus resultierenden Weber-Kontraste

Einheit	Region	Min cd/m ²	Max cd/m ²	Mittelwert cd/m ²	Weber-Kontrast
Proband rechts	1	0,5663	3,226	1,5990	1,171
	2	0,2451	1,791	0,7365	
Proband links	1	0,4820	3,567	1,8180	1,305
	2	0,2367	1,997	0,7886	
Dummy rechts	1	0,2905	1,250	0,7509	1,107
	2	0,1487	0,859	0,3564	
Dummy links	1	0,1944	0,642	0,4069	0,2783
	2	0,1227	1,040	0,3183	

4.3.2.2 VERSUCHSAUFBAU

Wie eingangs erwähnt, mussten aus technischen Gründen die beiden Fahrzeuge mit gleicher Geschwindigkeit nebeneinander herfahren. Da eine Richtungsanweisung nur an Kreuzungen sinnvoll ist, musste eine Versuchsstrecke verwendet werden, die zweispurig befahrbar war und über verschiedene Kreuzungssituationen verfügte. Die Wahl fiel erneut auf den Verkehrsübungsplatz der Fahrschulgemeinschaft Pforzheim, der auch für die Studie aus Kapitel 1.1 schon verwendet wurde. Der Platz ist in Abbildung 4.3 zu sehen, zentrales Element für diese Studie war die Kreuzung in der Mitte.

Um die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten aus Rechtsabbiegen, Linksabbiegen und Geradeausfahrt für jedes Fahrzeug auf beiden Spuren zu erreichen, wurde der Startpunkt für jede Situation immer auf diese Kreuzung gelegt. Einige schwer realisierbare Kombinationen (z. B. Probandenfahrzeug mit montiertem Propix-Rack auf der Innenfahrbahn bei spitzem Winkel) sowie die Variante „beide geradeaus“ wurden nicht getestet, womit die in Tabelle 4.11 aufgeführten Situationen A-H verblieben.

UNTERSUCHTE LICHTFUNKTIONEN

Tabelle 4.11: Übersicht über die Kombinationen der untersuchten Funktionen, Tabelle nach Geßner [GEß18]

Situation	Fahrspur		Fahrtrichtung	
	Probanden- fahrzeug	Dummy- fahrzeug	Probandenfahr- zeug	Dummy- fahrzeug
A	links	rechts	links abbiegen	rechts abbiegen
B	links	rechts	links abbiegen	geradeaus
C	links	rechts	rechts abbiegen	rechts abbiegen
D	links	rechts	geradeaus	rechts abbiegen
E	rechts	links	rechts abbiegen	links abbiegen
F	rechts	links	geradeaus	links abbiegen
G	rechts	links	links abbiegen	links abbiegen
H	rechts	links	rechts abbiegen	geradeaus

Abbildung 4.40 ist eine beispielhafte Aufnahme von Situation A zur Verdeutlichung. Die sichtbaren Pfeile sind die von Propix auf die Fahrbahn projizierten Richtungsanweisungen.





Abbildung 4.40: Situation A (Probandenfahrzeug biegt auf der linken Spur nach links ab, Dummyfahrzeug auf der rechten Spur nach rechts), Foto von Geßner [GEß18]

4.3.2.3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Um die in Tabelle 4.11 definierten Situationen durchführen zu können, mussten die beiden Fahrzeuge entsprechend positioniert werden. Dies beinhaltet sowohl die Zuordnung der korrekten Fahrspur (rechts/links), als auch eine Startposition, die den Probanden in keine der im vorigen Kapitel ausgeschlossenen Situationen manövriert. Daher wurden die acht Kreuzungssituationen inkl. Wiederholung, also 16 Durchgänge, randomisiert und basierend auf den jeweiligen Startpositionen die zu fahrende Route so festgelegt, dass der Durchgang auf der Startposition des nächsten Durchgangs beendet wurde. Dies ist exemplarisch für die ersten drei Durchgänge in Abbildung 4.41 dargestellt. Die randomisierte Reihenfolge wurde daher zu Gunsten der Komplexität und der Fehleranfälligkeit im Ablauf für alle Probanden beibehalten und nicht noch innerhalb der Probanden randomisiert.

UNTERSUCHTE LICHTFUNKTIONEN

=Probandenfahrzeug

=Dummyfahrzeug

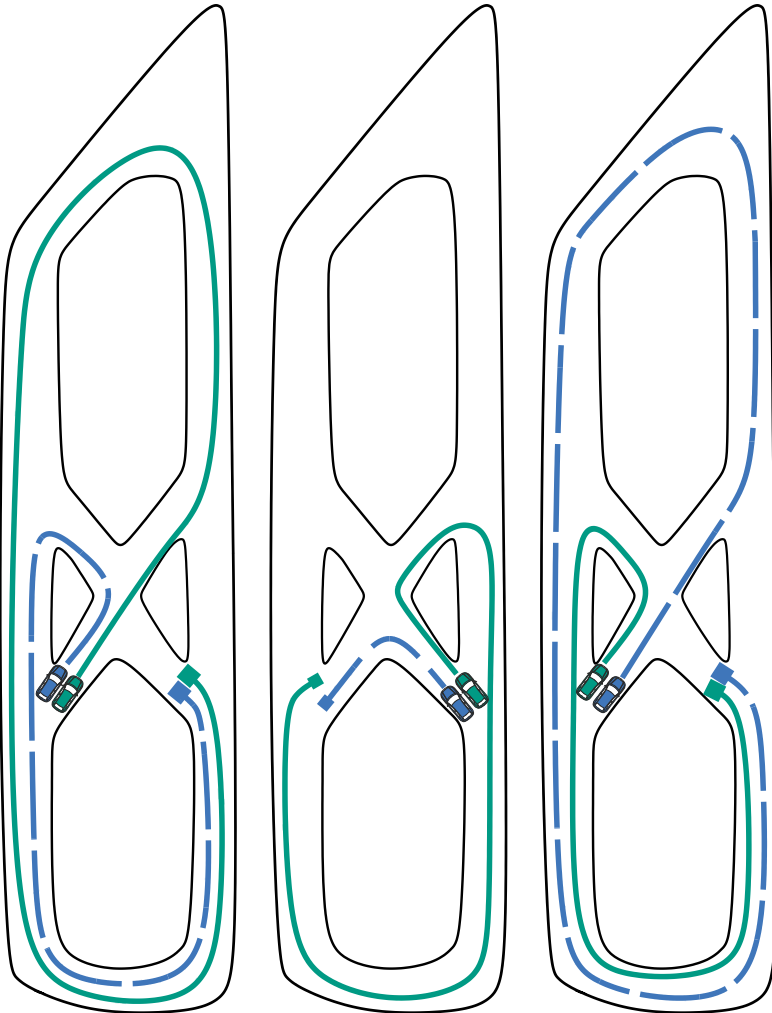


Abbildung 4.41: Route der ersten 3 Durchgänge, das Quadrat markiert den Endpunkt (nach Geßner [GEß18])

Proband und Dummyfahrzeug fuhren immer zeitgleich am Startpunkt los und bekamen jeweils den für sie relevanten Navigationspfeil vor sich auf die Straße projiziert. Nach der Kreuzung notierte der Versuchsleiter, ob der Proband korrekt gefahren war und leitete ihn anhand weiterer Navigationspfeile bis zum nächsten Startpunkt. Dort füllte er je einen kurzen Dokumentationsbogen mit den folgenden Fragen aus, die auf einer fünfstufigen Skala beantwortet werden mussten:

- War die zu fahrende Route durch die Navigation mit Lichtpfeilen für Sie eindeutig?
- Waren die angezeigten Pfeile für die zu fahrende Route irritierend?
- Waren die angezeigten Pfeile für die zu fahrende Route hilfreich?

Die zugehörige Skala lautete

Gar nicht	Wenig	Mittelmäßig	Einigermaßen/ Ziemlich	Sehr
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

wobei „Ziemlich“ aus Gründen der Terminologie für Frage 2 verwendet wurde.

Hat der Proband alle 16 Durchgänge beendet sowie die Dokumentationsbögen beantwortet, erhielt er noch einen Abschlussfragebogen zur subjektiven Bewertung des lichtbasierten Navigationssystems.

4.3.3 ERGEBNISSE

In Abbildung 4.42 sei zunächst eine Übersicht über die richtig und falsch gefahrenen Runden respektive Situationen gegeben. Auffällig ist hier, dass es sich bei den fünf Durchgängen, in denen Fehler auftraten, nur um drei verschiedene Situationen handelt. Weder Situation F noch Situation D wurden von allen Probanden fehlerfrei absolviert. Situation B weist nur einen einzigen Fehler auf.

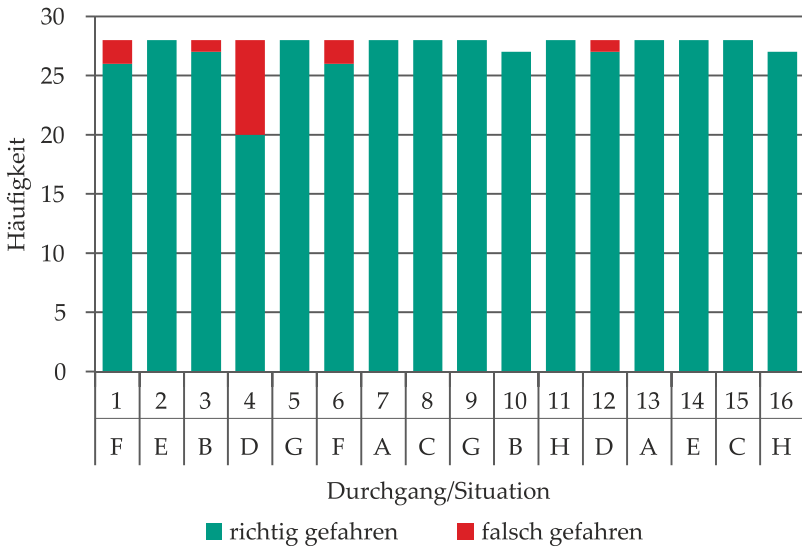


Abbildung 4.42: Übersicht der gefahrenen 16 Durchgänge für korrekt und falsch gefahrene Routen (nach Geßner [GEß18])

Die Situationen mit Fehlern sind alles drei Situationen, in denen eines der beiden Fahrzeuge geradeaus fährt – Situation D und F sind dabei die beiden Varianten, in denen nur das Dummyfahrzeug abbiegen sollte. Es ist also davon auszugehen, dass der Proband dachte, der Pfeil sei für ihn bestimmt. Hier stellt sich nun die Frage, ob die Probanden den Fehler bemerkten oder nicht. Darüber gibt der Dokumentationsbogen, genauer die Frage nach der Irritation des Probanden für die jeweilige Situation, Aufschluss. Abbildung 4.43 zeigt die gegebenen Antworten zur Frage „Waren die angezeigten Pfeile für die zu fahrende Route irritierend?“ Bemerkenswerterweise wurde Situation F besonders oft als „gar nicht“ irritierend eingeschätzt, hier waren die

Probanden sich also sehr sicher, dass der Pfeil wirklich für sie bestimmt war.

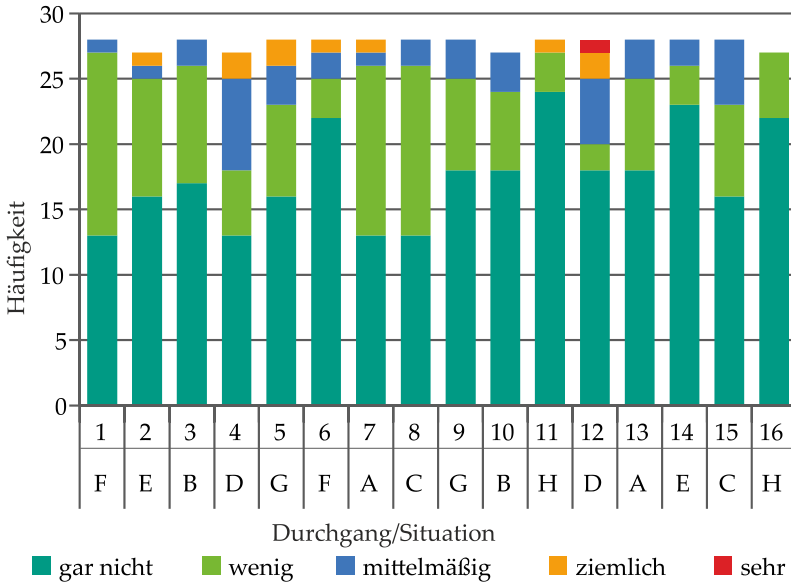


Abbildung 4.43: Kumulierte Antworthäufigkeit auf die Frage, ob die angezeigten Pfeile für die zu fahrende Route irritierend waren (nach Geßner [GEß18])

Eine Betrachtung der Verteilung der gegebenen Antworten nur für die Situationen, in denen falsch gefahren wurde, ergibt das Diagramm aus Abbildung 4.44. Dies deckt sich mit der Vermutung, dass die Probanden ihren Fehler nicht bemerkten.

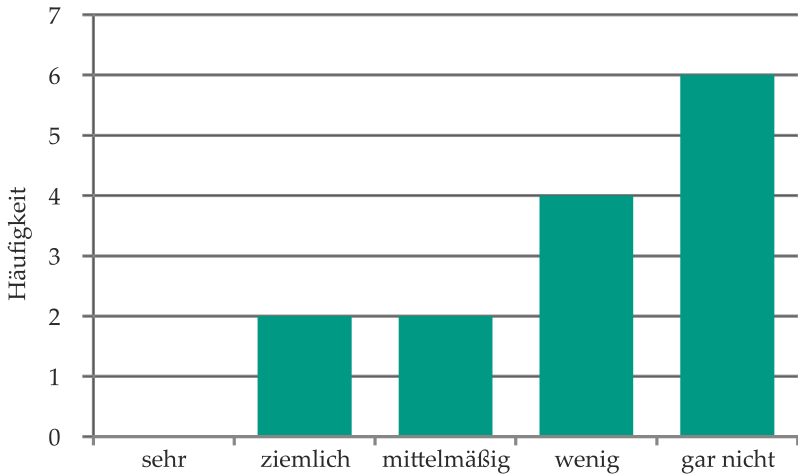


Abbildung 4.44: Häufigkeitsverteilung der Irritation bei den falsch gefahrenen Situationen

Die Interpretation wird auch vom Abschlussfragebogen gestützt. Von den zehn Probanden, die mindestens einmal falsch gefahren sind, schätzen acht ihre korrekte Zuordnung der Pfeile zum jeweiligen Fahrzeug als „oft“ (drei Mal) oder sogar „immer“ (fünf Mal) korrekt ein.

Die von den Probanden gegebenen Antworten können durchaus als valide betrachtet werden, da die mittleren Bewertungen der Irritation je Situation sich invers zu denen aus der Frage, ob die Pfeile hilfreich seien, verhält. Bei willkürlich oder unüberlegt gegebenen Antworten würden sich Fragen und Kontrollfragen unsystematisch zueinander verhalten.

4.3.4 FAZIT

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass selbst der Fahrer des projizierenden Fahrzeuges (bewusst oder unbewusst) durch projizierte Lichtfunktionen irritiert sein kann. Der Effekt dürfte demnach für den Fahrer eines anderen Fahrzeuges mindestens genauso groß, eher noch größer ausfallen. Auch die Tatsache, dass das Probandenfahrzeug technisch nicht in der Lage war, die Pfeile zu projizieren, kann dem nicht entgegengesetzt werden, da es dann genau diesen Fall abgebildet hätte.

Kapitel 5

ENTWICKLUNG EINER BEWERTUNGSFUNKTION

Die beiden im vorigen Kapitel untersuchten Lichtfunktionen zeigen bereits, wie differenziert eine Bewertung erfolgen muss, um eine Empfehlung für oder gegen eine Zulassung im Rahmen der in Kapitel 2.5 erläuterten ECE-Homologation auszusprechen. Insbesondere lässt sich erkennen, dass eine einheitliche Vorgehensweise bei Probandenstudien, also ein allgemeingültiges Versuchsdesign, nicht existiert. Hieraus und aus generellen Überlegungen ergeben sich folgende Probleme und Nachteile bei der Bewertung von Lichtfunktionen mittels Probandenstudien:

- **Objektivität:** Der Versuchsleiter hat bei der Auswertung einen gewissen Einfluss (Ausreißer, Akzeptanzniveaus etc.).
- **Vergleichbarkeit:** Kann aus den Ergebnissen einer Untersuchung auf die Wirksamkeit/Ablenkung einer leicht veränderten Variante geschlossen werden?
- **Zeitaufwand:** Jede Untersuchung dauert mehrere Wochen bis Monate, insbesondere da meistens nur bei Dunkelheit gemessen werden kann.

- **Kosten:** Die Untersuchung jeder einzelnen Lichtfunktion muss bei einem unabhängigen Institut beauftragt werden, was zusätzliche Kosten verursacht.

Diese Mankos zu eliminieren soll daher das Hauptziel der vorliegenden Arbeit werden. Dazu wird eine objektive Bewertungsfunktion entwickelt, die versucht, für beliebige lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme auf Basis von hochauflösender Projektion eine Abschätzung hinsichtlich der Zulassungsfähigkeit zu geben. Als zulassungsfähig sollen dabei Symbole gewertet werden, die kein Risiko für die Verkehrssicherheit, insbesondere aufgrund zu hoher Blickabwendungszeiten anderer Verkehrsteilnehmer, darstellen.

Dazu wird zunächst analysiert, welche Parameter einen Einfluss auf die kritische Blickzuwendungszeit haben. Da sich nicht jeder Parameter im gleichen Maße auswirkt, muss anschließend ein Gewichtungsverhältnis der Parameter zueinander gefunden werden. Unter Berücksichtigung der Art des Einflusses jedes Parameters können diese dann in einer gemeinsamen Bewertungsfunktion zusammengefasst werden. Wird eine Lichtfunktion mittels dieser Bewertungsfunktion analysiert ergibt sich nur ein dimensionsloser Zahlenwert. Anhand dessen lassen sich Lichtfunktionen einfach miteinander vergleichen. Um den Absolutwert interpretieren zu können und über eine Zulassungsfähigkeit zu entscheiden müssen aber noch Bereiche für diesen Zahlenwert definiert werden, innerhalb derer das Ergebnis positiv oder negativ ausfällt oder eventuell in einer noch nicht näher bestimmbar Grauzone liegt.

5.1 KRITERIEN

Entscheidend für die Blickdauer auf ein projiziertes Symbol sind die visuelle Attraktivität sowie die Komplexität des Symbols. Die Attraktivität, auch Salienz des Reizes, beeinflusst maßgeblich, wie lange eine Person ein Objekt betrachten *möchte*. So wird etwas Ungewöhnliches, Interessantes oder etwas, was den persönlichen Vorlieben entspricht tendenziell länger fixiert, als etwas Alltägliches, Uninteressantes oder Langweiliges [ELA08]. Die Komplexität wiederum ist verantwortlich für die Dauer, die eine Person *benötigt*, um das Objekt zu identifizieren und ggf. in einen sinnvollen Kontext zu bringen. Beispielsweise kann ein auf der Spitze stehendes Dreieck sehr schnell und in Form eines Verkehrsschildes an einer Kreuzung von einem Fahrzeugführer auch direkt mit „Vorfahrt gewähren“ identifiziert werden, wohingegen ein selteneres Schild mit vielen Details und Text (z. B. Verkehrshelfer) längere Wahrnehmungsdauern vermuten lässt. Die beiden Verkehrszeichen können in Abbildung 5.1 direkt miteinander verglichen werden.



Abbildung 5.1: Beispiel für Komplexität zweier Symbole, dargestellt in Graustufen, wie dies für einen Projektionsscheinwerfer möglich wäre. Links: Zeichen 205 StVO („Vorfahrt gewähren“). Rechts: Zeichen 356 StVO („Verkehrshelfer“).

Auf Basis dieser Überlegungen werden die ersten beiden Kriterien definiert: **Geometrie** und **Homogenität**. Die dem projizierten Symbol zugrunde liegende Grafik kann bei analytischer Betrachtung durch die beiden Kriterien beschrieben werden (vgl. hierzu Abbildung 5.2). Die Geometrie beschreibt zunächst ein Schwarz-Weiß-Bild, welches von einfachen geometrischen Formen (hier ein Kreis) bis hin zu komplexen Abbildungen (fußballähnliches Objekt) reichen kann. Die Homogenität (eigentlich die Inhomogenität) erweitert das Schwarz-Weiß-Bild zu einem Graustufenbild und kann somit einen plastischen Eindruck erzeugen.

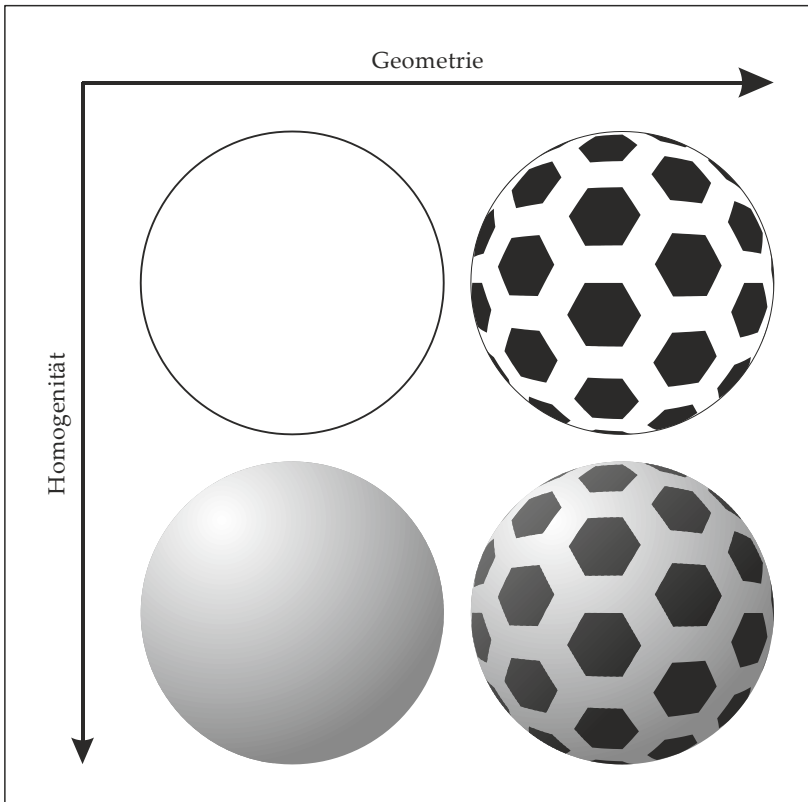


Abbildung 5.2: Beispiel für zunehmende Komplexität bei Änderung der Geometrie, der Homogenität oder beidem gleichzeitig.

Bei diesem Beispiel handelt es sich noch um ein sehr einfaches Objekt zur Verdeutlichung der Terminologien „Geometrie“ und „Homogenität“. In zukünftigen, hochauflösenden Projektionen wäre jedoch die komplexe Darstellung einer Verkehrssituation zur Kommunikation mit dem Fahrer oder anderen Verkehrsteilnehmern denkbar. Dies

könnte durchaus zu langen Blickzuwendungszeiten und somit einer Gefährdung im Straßenverkehr führen.

Ein weiterer Parameter mit hoher Salienz ist die **Dynamik**. Blinkende oder sich bewegende Objekte sind zeitlich und/oder räumlich variierende Signale auf der Netzhaut und lenken evolutionsbedingt die Aufmerksamkeit stärker auf sich, als persistente, statische Objekte. Ursache hierfür ist, dass Gefahren stets aus allen Richtungen kommen konnten und sich meist bewegten [GOL10]. Daher hat unser Auge in der Peripherie auch eine sehr viel schnellere Reizverarbeitung als in der Fovea, was sich im Kontext automobiler Lichttechnik beispielsweise auch im Perlschnureffekt widerspiegelt. Somit fließt in die Bewertung der Lichtfunktion ein, ob diese statisch/persistent ist oder sich bewegt/blinkt. Statisch meint dabei explizit, dass keine Relativbewegung zum projizierenden Fahrzeug stattfindet, die Bewegung durch die Eigengeschwindigkeit spielt hierbei keine Rolle. In diesem Kontext wird auch vom optischen Fluss gesprochen, eine Bewegung stellt eine Relativbewegung zum optischen Fluss dar [GOL10]. Ebenso sollen durch Bodenwellen verursachte Bewegungen nicht in die Bewertung mit einfließen, da diese nicht Teil der Funktionsauslegung sind.

Der vierte Parameter mit direktem Einfluss auf das Ablenkpotenzial ist die Anzahl der **Betrachter**. Sind potenziell mehrere Personen von einer möglichen Ablenkung betroffen, steigert dies das Risiko. Weiterhin ist das Ablenkpotenzial anderer Verkehrsteilnehmer i.d.R. höher als das des Fahrers selber, dem die Funktion bekannt sein sollte.

Als letzter Parameter fließt die **Geschwindigkeit** in die Wertung mit ein. Diese stellt einen Spezialfall dar, da sie keinen unmittelbaren Einfluss auf das Ablenkpotenzial hat. Relevant ist diese jedoch aus sicherheitskritischen Betrachtungen. So muss davon ausgegangen werden, dass eine Blickabwendungsdauer bei höherer Geschwindigkeit aufgrund der in dieser Zeit größeren zurückgelegten Strecke kritischer ist. Weiterhin kann ein Zusammenhang zwischen Aufprallgeschwindigkeit und Unfallschwere nicht von der Hand gewiesen werden. Die Größe des Einflusses wird im nachfolgenden Kapitel ausführlich diskutiert.

5.2 BEWERTUNG

Nachdem im vorigen Kapitel die für die Bewertung relevanten Kriterien benannt und begründet wurden, müssen diese nun operationalisiert werden. Die entscheidende Messgröße für die Ablenkung durch Bodenprojektion eines Symbols stellt die Blickzuwendung dar. Entscheidend sind gleichermaßen die Häufigkeit der Blicke auf das Symbol in Abhängigkeit ihrer Länge als auch die maximale Blickzuwendungsdauer eines einzelnen Blicks (vgl. auch Kapitel 4.2.3). Eine Analyse von Zwahlen ergab die in Abbildung 5.3 dargestellte Abhängigkeit von Blickzuwendungshäufigkeit und –dauer auf die Ablenkung [ZWA88].

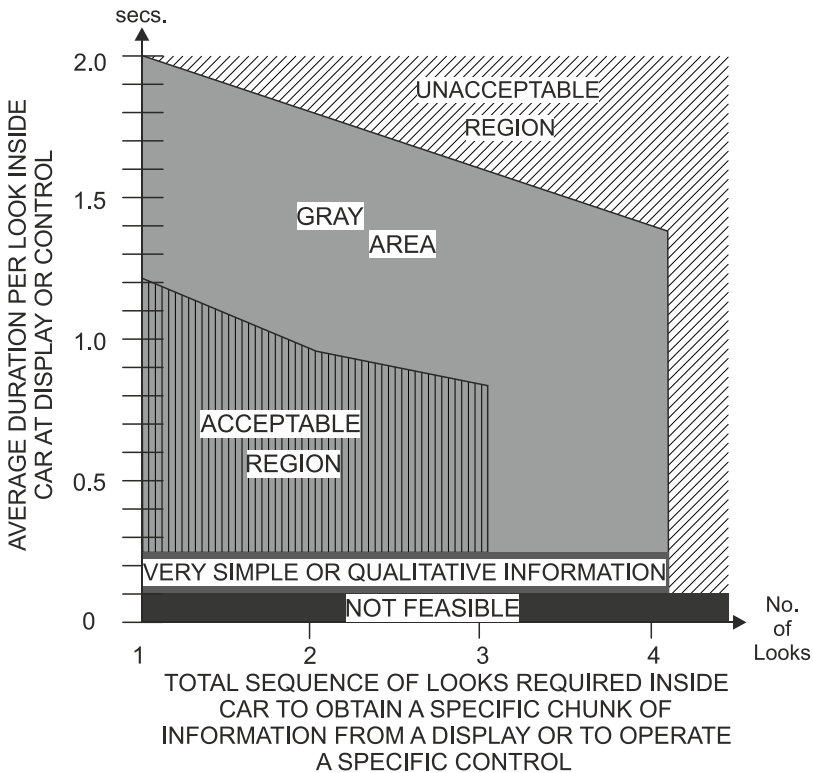


Abbildung 5.3: Einfluss der Anzahl und Dauer von Blickabwendungen auf die Ablenkung [ZWA88]

Folglich muss jeder Parameter hinsichtlich seines potentiellen Einflusses auf die Blickzuwendung betrachtet werden. Ebenso wichtig für die Bewertung ist die allgemeine Verkehrssicherheit, auch dies spiegelt sich in den gewählten Parametern wider. Für die Operationalisierung der Größen finden zwei Varianten Anwendung. Entweder wird das Kriterium mittels einer Skala diskreter Stufen oder einer stetigen Kurve bewertet. Dies erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

5.2.1 GEOMETRIE UND HOMOGENITÄT

Die Kriterien Geometrie und Homogenität sind eng miteinander verzahnt und können über den Terminus **visuelle Komplexität** zusammengefasst werden. Zur Abhängigkeit der Blickzuwendung von der visuellen Komplexität (häufig auch als *Visual Complexity VC* bezeichnet) gibt es zahlreiche Literatur. Einen sehr guten Ansatz zur Operationalisierung dieser sehr abstrakten Größe liefern Forsythe et al. [FOR08]. Sie konnten zeigen, dass sich die VC über die Komprimierbarkeit der Darstellung abbilden lässt. Sie untersuchten dafür vier verschiedene Komprimierungsmethoden, darunter die Bildkomprimierungsverfahren *JPEG* und *GIF*. Beide lieferten hinreichend gute Korrelationen zwischen der VC und der Komprimierbarkeit mit jeweils vier verschiedenen Bildsätzen ($0,39 < r_{Spearman} < 0,75$, vgl. Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman (Spearman's ρ) für die Komprimierungen JPEG und GIF für vier ausgewählte Bildsätze [FOR08]

	Snodgrass and Vanderwart	Cycowicz et al.	Bonin et al.	Rossion and Pourtois Line Drawings	Rossion and Pourtois Gray Drawings
JPEG	$\rho=0,72$	$\rho=0,65$	$\rho=0,41$	$\rho=0,59$	$\rho=0,60$
GIF	$\rho=0,75$	$\rho=0,65$	$\rho=0,39$	$\rho=0,65$	$\rho=0,45$

Für die im Kontext dieser Arbeit zu bewertenden Geometrien sind die genannten Verfahren jedoch nicht gut anwendbar. Im Falle der

Bewertung von Lichtfunktionen kann davon ausgegangen werden, dass die gewählten Projektionen eher geometrischen Formen, maximal Piktogrammen entsprechen werden. Ebenfalls sind (absichtliche) Inhomogenitäten nicht zu erwarten, da dies zu einem geringeren oder höheren Kontrast gegenüber dem Abblendlicht führt, welcher dann nicht mehr optimal wäre (vgl. auch Kapitel 3.2) Während GIF für monochrome Grafiken mit klar definierten Kanten noch gute Kompressionsergebnisse erzielt, ist JPEG ein für die Komprimierung von Fotos entwickelter Algorithmus, der aufgrund seiner Tiefpassfilterung nicht für scharfe Linien etc. geeignet ist [SCH09].

Dennoch soll die Komprimierbarkeit als Maß für die VC Verwendung finden. Hierfür ist zunächst ein Format notwendig, welches für die darzustellenden Symbole geeignet erscheint. Im nächsten Schritt kann dann die Verifikation erfolgen, indem die objektive Bewertung der VC mit der subjektiven Bewertung einer Umfrage korreliert wird.

Als geeignetstes Format kristallisierte sich nach einigen Versuchen SVG (*Scalable Vector Graphics*) heraus. Als Format für Vektorgrafiken profitiert es von den klar definierten Linien und Flächen in Symbolen und Piktogrammen. Um die Anwendbarkeit zu verifizieren, wurden zunächst 18 Symbole unterschiedlicher Komplexität erstellt und als SVG gespeichert (vgl. Tabelle 5.2 und Abbildung 5.4). Dabei wurde darauf geachtet, dass alle Dateien in reinem Schwarz-Weiß (also ohne Graustufen) und Texte „als Text“ (nicht als Kurven) exportiert wurden. Das zugehörige Exportskript für *CorelDraw* kann Anhang D.1 entnommen werden. Diese 18 Symbole wurden dann in einer Umfrage insgesamt 28 Personen präsentiert mit der Bitte, diese hinsichtlich der

VC zu bewerten. Die zu bewertenden Symbole wurden den Teilnehmern zunächst in einer Übersicht gezeigt, bevor sie die Bewertungen abgeben sollten. Somit konnten die Symbole im Vorfeld problemlos miteinander verglichen und gegeneinander bewertet werden. Um den Begriff der visuellen Komplexität verständlicher zu machen, wurden den Teilnehmern nebst einer kurzen Erklärung auch folgende Aspekte als mögliche Bewertungskriterien genannt:

- Wahrnehmungsdauer (benötigte Zeit, um alles wahrzunehmen)
- Umfang der Darstellung (Menge an dargestellten Objekten)
- Detailgrad
- Blickzuwendungsdauer

Der vollständige Einleitungstext der Umfrage kann Anhang B.3 entnommen werden.

Tabelle 5.2: Namen zu den verwendeten Symbolen

ID	Name	ID	Name
1	Pfeil	10	Dreieck
2	Abstandsstreifen	11	Reifendruck
3	OSZ	12	Schneeflocke
4	Chevron	13	Kreis
5	Navigationspfeil	14	Achtung Baustelle
6	Rechteck	15	Verkehrshelfer
7	GRA	16	Fußspuren
8	GRA aktiviert	17	Baustellenlicht
9	ACC Abstandswarnung	18	Stoppschild

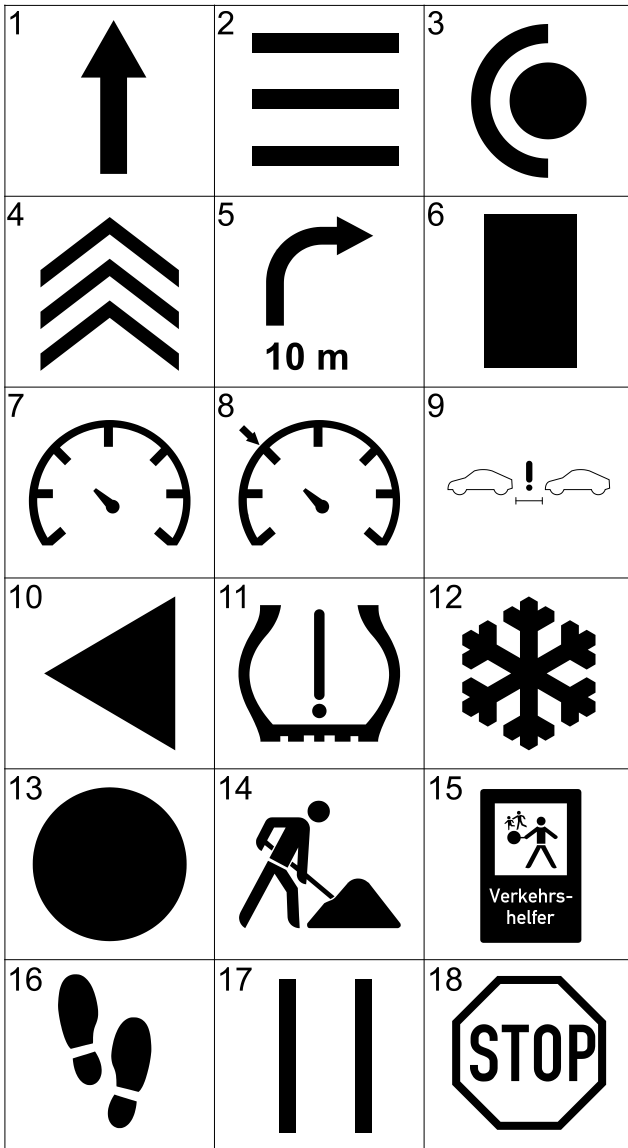


Abbildung 5.4: Übersicht über die verwendeten Symbole

Die VC sollte auf einer Skala von 1 bis 10 bewertet werden, wobei den Teilnehmern ausdrücklich gesagt wurde, dass sie nicht den gesamten Bereich nutzen müssen. So hatten sie beispielsweise die Möglichkeit, die Skala nur von 1...6 zu nutzen, um das bekannte Schulnotensystem anzuwenden. Zur Auswertung wurden die Bewertungen der Teilnehmer dann je Teilnehmer auf den Bereich 1...10 neu skaliert, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Somit ist bei jedem Teilnehmer die für ihn am wenigsten komplexe Darstellung mit 1 bewertet, die komplexeste mit 10.

Die Ergebnisse eines Teilnehmers konnten nicht in die Auswertung einbezogen werden, da dieser (wie in den Kommentarfeldern erklärt wurde) für ihn „bekannte“ Symbole als weniger komplex gewertet hatte. Die Bewertung erfolgte somit nicht mehr allein auf Basis der VC, wie dies gefordert war. Somit verblieb ein Datensatz mit den Bewertungen von 27 Teilnehmern.

Auch diese Daten wurden auf Ausreißer oder sonstige Auffälligkeiten geprüft. Der Vergleich der Bewertungen mittels Liniendiagrammen lies die Vermutung aufkommen, dass ein weiterer Teilnehmer sich in seinen Bewertungen deutlich von den anderen unterschied. Zur Evaluierung dieser Vermutung wurde eine Korrelationstabelle erstellt, bei der die Bewertungen der Probanden mittels Kendalls τ untereinander verglichen wurden. Bei Kendalls τ handelt es sich um eine Rangkorrelation, im Gegensatz zu Bravais-Pearson kann sie also dazu genutzt werden, ordinalskalierte Bewertungen ohne die Bedingung der Äquidistanz zu korrelieren. Eine Alternative wäre noch Spearmans ρ gewesen, jedoch ist dieses weniger robust als Kendalls τ

[CRO10]. Tabelle 5.3 auf der nachfolgenden Seite zeigt die Korrelationsstabelle, dabei steht in der oberen Zeile jeweils der Korrelationskoeffizient τ und in der unteren Zeile die Signifikanz. Probanden, deren Rangordnung der VC ähnlicher sind, haben darin höhere Korrelationskoeffizienten ($\tau_{max} = 1$), bei der Signifikanz gilt wie bei jeder Statistik, dass kleinere Werte eine höhere Signifikanz bedeuten. Als Signifikanzniveau wird im Gegensatz zu den anderen Statistiken dieser Arbeit allerdings nicht 5% angenommen, bei Korrelation ist ein Signifikanzniveau von 1% üblich. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit und einer schnelleren Analyse wurden zunächst die Zellen der errechneten Signifikanz eingefärbt, die nur auf dem 5%-Niveau (gelb) oder gar nicht signifikant (rot) waren. Zur Interpretation ist es egal, ob die Tabelle zeilenweise oder spaltenweise gelesen wird, da diese achsensymmetrisch zur Diagonalen ist.

Es fällt sofort auf, dass der Teilnehmer mit der ID #16 nur mit zwei Teilnehmern auf dem 1% Niveau korreliert. Er ist außerdem der einzige Teilnehmer, der Werte hat, die nicht mindestens auf dem 5% Niveau korrelieren. Daher werden diese Bewertungen ebenfalls als Ausreißer gewertet und fließen in die weitere Statistik nicht mehr mit ein.

Für die verbleibenden 26 Teilnehmer wurde für jedes der 18 Symbole der Mittelwert der skalierten Bewertungen gebildet. Dieser wurde dann mittels Kendalls τ mit der Dateigröße korreliert. Die zu untersuchende Hypothese kann einseitig formuliert werden, da von einer positiven Korrelation zwischen Dateigröße und Komplexitätsbewertung ausgegangen wird.

Mit einem Korrelationskoeffizienten von $\tau = 0,804$ und einer Signifikanz von $p < 0,001$ kann die Korrelation von Dateigröße und bewerteter VC der Teilnehmer als sehr hoch angesehen werden. Sie liegt dabei noch über den Werten von Forsythe et al. [FOR08], obwohl in der vorliegenden Arbeit Kendalls τ verwendet wurde. Spearmans ρ wurde aufgrund der geringeren Robustheit nicht verwendet und hätte den Effekt überschätzt ($\rho=0,942$, $p<0,001$). Damit kann die hier vorliegende Untersuchung aber als mindestens genauso belastbar wie die von Forsythe et al. und der Effekt als groß angesehen werden.

Anhand der aufgenommenen Bewertungen kann nun eine Anpassungskurve berechnet werden, die die visuelle Komplexität in Abhängigkeit der Dateigröße angibt. Dazu muss zunächst ein geeignetes mathematisches Modell gewählt werden, welches den realen Bedingungen entspricht. Auf den ersten Blick scheinen die Punkte sich einem Logarithmus oder einer Wurzelfunktion anzunähern. Es ist allerdings davon auszugehen, dass es im Kontext der Blickzuwendungsdauer auf projizierte Symbole eine maximale Komplexität gibt. Da beide Funktionen monoton steigend sind und somit kein Maximum aufweisen, sind diese nicht als Modell für die

Annäherungskurve geeignet. Stattdessen fiel die Wahl auf ein beschränktes Wachstum der Form

$$G(x) = a - (a - b)e^{-cx} \quad (5.1)$$

mit der Schranke a , dem Anfangsbestand b und der Wachstumskonstanten c . Die Koeffizienten wurden mittels *Matlab* ermittelt (das vollständige Script kann Anhang D.2 entnommen werden) und resultieren für eine Dateigröße g in Gleichung 5.2. Als Algorithmus für die Regression wurde ein non-linear least squares Verfahren gewählt.

$$VC(g) = 8,35 - (8,35 + 19,82)e^{-0,0018 \cdot g} \quad (5.2)$$

Die Anpassungskurve mit den Mittelwerten der Bewertungen ist in Abbildung 5.5 zu sehen. Die Streuung nimmt bei höherer Komplexität respektive Dateigröße zu, jedoch würde eine Kurve durch die jeweils höheren oder jeweils niedrigeren Bewertungen dieselbe Charakteristik aufweisen. Damit kann die Geometrie mit Werten von 1 bis 8,35 in die Bewertungsfunktion eingehen, wobei 1 einer Dateigröße von ca. $g = 746 \text{ Bytes}$ entspräche. Zum Vergleich: Ein Rechteck wies eine Dateigröße von $g = 759 \text{ Bytes}$ auf.

Eine vollständige Tabelle der bewerteten Symbole, ihrer Dateigröße, errechneter VC sowie mittleren Bewertung in der Umfrage befindet sich in Anhang C.3.

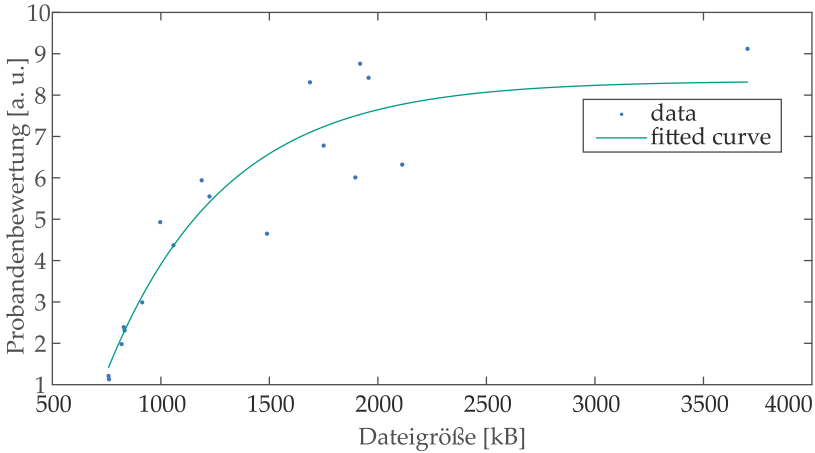


Abbildung 5.5: Anpassungskurve durch die mittleren Bewertungen der visuellen Komplexität

5.2.2 DYNAMIK

Wie bereits erwähnt wurde, führen sich bewegende oder blinkende Objekte evolutionsbedingt zu einer höheren Aufmerksamkeitslenkung (vgl. auch Gerathewohl [GER57]). Allard untersuchte 1876 den Einfluss von blinkenden Signalen auf die empfundene Helligkeit und stellte einen formalen Zusammenhang her [ALL76]. Diese „empfundene Helligkeit“ wurde künftig unter dem Begriff der „effektiven Intensität“ I_e weiter untersucht. Eine viel zitierte Methode stellt die von Blondel und Rey vorgestellte dar [BLO11]. Sie wurde später, da die ursprüngliche Form nur für rechteckige Impulse gültig ist, von Schmidt-Clausen um einen Formfaktor erweitert [SCH71] und in

dieser Form auch gemäß Formel 5.3 in die ECE Regelung 65 [ECE11] übernommen:

$$I_e = \frac{I_m}{1 + \frac{C}{F \cdot T}} \quad (5.3)$$

Darin ist I_m die maximale Lichtstärke, C eine Zeitkonstante (=0,2 s für skotopisches bis mesopisches Sehen), F ein formal zu berechnenden Formfaktor und T die Periodendauer. Alle drei Methoden (Allard, Blondel-Rey und Schmidt-Clausen) sowie Variationen davon wurden von der *International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities* (IALA) auf ihre Eignung als Maß für die effektive Intensität untersucht [IAL08]. IALA kommt zu dem Schluss, dass die Methoden zwar gut geeignet sind, jedoch nur für einmalige, rechteckige oder hochfrequente Pulse. Für periodische Pulse im für die Aufmerksamkeitsgewinnung interessanten Bereich von 1...5 Hz beliebiger Pulsform sind die Modelle nicht geeignet, da sie u. a. den Einfluss der Wiederholung unterschätzen. Um dem Rechnung zu tragen, wird ein modifiziertes Allard-Modell empfohlen. Dieses wurde von der CIE TC2-49 (Commission Internationale de l'Éclairage) in Auftrag gegeben und evaluiert. In Tabelle 5.4 wird ein Überblick über die Eignung der jeweiligen Methoden entsprechend der Anforderungen gegeben.

Tabelle 5.4: Überblick über die Eignung der Methoden zur Bewertung der effektiven Intensität. +: geeignet, o: nur bedingt geeignet, -: nicht geeignet

Methode	beliebige Pulsform	wiederholt/ periodisch	Frequenzbereich 1...5 Hz
Allard	o	o	-
Blondel-Rey	-	-	-
Blondel-Rey- Douglas	o	-	-
Talbot-Plateau	+	+	-
Schmidt- Clausen	o	-	-
modifiziertes Allard	+	+	+

Bei der modifizierten Allard-Methode wird im Wesentlichen das Intensitätsprofil des Impulses mit einer Bewertungsfunktion, die die Trägheit des Auges berücksichtigt, gefaltet. Die effektive Intensität ist dann das Maximum der gefalteten Funktion.

Alle Methoden haben aber gemeinsam, dass die effektive Intensität eines blinkenden Signals stets kleiner ist, als die eines kontinuierlichen Signals. Dies steht im Widerspruch zum Erwartungswert. Allerdings ist zu beachten, dass die Methoden für die Erkennbarkeit von Signalen im Bereich der Empfindlichkeitsschwelle entwickelt wurden. Für überschwellige Signale sind diese Methoden eigentlich nicht geeignet. Bereits 1864 veröffentlichte Brücke eine Schrift, in der er den Einfluss von „intermittierenden Netzhautreizungen“, also z. B. blinkenden Lichtquellen, bei Leuchtdichten oberhalb der Erkennbarkeitsschwelle

untersuchte. Er stellte dabei fest, „...dass sich der Nutzeffect einer gegebenen Lichtmenge erhöhen lässt, indem man sie nicht als continuierlich, sondern als periodisch unterbrochenen Reiz verwendet.“ [BRÜ64] Dies bedeutet, dass eine blinkende Lichtquelle bei Lichtimpulsen und Umgebungsleuchtdichten oberhalb der Erkennbarkeitsschwelle heller wahrgenommen wird, als eine persistente Lichtquelle gleicher Lichtstärke oder Leuchtdichte.

Einen Ansatz zur Operationalisierung dieses Einflusses stellt die Reaktionszeit eines Fahrzeugführers beim Erscheinen eines persistenten Lichtes im Vergleich zu einem blinkenden Licht dar. Entsprechende Untersuchungen wurden beim Einführen des adaptiven Bremslichtes (das Bremslicht blinkt bei einer Vollbremsung schnell) durchgeführt, beispielsweise von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) [BAS02]. Voraussetzung hierfür war die LED-Technik, da Glühlampen zu langsame Ein- und Ausschaltzeiten aufweisen. Zum Untersuchungszeitpunkt 2002 war die LED-Technik allerdings noch nicht weit genug fortgeschritten, um das Bremslicht vollständig damit auszuführen. Nur die hochgesetzte Bremsleuchte wurde mit LEDs realisiert und in der Studie blinkend angesteuert. Dies war jedoch bereits ausreichend, um einen deutlichen Einfluss der Ansteuerung auf die Reaktionszeit der Probanden nachzuweisen. So reduzierte sich die Bremsreaktionszeit von 1,73 s bei konventionellem Bremslicht auf 1,32 s bei blinkender hochgesetzter Bremsleuchte ohne Ablenkung der Probanden, respektive von 2,0 s auf 1,5 s mit Ablenkung. Diese Ergebnisse können jedoch nicht direkt ins Verhältnis gesetzt und als Faktor verwendet werden. Die gemessene Reaktionszeit setzt sich aus

dem physiologischen, die Wahrnehmung betreffenden Teil und einem motorischen Teil, dem Weg des Fußes vom Gaspedal auf die Bremse, zusammen. Daher muss zunächst der motorische Anteil von der Bremsreaktionszeit abgezogen werden. Wie lange dieser ist, wurde in verschiedensten Studien evaluiert und von Green analysiert und zusammengefasst [GRE00]. Die meisten der Studien beziffern die motorische Reaktionszeit mit ca. 0,2 s (vollständige Übersicht in Anhang C.3).

Die Reaktionszeit ohne den motorischen Anteil, also der kognitive Anteil, unterteilt sich laut Klebelsberg weiterhin in die Wahrnehmungs-, Erkennungs- und Entscheidungszeit [KLE82]. Wargo [WAR67] gibt hierfür die in Tabelle 5.5 zusammengefassten Abschätzungen für die verschiedenen Verzögerungsarten an.

Tabelle 5.5: Verzögerungen in der kognitiven Reizverarbeitung nach Wargo [WAR67]

Verzögerungsart	Verzögerung in ms	
	einzelner Stimulus	disjunkter Stimulus
rezeptiv	1 38	1.....38
afferent	2 100	2.....100
zentrale Verarbeitung	70 100	90.....300
efferent	10 20	10.....20
Gesamt	83 258	103.....458

Von der Art des visuellen Reizes definitiv unabhängige Verzögerungen sind die afferente (Reizweiterleitung zum zentralen Nervensystem ZNS) und efferente (vom ZNS ausgehende Reizweiterleitungen) Verzögerung. Deren Anteile können also zusätzlich zum motorischen

Anteil von der gemessenen Reaktionszeit abgezogen werden, um den Einfluss der Dynamik auf diese genauer zu beziffern. Insgesamt sind dies ca. 250 ms. Unter Berücksichtigung dieses von der Reaktionszeit der Probanden abzuziehenden Anteils ergeben sich folgende Werte und Verhältnisse:

Tabelle 5.6: Reaktionszeiten der *BASl*-Studie [BAS02] abzüglich 200 ms motorischer Reaktionszeit [GRE00] und 50 ms afferenter und efferenter Verarbeitung [WAR67] und das daraus resultierende Verhältnis bei blinkendem und persistentem Betrieb

	ohne Ablenkung		mit Ablenkung	
	Reaktionszeit [s]	Verhältnis persistent/ blinkend	Reaktionszeit [s]	Verhältnis persistent/ blinkend
persistent	1,48	1,38	1,75	1,40
blinkend	1,07		1,25	

Die Reaktionszeiten im persistenten Betrieb sind also fast 1,4-Mal so lang, wie im blinkenden Betrieb. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass die Aufmerksamkeitsgewinnung einer blinkenden Lichtfunktion auch 1,4-fach höher gewertet werden könnte.

Die Ergebnisse von Barthel [BAR19] zeigen ähnliche Ergebnisse, jedoch mit einem kleineren Einfluss. Er untersuchte im Rahmen seiner Dissertation eine absichtliche Aufmerksamkeitslenkung mittels einer funktionalen, ambienten Innenraumbeleuchtung. Mittels Änderungen im Lichtszenario in Bereichen, die eine Gefahrenstelle aufweisen, sollten Fahrzeugführer bei manuellem und (teil-)automatisiertem Fahren auf diese aufmerksam gemacht werden. Die von Barthel gemessenen Reaktionszeiten abzüglich der 250 ms betragen im Mittel

ohne Lichtänderung (statisch-persistente Innenraumbeleuchtung) 2032 ms, mit Lauflicht 1812 ms und mit Blinklicht 1690 ms. Das Verhältnis von „keine Lichtänderung“ zu „Lauflicht“ beträgt hier 1,12 respektive 1,20 für „keine Lichtänderung“ zu „Blinklicht“.

Der Frage, ob mittels blinkenden Anzeigen die Aufmerksamkeit bewusst gewonnen werden kann, ist auch Connors für die NASA auf den Grund gegangen [CON75]. In ihrer Untersuchung mussten Probanden so schnell wie möglich auf plötzlich erscheinende Lichtreize reagieren. Genaue photometrische Angaben zum Umfeld werden nicht gemacht, die Studie diente aber der Optimierung von Signalleuchten an Flugzeugen, um Kollisionen beim Sichtflug zu vermeiden. Als Hintergrund dienten Punktlichtquellen variierender Helligkeit, die einen Sternenhimmel simulieren sollten. Daher kann von vergleichbaren Umgebungsleuchtdichten wie im nächtlichen Straßenverkehr außerhalb geschlossener Ortschaften ausgegangen werden. Die Leuchtdichte der an verschiedenen Positionen erscheinenden Signalleuchten werden in drei Intensitätsstufen gemäß Tabelle 5.7 angegeben.

Tabelle 5.7: Übersicht über die in Connors Studie verwendeten Leuchtdichten für die zu erkennenden Lichtsignale [CON75] mit Umrechnung in die SI-basierte Einheit cd/m^2

Bezeichnung	angegebene Leuchtdichte	Umgerechnet in cd/m^2
low	0,01 mL (Milli-Lambert)	0,0318
medium	low+0,5 log units	0,1007
high	low+1,0 log units	0,3183

Dies mag zunächst gering erscheinen, liegt aber immer noch deutlich über der Wahrnehmungsschwelle. Connors selbst beschreibt die niedrigste Intensität als „...just sufficient to be comfortably visible in foveal vision after the 10-min dark-adaptation period...“ [CON75], also als gerade ausreichend, um angenehm sichtbar zu sein. Die höheren Intensitäten sind dementsprechend deutlicher sichtbar. Über eine angenehm sichtbare Helligkeit entscheidet auch der Kontrast, welcher wie in Kapitel 3.2 untersucht wurde nicht zu hoch sein darf. Die Werte aus Tabelle 5.7 lassen darauf schließen, dass der Kontrast für die Probanden nicht unangenehm hoch war.

Untersucht wurden Lichtreize der aufgeführten Intensitäten mit den Frequenzen 1, 2, 3 und 4 Hz sowie persistent leuchtend. Als abhängige Variablen dienten die Erkennungshäufigkeit sowie die Reaktionszeit. Nicht erkannte Signale wurden mit einer Reaktionszeit von 5 s eingetragen. Eine vollständige deskriptive Statistik liegt nicht vor, Connors gibt im Bericht nur die mittlere Reaktionszeit je Modalität und für die Erkennungsrate eine Rangreihenfolge an. Zusätzlich sind die auf dem 5 %-Niveau statistisch signifikanten Unterschiede markiert. Die mittleren, um 250 ms korrigierten Reaktionszeiten sind in Abbildung 5.6 zusammengefasst. Es lässt sich festhalten, dass innerhalb einer Frequenz die Detektionsraten kaum von der Intensität abhängen. Die Erkennungsraten steigen nicht bei jeder Frequenz mit der Intensität, des Weiteren sind die Unterschiede nur im persistenten Fall zwischen allen Intensitäten signifikant. Bei den beiden höheren Frequenzen sind jeweils die beiden benachbarten Detektionsraten nicht signifikant unterschiedlich, bei den beiden niedrigen Frequenzen

sind gar keine Signifikanzen vorhanden. Eine isolierte Betrachtung der drei Intensitäten zeigt, dass die Unterschiede zwischen den blinkenden Signalen statistisch nicht signifikant sind und keine einheitliche Reihenfolge haben. Bei der niedrigen und mittleren Intensität jedoch ist die Detektionsrate bei allen blinkenden Signalen signifikant höher als bei einem persistenten Signal. Die Unterschiede in der Reaktionszeit zwischen persistentem und blinkendem Stimulus waren bei der niedrigen und mittleren Intensität – unabhängig von der Frequenz – signifikant verschieden.

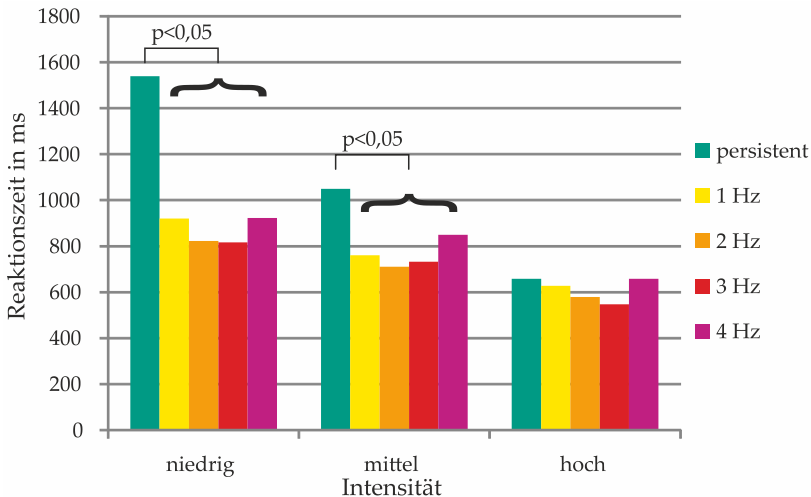


Abbildung 5.6: Um 250 ms korrigierte Reaktionszeiten von Connors [CON75]. Bei niedriger und mittlerer Intensität wurde auf alle Frequenzen statistisch signifikant schneller reagiert, als im persistenten Fall.

Mittlung über alle Frequenzen und Intensitäten ergibt (unter Berücksichtigung der 250 ms) eine mittlere Reaktionszeit von 1082 ms

für persistente Signale respektive 746 ms für blinkende. Dies entspricht einem Verhältnis von 1,45 und deckt sich somit sehr gut mit dem Verhältnis aus den Ergebnissen der Studie der *BASt*.

Insgesamt kann also festgehalten werden, dass temporal dynamische Symbole die Aufmerksamkeitsgewinnung und somit potenzielle Ablenkung mit einem festen Faktor von etwa 1,4 beeinflussen.

5.2.3 BETRACHTER

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Betrachter hinsichtlich einer möglichen Ablenkung alle unabhängig voneinander zu betrachten sind. Projiziert also Fahrzeug 1 ein Symbol auf die Straße, so wird der Fahrer von Fahrzeug 2 hierdurch nicht mehr oder weniger abgelenkt, wenn sich noch ein drittes (ebenfalls nicht projizierendes) Fahrzeug in direkter Umgebung befindet. Es wäre möglich, dass die durch die Projektion induzierte Ablenkung durch Anwesenheit eines anderen Fahrzeuges sogar geringer wird, da der Fahrer diesem Fahrzeug seine Aufmerksamkeit schenkt, jedoch gibt es für diese Hypothese keine Untersuchungen, die sie stützen.

Was jedoch als Maß für die Bewertung herangezogen werden kann, sind wahrscheinlichkeitstheoretische Überlegungen. Wird davon ausgegangen, dass ein Fahrzeugführer durch die Projektion eines Symbols mit einer Wahrscheinlichkeit p abgelenkt wird, dann lenkt das Symbol umgekehrt mit der Wahrscheinlichkeit $1 - p$ nicht ab. Befinden sich nun mehrere Fahrzeuge im zu betrachtenden Umkreis

der Projektion, so ist diese nur dann unkritisch, wenn keiner der betroffenen Verkehrsteilnehmer abgelenkt wird. Für eine Anzahl von n Fahrzeugen berechnet sich die Wahrscheinlichkeit, dass keine Ablenkung auftritt gemäß Formel 5.4 zu

$$P(\text{keine Ablenkung}) = (1 - p)^n \quad (5.4)$$

und somit die Wahrscheinlichkeit, dass mindestens ein Fahrzeugführer doch abgelenkt wird zu

$$P(\text{Ablenkung}) = 1 - (1 - p)^n \quad (5.5)$$

Diese Wahrscheinlichkeit steigt einerseits mit der Anzahl n an Fahrzeugen und andererseits mit der a priori Wahrscheinlichkeit p , dass das Symbol überhaupt ablenkt, an.

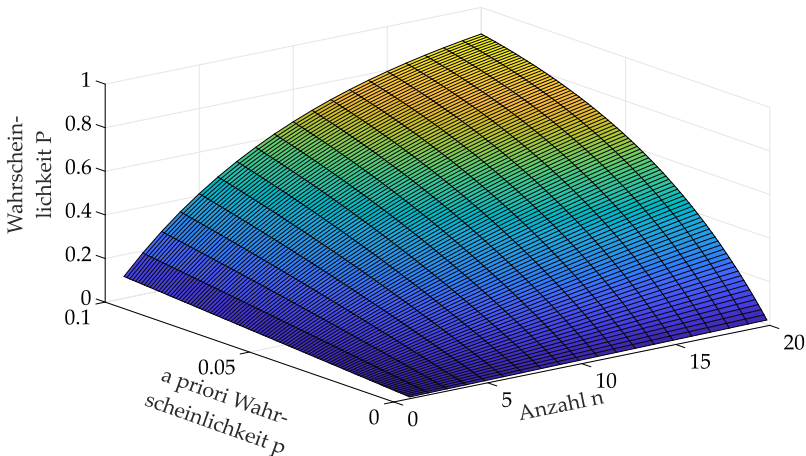


Abbildung 5.7: Visualisierung der Wahrscheinlichkeit P , dass ein Fahrzeugführer abgelenkt wird in Abhängigkeit der Anzahl n beteiligter Fahrzeuge und der a priori Wahrscheinlichkeit p

Da grundsätzlich mindestens ein Fahrzeug, nämlich das projizierende, beteiligt ist, kann dies als Basis angesehen werden. Zur Bewertung der Lichtfunktion ist aber nicht die Ablenkungswahrscheinlichkeit relevant (die ohnehin nicht beziffert werden kann), sondern um wie viel höher das Risiko einer Ablenkung mit steigender Zahl an Teilnehmern ist. Die Ablenkungswahrscheinlichkeit p kann als eher klein angesehen werden. Symbole mit hohem Ablenkpotenzial dürften bereits durch die anderen Kriterien der Bewertung als zu kritisch eingestuft werden. Anstatt der Ablenkungswahrscheinlichkeit P für ein Fahrzeug kann auch das Verhältnis der Wahrscheinlichkeit einer Ablenkung bei n Teilnehmern zur Wahrscheinlichkeit einer Ablenkung bei nur einem Teilnehmer ermittelt werden. Analog zur vorherigen Abbildung wird dies in Abbildung 5.8 visualisiert.

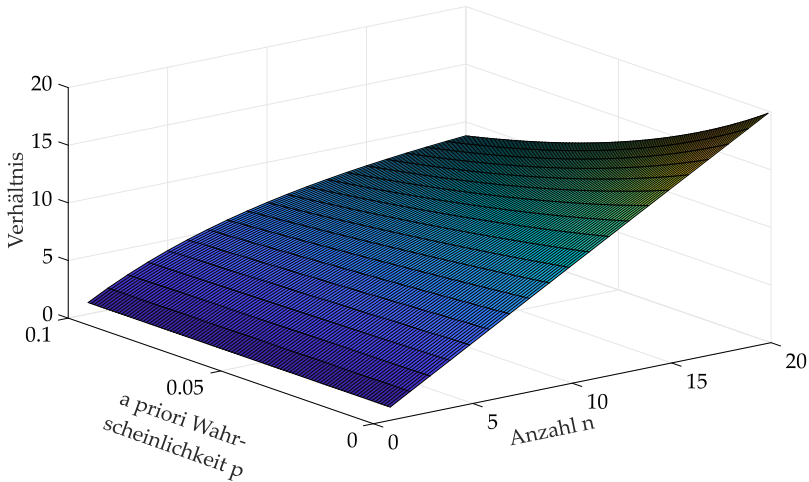


Abbildung 5.8: Verhältnis von $P(\text{Ablenkung} | n \text{ Teilnehmer})$ zu $P(\text{Ablenkung} | \text{ein Teilnehmer})$ in Abhängigkeit der Anzahl n beteiligter Fahrzeuge und der a priori Wahrscheinlichkeit p

Deutlich zu sehen ist hier vor allem, dass gerade bei kleineren a priori Wahrscheinlichkeiten p das Verhältnis nahezu linear mit der Anzahl der Teilnehmer ansteigt. Dabei gilt

$$\lim_{p \rightarrow 0} \frac{n}{\text{Verhältnis}} = 1 \tag{5.6}$$

Bereits bei einer a priori Wahrscheinlichkeit von 5 % liegt die Abweichung der exakten Berechnung zur Abwägung „Verhältnis= n “ unter 5 % bis $n \approx 22$. Somit kann für die Bewertung vereinfacht angenommen werden, dass das Risiko einer Ablenkung bei n im Umfeld befindlichen Fahrzeugen n -Mal so hoch ist.

Da sich im Voraus bei der Definition der Lichtfunktion nicht sagen lässt, wie viele andere Fahrzeugführer die Funktion während ihrer

Aktivierungsdauer sehen werden, müssen hier Abschätzungen getroffen werden. Berücksichtigt wird aber nur die Anzahl der Fahrzeugführer, die die Lichtfunktion gleichzeitig sehen können. Dies fließt so auch in die Berechnung mit ein. Sie berechnet die Wahrscheinlichkeit, dass einer oder beliebig viele der n Teilnehmer abgelenkt werden. Die realistischsten Szenarios dürften dabei sein:

- 1 Teilnehmer: Funktion ist nur für den Fahrer des projizierenden Fahrzeuges (ausreichend lange für eine potenzielle Ablenkung) sichtbar, z. B. auf einer Landstraße.
- 2 Teilnehmer: Fälle, in denen die Projektion gezielt zur Kommunikation mit einem anderen Verkehrsteilnehmer eingesetzt wird, z. B. um einen Einschervorgang anzukündigen.
- 3-4 Teilnehmer: Projektion auf der Autobahn, z. B. Baustellenlicht. Mehr Teilnehmer sind kaum möglich, da das projizierende Fahrzeug die Projektion für den rückwärtigen Verkehr verdeckt

Fälle mit $n > 4$ sind eher nicht zu erwarten. Falls doch, dann ist eine solche Lichtfunktion auf diesen speziellen Fall ausgelegt, auch dann dürfte aber eine realistische Abschätzung des Maximums aufgrund geometrischer Überlegungen oder Simulationen möglich sein.

5.2.4 GESCHWINDIGKEIT

Wie eingangs in Kapitel 5.1 erläutert, stellt die gefahrene Geschwindigkeit eine vom Ablenkpotenzial unabhängige Größe dar, die jedoch hinsichtlich der Zulassungsfähigkeit nicht vernachlässigt werden darf. Aus dem Bereich der Unfallforschung gibt es zahlreiche Statistiken und Modelle, die versuchen, die Unfallschwere mit der Geschwindigkeit zu korrelieren. Als Beispiel sei hier die Analyse von Johannsen [JOH13] genannt. Er zeigt hier anschaulich, dass es nicht bzw. nur mit großer Unsicherheit möglich ist, von der Aufprallgeschwindigkeit auf die Unfallschwere gemäß AIS (Abbreviated Injury Scale) oder MAIS (Maximum AIS) zu schließen. Dies liegt an der breiten Streuung, innerhalb der es sowohl möglich ist, bei 40 km/h bereits die maximale Unfallschwere MAIS 6 zu erreichen, während es ebenfalls möglich ist, bei 75 km/h den Unfall unverletzt zu überstehen (vergleiche hierzu Abbildung 5.9).

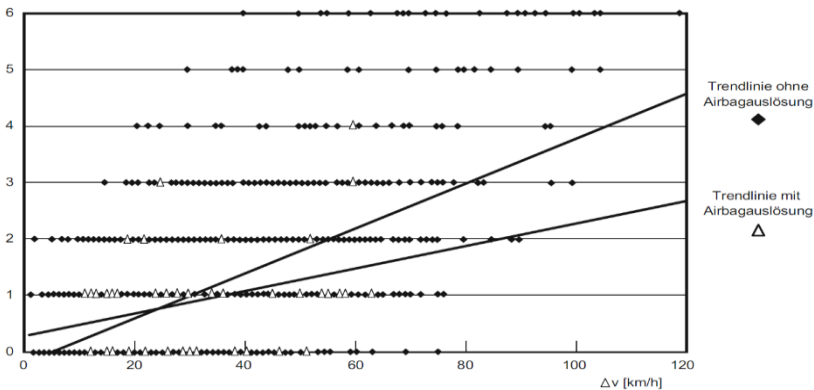


Abbildung 5.9: Verletzungsschwere nach MAIS bei Frontalkollision in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit ([JOH13], zitiert in [OTT98])

Als objektives und vergleichbares Maß für die Bewertung der Lichtfunktionen soll stattdessen der Anhalteweg dienen. Genauer gesagt wird der Quotient aus dem Anhalteweg bei der Geschwindigkeit mit Lichtfunktion zum Anhalteweg bei einer Referenzgeschwindigkeit gebildet. Bei Referenzgeschwindigkeit ergibt sich dann ein Faktor von 1, für höhere Geschwindigkeiten wird er größer und für niedrigere Geschwindigkeiten kleiner. Unter „Geschwindigkeit mit Lichtfunktion“ soll im Folgenden die im jeweiligen Straßenabschnitt gültige zulässige Höchstgeschwindigkeit verwendet werden. Andere Definitionen wie Differenzgeschwindigkeit zu anderen Verkehrsteilnehmern, real gefahrene Momentangeschwindigkeit oder eine Maximalgeschwindigkeit, bei der die Funktion zum Einsatz kommt, wird aus verschiedenen Gründen verworfen:

- Die Differenzgeschwindigkeit zwischen den Fahrzeugen, die die Projektion sehen und somit relevant für die Zulassungsfrage sind, kann als klein angesehen werden. Bei größeren Differenzgeschwindigkeiten ist die mögliche maximale Blickzuwendungszeit so kurz, dass es nicht für eine kritische Dauer ausreicht.
- Übersteigt die Momentangeschwindigkeit die zulässige Höchstgeschwindigkeit, kann dieses erhöhte Risiko nicht Aufgabe der Homologation sein. Unterschreitet der Fahrer die zulässige Höchstgeschwindigkeit, sollte dies nicht zu Gunsten der Lichtfunktion derart ausgelegt werden, dass diese die gewonnene Sicherheit wieder kompensiert.

- Die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist ein für diesen Abschnitt allgemeingültiges Maß für alle Verkehrsteilnehmer. Das projizierende Fahrzeug kann diese mit vergleichsweise geringen technischen Anforderungen (Kamera mit Verkehrszeichenerkennung) überwachen und die Lichtfunktion ggf. (de-)aktivieren.
- Die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist immer >0 , d. h. das Bewertungsmaß ist auch immer >0 . Eine Bewertung von 0 würde es parkenden Fahrzeugen ungeachtet des fließenden Verkehrs erlauben, alles zu projizieren.

Die Wahl der Referenzgeschwindigkeit fällt auf 50 km/h. Dies stellt innerorts die maximale zulässige Höchstgeschwindigkeit dar, mit wenigen Ausnahmen außerhalb von bebautem Gebiet oder bei baulich getrennten Fahrspuren. Die Wahl erfolgt jedoch nicht willkürlich, sondern ist auf §33 StVO „Verkehrsbeeinträchtigungen“ zurückzuführen [StVO]. Dieser Paragraph untersagt in Absatz 1 „außerhalb geschlossener Ortschaften jede Werbung und Propaganda durch Bild, Schrift, Licht oder Ton, wenn dadurch am Verkehr Teilnehmende in einer den Verkehr gefährdenden oder erschwerenden Weise abgelenkt oder belästigt werden können.“ [StVO] Weiterhin gilt laut Absatz 2: „Einrichtungen, die Zeichen oder Verkehrseinrichtungen [...] gleichen, mit ihnen verwechselt werden können oder deren Wirkung beeinträchtigen können, dürfen dort nicht angebracht oder sonst verwendet werden, wo sie sich auf den Verkehr auswirken können.“ [StVO] Unter diesen Paragraphen fällt somit auch die Zulassung von projizierten Symbolen, die insbesondere die Eigenschaften *Ähnlichkeit mit Zeichen*

als auch *Licht* besitzen. Die klare Hervorhebung von Verkehrsbeeinträchtigungen außerorts war somit entscheidend für die Definition der Grenze bei 50 km/h.

Darüber hinaus soll eine weitere Grenze definiert werden. Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs wird für die Bewertung der Lichtfunktion nur bis 130 km/h berücksichtigt. Bei Geschwindigkeiten über 130 km/h, also über der Richtgeschwindigkeit auf Bundesautobahnen und autobahnähnlichen Straßen [BUN78], sehen Gerichte bei Unfällen und Verkehrsgefährdung fast immer in hohem Maße eine Mitschuld des Fahrers [LGK09, OLG13, OLG17]. Somit soll dieser Bereich von der Betrachtung ausgeschlossen werden.

Der Anhalteweg s_A berechnet sich gemäß Formel 5.7 zu

$$s_A = v \cdot t_R + \frac{v^2}{2a} \quad (5.7)$$

mit der gefahrenen Geschwindigkeit v , der Reaktionszeit t_R und der Verzögerung a . Folglich ergibt sich als Quotient des Anhaltewegs bei x km/h zu 50 km/h:

$$\frac{s_{A,x}}{s_{A,50}} = \frac{x^2 + 2a \cdot x \cdot t_R}{(50\text{km/h})^2 + 2a \cdot 50\text{km/h} \cdot t_R} \quad (5.8)$$

Um die Anwendbarkeit der Bewertungsfunktion zu gewährleisten, sind für die Beschleunigung a und die Reaktionszeit t_R realitätsnahe Werte erforderlich. Hierzu werden Werte aus einer Arbeit der Bundesanstalt für Straßenwesen *BASt* herangezogen [POW15]. In dem durchgeführten Versuch wurden Bremsreaktionszeiten von 1,0...1,2 s im ersten Durchgang ermittelt, Tendenz fallend mit den weiteren Durchgängen. Dies spricht für einen stark auftretenden Lerneffekt der

Studie, weshalb nur der erste Durchgang belastbar ist. Weiterhin hat die vorher von der *BASt* durchgeführte Literaturrecherche zum einen gezeigt, dass die mittlere Bremsreaktionszeit bei völlig unerwarteten Ereignissen bei bis zu 2,5 s lag, zum anderen war sie unter Ablenkung (insbesondere visueller Art) im Allgemeinen ca. 0,2...0,3 s höher als ohne Ablenkung. Somit kann in der vorliegenden Arbeit auch unter konservativen Betrachtungen von einer Bremsreaktionszeit von 1,5 s ausgegangen werden.

Auch für die Bremsverzögerung gibt die *BASt* interessante Erkenntnisse. So lag (unabhängig vom Absolutwert) der mittlere maximale Bremsdruck der Probanden bei lediglich 78%. Dies zeigt, dass die meisten Fahrer auch in Gefahrensituationen keine Vollbremsung, sondern nur eine starke Teilbremsung durchführen. Da der Anteil von Bremsassistenten in moderneren Fahrzeugen stetig zunimmt, soll dieser Effekt hier aber vernachlässigt werden.

Burg und Moser [BUR09] listen in ihrer Arbeit die unter optimalen Bedingungen gemessenen maximalen Bremsverzögerungen zahlreicher PKWs auf. Dabei reicht die Spanne von Kleinstwagen bis Luxusklasse und von Sportwagen bis SUV. Mit einigen Ausnahmen liegen die Werte überwiegend im Bereich von 8...10 m/s². Optimale Bedingungen (Reifen in perfektem Zustand, Beton mit maximaler Haftreibung) sind in der Realität allerdings selten anzutreffen. Nicht zuletzt deshalb wird häufig eher von 8 m/s² auf trockener Fahrbahn als von 10 m/s² ausgegangen. Nasse Fahrbahnen sollen in dieser Arbeit keine Berücksichtigung finden, in diesem Fall wären die Projektionen

beim jetzigen Stand der Technik aufgrund der ungünstigen Reflexionsverhältnisse ohnehin nicht gut erkennbar.

Mit den so ermittelten Parametern für Reaktionszeit und Bremsverzögerung ergibt sich aus Formel 5.8 folgender Graph, der den Bewertungsfaktor in Abhängigkeit der Geschwindigkeit darstellt, für die die Funktion maximal zugelassen werden soll. Geschwindigkeiten oberhalb 130 km/h sollen hier aus genannten Gründen nicht berücksichtigt werden, womit die maximale Bewertung der Geschwindigkeit 4,125 beträgt. Die minimale Bewertung liegt im verkehrsberuhigten mit 8 km/h bei 0,111.

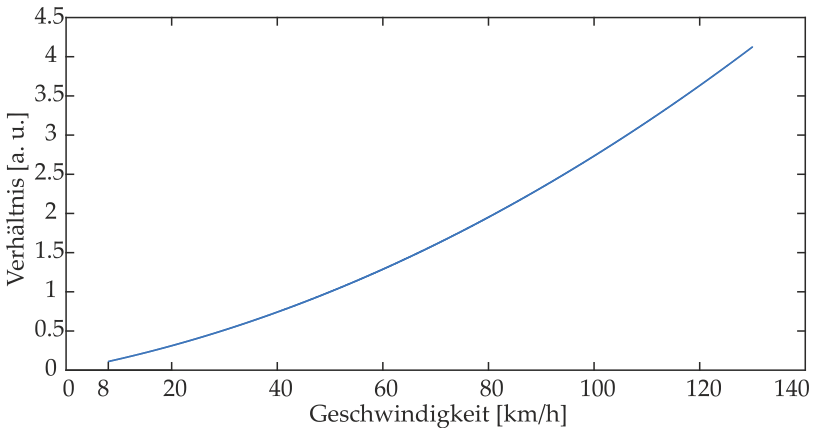


Abbildung 5.10: Anhalteweg bei einer beliebigen Geschwindigkeit im Verhältnis zum Anhalteweg bei 50 km/h als Bewertung der Geschwindigkeit

5.3 DIE BEWERTUNGSFUNKTION

Die Entscheidungsprozesse, welche die Aufmerksamkeitslenkung beeinflussen, werden sehr gut durch das SEEV-Modell [WIC01] beschrieben. Dieses berechnet für jede ROI eine Wahrscheinlichkeit, mit der die Aufmerksamkeit auf ein Event gelenkt wird. SEEV steht dabei für die vier entscheidenden Faktoren:

- *Salienz* (Salience): Kann vereinfacht als Größe des Reizes bezeichnet werden. Sie wird beispielsweise beeinflusst durch Größe, Kontrast oder Blinken aber auch durch die Position im Gesichtsfeld (foveal oder peripher).
- *Aufwand* (Effort): Liegt der neue Reiz beispielsweise weit entfernt vom aktuell fokussierten Reiz, so ist der Aufwand größer, die Aufmerksamkeit darauf zu lenken. Aufwand stellt also einen hemmenden Faktor dar.
- *Erwartung* (Expectancy): Gemeint ist hier, wie wahrscheinlich ein Reiz an dem Ort, an dem er auftritt, auch erwartet wurde. Beim Autofahren beispielsweise ist die Erwartungshaltung bei Aktivierung des Bremslichtes beim Vordermann deutlich höher, als die eines plötzlich zwischen parkenden Autos hervorrollenden Balls.

- *Wert (Value)*: Dies bezieht sich auf den Wert, den die Information für den Beobachter in Abhängigkeit seiner momentanen Aufgabe hat. So hat obiges Beispiel mit dem Bremslicht einen weit höheren Informationswert für den Fahrzeugführer, als eine Meldung im Kombiinstrument über fehlendes Wischwasser beispielsweise hätte. Der Wert wird insbesondere auch dadurch definiert, wie hoch der Preis im Falle eines Verpassers ist, also wenn die wichtige Information nicht wahrgenommen wurde. Bei einem übersehenen Bremslicht wäre dieser besonders hoch (Unfall).

Aus diesen Parametern (Majuskeln) und deren Gewichtung (Minuskeln) berechnet sich die Wahrscheinlichkeit $P(ROI)$ laut Wickens gemäß Formel 5.9

$$P(ROI) = sS - efEF + (exEX) \cdot (v^*V^*) \quad (5.9)$$

Das Sternchen dient hier nur der Variablenunterscheidung, da v bereits für die Geschwindigkeit steht, eine abweichende Nomenklatur aber nicht als sinnvoll erachtet wird. Zum *SEEV*-Modell sei einerseits angemerkt, dass $P(ROI)$ eigentlich nicht die Wahrscheinlichkeit für eine Blickzuwendung berechnet, sondern meist den prozentualen Anteil der Blickzuwendungszeit auf die jeweilige ROI im Verhältnis zur kumulierten Blickzuwendungszeit aller ROIs. Weiterhin wird der Term $(exEX) \cdot (v^*V^*)$ gelegentlich auch in einer additiven Form $(exEX) + (v^*V^*)$ angegeben. Für die im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde Bewertungsfunktion ist dies allerdings nicht von Belang,

da hier nur die Parameter *Saliency* und *Value*² relevant sind, wodurch sich das Modell auf den Term $sS + v^*V^*$ verkürzt. Das Kriterium Dynamik entspricht darin der *Saliency* während *Value* durch die VC der Geometrie wiedergegeben wird. Die Kriterien Geschwindigkeit und Betrachter sind multiplikative Größen, die einem Vorfaktor entsprechen. Ist die Wahrscheinlichkeit einer Ablenkung bedingt durch die Anzahl der Betrachter bei Lichtfunktion a beispielsweise dreifach höher als bei Lichtfunktion b, dann muss auch die Bewertung der Lichtfunktion a entsprechend dreifach höher ausfallen als die von b. Dasselbe gilt für die Geschwindigkeit, die ein Maß für die Kritikalität der potenziellen Ablenkung darstellt. Folglich kann aus dem *SEEV*-Modell für die Bewertung der Lichtfunktionen folgende Bewertungsfunktion 5.10 abgeleitet werden:

$$W = V \cdot B \cdot (dD + vcVC) \quad (5.10)$$

Dabei wurden Großbuchstaben für das Kriterium und Kleinbuchstaben für die zugehörige Gewichtung (sofern zutreffend) gewählt. *V* steht für die Geschwindigkeit, *B* für die Anzahl der Betrachter, *D* für die Dynamik und *VC* für die visuelle Komplexität oder Geometriebewertung.

² Die englischen Bezeichnungen sollen in dieser Arbeit beibehalten werden um Irritationen des deutschen Begriffs „Wert“ mit der Thematik der „Bewertung“ zu vermeiden und eine Konsistenz zur Abkürzung *SEEV* zu bewahren.

5.4 GEWICHTUNG

In den vorigen Abschnitten wurden Kriterien benannt, welche für die Bewertung der Lichtfunktion relevant sind. Für jedes Kriterium wurde auf Basis von physikalischen, physiologischen und stochastischen Überlegungen Bewertungsgrößen entwickelt, die den Einfluss auf die potenzielle Ablenkung quantifizieren. Die gewählten Kriterien beeinflussen das Ablenkungspotenzial jedoch nicht gleichermaßen. Geschwindigkeit und Anzahl der Betrachter sind von dem Ablenkpotenzial unabhängige Größen und bedürfen keiner Gewichtung. Die Dynamik hingegen hat physiologisch betrachtet eine höhere Salienz als die Geometrie. Dies muss in die Bewertungsfunktion mit einfließen, weshalb nachfolgendes Kapitel für diese beiden Kriterien eine Möglichkeit zur Gewichtung aufzeigt. Um diese exakt bestimmen zu können werden hinreichend viele Forschungsdaten benötigt, die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vorliegen. Daher wird die Gewichtung zunächst formell durchgeführt und anschließend auf Basis der momentan vorhandenen Forschungsergebnisse eine erste Taxierung vorgenommen.

Da die Parameter Geschwindigkeit und Betrachter keinen Einfluss auf die Gewichtung haben, reduziert sich die in diesem Zusammenhang zu betrachtende Bewertungsformel auf die beiden Summanden $dD + vcVC$. Bei einer Anzahl von n Gewichtungen kann durch Normierung immer eine Gewichtung auf 1 gesetzt werden und die Zahl der zu findenden Gewichtungen reduziert sich auf $(n - 1)$. Somit reicht in diesem Fall eine einzige Gleichung, um beide Variablen zu

bestimmen. Substanziell dabei ist die Wahl der richtigen Bedingung. Die Gewichtung der beiden Parameter zueinander kann durch Betrachtung zweier unterschiedlicher Lichtfunktionen bestimmt werden, einer statischen und einer dynamischen. Als notwendige Bedingung müssen die Lichtfunktionen gemäß Bewertungsformel 5.10 die gleiche Bewertung bekommen haben, folglich benötigt die statische Funktion eine höhere visuelle Komplexität VC . Hinreichendes Kriterium ist, dass die beiden Funktionen gerade im Bereich der Zulassungsgrenzen liegen. Formell ergibt sich der Zusammenhang

$$dD_{statisch} + vcVC_{statisch} \triangleq dD_{dynamisch} + vcVC_{dynamisch} \quad (5.11)$$

$$(VC_{statisch} - VC_{dynamisch}) \cdot vc \triangleq (1,4 - 1)d \quad (5.12)$$

$$\text{mit } vc = 1$$

$$\begin{aligned} d &= \frac{VC_{statisch} - VC_{dynamisch}}{0,4} \\ &= 2,5 \cdot (VC_{statisch} - VC_{dynamisch}) \end{aligned} \quad (5.13)$$

Um eine erste Abschätzung vorzunehmen, werden als dynamische Lichtfunktion die von Krahnstöver [KRA17] untersuchten „Gräten“ herangezogen. Diese wurden hinsichtlich ihres Potenzials in kooperativen Einfädelsituationen untersucht, als wirksam erachtet und empfohlen. Die subjektive Bewertung der Probanden, denen diese Gräten präsentiert wurden, lies jedoch ein gewisses Ablenkpotenzial erkennen, welches aber noch als vertretbar angesehen wurde. Diese Gräten entsprechen im Erscheinungsbild ungefähr dem in Kapitel 5.2.1 „Chevron“ genannten Symbol Nr. 4 ($VC_{Chevron} = 4,155$).

Forschungsergebnisse, die eine statische Lichtfunktion als gerade noch zulässig klassifiziert haben, sind a dato nicht bekannt. Untersuchungen

an einer projizierten Schneeflocke (Untersuchungsergebnisse noch unveröffentlicht) deuten allerdings darauf hin, dass diese andere Verkehrsteilnehmer in kritischer Weise ablenkt. Eine $VC_{Schneeflocke}$ von 7,42 scheint also bereits deutlich zu hoch.

Um dennoch eine grobe Abschätzung geben zu können, dient ein projiziertes Stoppschild (Symbol Nr. 18) als Referenz. Mit einer VC_{stopp} von 5,03 liegt es im mittleren Bereich und sollte, nach Einschätzung des Autors, statisch projiziert als noch unkritisch gelten. Die Punkt- und Achsensymmetrie des umgebenden Achtecks bietet keinen visuell attraktiven Reiz, das Wort „STOP“ kann sehr schnell wahrgenommen werden und stellt darüber hinaus auch kein weiterhin attraktives Muster dar.

Gemäß Formel 5.13 ergibt sich somit eine vorläufige Gewichtung von

$$d = 2,5 \cdot (5,030 - 4,155) = 2,188 \quad (5.14)$$

Es sei darauf hingewiesen, dass dies nur eine ungefähre Abschätzung ist, soweit es der Stand der Forschung momentan zulässt. Weitere Studien zur korrekten Bestimmung der Gewichtung sind unerlässlich.

5.5 INTERPRETATION DES ERGEBNISSES

In diesem Kapitel wurde eine Bewertungsfunktion entwickelt, die Lichtfunktionen objektiv und analytisch hinsichtlich ihres Ablenkpotenzials auf Verkehrsteilnehmer bewertet. Dazu wurden zunächst Kriterien gesucht, die eine potenzielle Ablenkung hinsichtlich Aufmerksamkeitsgewinnung und Dauer beeinflussen. Weiterhin floss

eine Risikoabschätzung hinsichtlich Wahrscheinlichkeit und Kritikalität in die Bewertung mit ein. Unter Berücksichtigung aller eruierten Größen resultiert dies in Gleichung 5.15:

$$\begin{aligned}
 W = & \frac{x^2 + 2a \cdot x \cdot t_R}{(50 \text{ km/h})^2 + 2a \cdot 50 \text{ km/h} \cdot t_R} \cdot B \\
 & \cdot \left(2,2 \cdot \begin{cases} 1, & \text{persistent} \\ 1,4, & \text{dynamisch} \end{cases} \right. \\
 & \left. + (8,35 - (8,35 + 19,82)e^{-0,0018 \cdot g}) \right) \quad (5.15)
 \end{aligned}$$

Entscheidend für die Qualität der Bewertung ist die Quantifizierung der Kriterien. Während die wahrscheinlichkeitstheoretische Überlegung (Betrachter) mathematisch exakt und valide ist, mussten beim physikalisch motivierten Kriterium (Geschwindigkeit) bereits erste Annahmen getroffen werden. Am schwierigsten zu quantifizieren sind allerdings die physiologisch beeinflussten Parameter. Dazu zählen der Einfluss von Dynamiken im Erscheinungsbild, die Form des Symbols an sich sowie das Gewichtungsverhältnis zwischen diesen beiden Größen. Die exakte Bestimmung erfordert weiterführende Studien, die den jeweiligen Parameter als abhängige Variable im Kontext des nächtlichen Straßenverkehrs untersuchen. Dies war im Rahmen der vorliegenden Arbeit so nicht möglich. Die Entwicklung der Bewertungsfunktion wurde offen dargelegt, sodass neuere Studienergebnisse die verwendeten Approximationen direkt ersetzen können.

Dennoch liefert die Bewertungsfunktion bereits in der vorliegenden Form einen Relativvergleich zwischen beliebigen Lichtfunktionen. Von entscheidender Bedeutung werden daher vor allem weitere Probandenstudien zur Analyse lichtbasierter Fahrerassistenz sein mit dem

Ziel der Homologation. Die in den Studien verwendeten Lichtfunktionen müssen dann gemäß dieser Arbeit bewertet werden um definieren zu können, bis zu welcher Bewertung eine Funktion ohne Bedenken als zulassungsfähig eingestuft werden kann.

Kapitel 6

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit der sich stetig entwickelnden Technik halten immer mehr Assistenzsysteme Einzug im Automobil. Unterstützen diese den Fahrer momentan nur bei seiner Fahraufgabe, so werden sie auf längere Sicht hin mehr und mehr Fahraufgaben selbstständig übernehmen und der Fahrer das Auto nur noch in komplexeren Situationen unterstützen. Dieser Trend zeichnet sich auch bei Scheinwerfern ab. Mittels lichtbasierter Fahrerassistenz kann dem Fahrzeugführer beispielsweise die Breite seines Fahrzeuges auf der Fahrbahn angezeigt und er so in Engstellen unterstützt werden. Die Kommunikation im Mischverkehr, beispielsweise zwischen dem Fahrer eines konventionellen und eines hochautomatisierten Fahrzeugs, könnte ebenfalls über die Projektion von Symbolen auf die Fahrbahn übernommen werden. Dabei muss jedoch stets der Sicherheitsaspekt im Fokus stehen, weshalb andere Verkehrsteilnehmer nicht durch die Projektionen in einem kritischen Maße abgelenkt werden dürfen.

Stand heute gibt es jedoch kein objektives Bewertungskriterium, wie sich eine Symbolprojektion auf die Ablenkung auswirkt. Daher war das Ziel dieser Arbeit, anhand physiologischer, psychologischer und

physikalischer Kriterien eine Bewertungsfunktion zu entwickeln, die lichtbasierte Fahrerassistenz hinsichtlich der Homologation evaluiert.

Dazu wurde zunächst anhand von Probandenstudien die Notwendigkeit einer solchen Evaluation aufgezeigt. Die erste Untersuchung sollte zeigen, dass lichtbasierte Fahrerassistenz dem Fahrzeugführer helfen kann. Untersuchungsgegenstand war dafür das Baustellenlicht in einer Ausprägung mit 2 Streifen, die abhängig vom Lenkwinkeleinschlag dynamisch mitlenkten. Als abhängige Variablen wurde das HFC-Signal (die Hochfrequenzkomponente des Lenkwinkels, die ein Maß für die Unsicherheit darstellt) und die gefahrene Durchschnittsgeschwindigkeit in einer baustellenähnlichen Situation aufgenommen. Die Messergebnisse zeigten dabei keine Stabilisierung der Lenkbewegung oder eine signifikante Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit. Die Erhebung der subjektiven Daten ergab allerdings ein positives Feedback der Probanden und ließ vermuten, dass die Lichtfunktion grundsätzlich nach leichter Überarbeitung unterstützend sein dürfte.

Hinsichtlich des Ablenkpotenzials wurde eine weitere Probandenstudie durchgeführt, in der die Blickzuwendungsdauern mittels Eye-Tracking-System aufgezeichnet und ausgewertet wurden. Im Gegensatz zur Wirkpotenzialanalyse wurde das Baustellenlicht hier in Form eines Lichtteppichs untersucht. Nach Auswertung und Beurteilung der aufgezeichneten Daten konnte kein Ablenkpotenzial erkannt werden. Lediglich zwei der 3612 ausgewerteten Fixationen waren potenziell zu lange.

Die dritte Probandenstudie konnte zeigen, dass eine Projektion von Lichtfunktionen durchaus für Irritation beim Fahrer sorgen kann oder deren korrekte Interpretation nicht immer möglich ist.

Um lichtbasierte Fahrerassistenz objektiv bewerten zu können, wurden zunächst die Kriterien *Geometrie*, *Dynamik*, *Betrachter* und *Geschwindigkeit* definiert und anschließend operationalisiert. Um die Geometrie bewerten zu können, wird die visuelle Komplexität VC bestimmt, indem die Lichtfunktion in eine Vektorgrafik im SVG-Format überführt und anschließend deren Dateigröße bestimmt wird. Einsetzen dieser Dateigröße in Gleichung 5.2 liefert eine Bewertung der VC zwischen 1 und 8,35.

Der Dynamik wird mittels eines konstanten Faktors von 1,4 Rechnung getragen, welcher sich aus dem Vergleich der Reaktionszeiten auf persistente und blinkende Lichtreize ohne Berücksichtigung der fixen Anteile der Reaktionszeit (Motorik, Afferenz, Efferenz) ergab.

Wahrscheinlichkeitstheoretische Überlegungen bestimmen die Risikoerhöhung durch eine größere Anzahl an potenziell abgelenkten Verkehrsteilnehmern. In Anbetracht der vergleichsweise geringen Wahrscheinlichkeit einer kritisch langen Blickzuwendung nähert sich der exakt berechnete Faktor der Anzahl der Betrachter an, sodass diese 1:1 in die Bewertung übernommen wird.

Als letzte Bewertungsgröße fließt die Geschwindigkeit aufgrund ihres unmittelbaren Einflusses auf den Anhalteweg im Falle einer Gefahrensituation mit ein. Dabei setzt die Bewertung die zu fahrende Geschwindigkeit in Bezug zur Referenzgeschwindigkeit von 50 km/h,

welche die allgemein zulässige Höchstgeschwindigkeit innerorts in Deutschland darstellt. Dies ist insofern relevant, als dass der Gesetzgeber die Darstellung von beispielsweise Werbung außerorts massiv einschränkt. Als obere Grenze werden 130 km/h angesehen, ab dieser Geschwindigkeit obliegt die Verantwortung nahezu vollständig beim Fahrzeugführer.

Die gefundenen Kriterien wirken sich in Art und Stärke unterschiedlich auf die Bewertung einer Lichtfunktion aus. Geschwindigkeit und Betrachter sind multiplikative Größen, welche bewerten, um wie viel höher das Gefahrenpotenzial ist. Diese haben daher auch keine Gewichtung. Die eigentliche Lichtfunktion wird ähnlich dem SEEV-Modell durch die Dynamik (Saliency) und die Visuelle Komplexität (Value) bewertet, welche additiv behandelt werden. Da nur das Verhältnis dieser beiden Kriterien relevant ist, ist die Gewichtung eines der beiden Kriterien ausreichend. Als erste Abschätzung dienen Untersuchungen von Krahnstöver [KRA17], aus welchen sich eine Gewichtung von $d = 2,188$ für die Dynamik ableiten ließ.

Tabelle 6.1 gibt nochmal einen Überblick über die hergeleitete Bewertungsfunktion 5.10 mit den relevanten Parametern. Dabei soll x die gewünschte Geschwindigkeit sein und g die Dateigröße im SVG-Format gemäß Exportskript aus dem Anhang. Weiterhin gilt als Annahme für die Bremsverzögerung $a = 8 \text{ m/s}^2$ und für die Bremsreaktionszeit $t_R = 1,5 \text{ s}$.

Tabelle 6.1: Übersichtstabelle mit der Bewertungsfunktion und den einzusetzenden Parametern

$W = V \cdot B \cdot (dD + VC)$	mit	(5.10)
$V = \frac{x^2 + 2a \cdot x \cdot t_R}{(50\text{km/h})^2 + 2a \cdot 50\text{km/h} \cdot t_R}$		(5.8)
$B = \text{Anzahl Betrachter}$		
$d = 2,188$		
$D = \begin{cases} 1 \text{ falls statisch} \\ 1,4 \text{ falls dynamisch} \end{cases}$		
$VC(g) = 8,35 - (8,35 + 19,82)e^{-0,0018 \cdot g}$		(5.2)

Die vorliegende Arbeit hatte dabei vor allem das Ziel, die methodische Herleitung der Bewertungsformel aufzuzeigen. Die gefundenen Zahlenwerte für die Parameter basieren jedoch noch auf einer wagen Datenbasis, welche in näherer Zukunft unbedingt in weiteren, ausführlichen Untersuchungen präziser evaluiert werden müssen.

Weiterhin besteht die Notwendigkeit, einen Schwellwert für W zu eruieren, unterhalb dem eine Lichtfunktion die Homologation erhalten bzw. oberhalb dessen sie keine Homologation erhalten sollte. Aufgrund der nicht beliebig scharf abgrenzbaren Einflüsse auf die Physiologie ist jedoch eher davon auszugehen, dass sich hier anstatt einer exakten Schwelle eher Wertebereiche ergeben werden, wobei der mittlere möglicherweise auch zukünftig mittels Probandenstudien hinsichtlich seiner Homologationsfähigkeit analysiert werden muss. Der untere respektive obere Bereich hingegen kann direkt eine Zulassung befürworten oder ablehnen.

Ein abschließender Aspekt, der in dieser Arbeit noch keine Berücksichtigung fand, ist der eintretende Gewöhnungseffekt. Da Scheinwerfer mit Projektionsmodulen derzeit höchstens aus Presse oder Film bekannt sind, jedoch noch keine zugelassenen projizierten Lichtfunktionen auf der Straße zu sehen sind, haben diese momentan noch ein deutlich höheres Ablenkpotezial. Bei Zulassung erster Funktionen und der in der Automobilindustrie üblicherweise ansteigenden Marktdurchdringung neuer Technologien ist aber davon auszugehen, dass die Verkehrsteilnehmer sich im Laufe der Zeit an Projektionen gewöhnen. Dies könnte mittels eines weiteren Parameters berücksichtigt werden, der beispielsweise die vergangene Zeit seit der ersten Zulassung oder die Anzahl der bis dahin insgesamt zugelassenen, hochauflösenden Lichtfunktionen einkalkuliert. Eventuell wirkt ein solcher Faktor sich auch eher auf die Gewichtung aus, da die Dynamik als aufmerksamkeitsgewinnendes Element an Bedeutung verliert während die VC unabhängig von Gewöhnung die Verweildauer des Auges auf dem Symbol bestimmt.

Insgesamt konnte eine Bewertungsfunktion gefunden werden, die eine schnelle, kostenlose und vor allem objektive Möglichkeit bietet, die gerade anfangs zu erwartende hohe Zahl an lichtbasierten, hochauflösenden Fahrerassistenzsystemen hinsichtlich ihrer Homologationsfähigkeit zu evaluieren.

III LITERATUR

- [ALL76] É. Allard, *Mémoire sur l'intensité et la portée des phares: Comprenant la description de quelques appareils nouveaux, ainsi que des études sur la transparence des flammes, la vision des feux scintillants et la transparence nocturne de l'atmosphère*, Imprimerie nationale, Paris, 1876.
- [AMS10] C. Amsel, G. Florissen, S. Pietzonka, *Die nächste Generation lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme*, in: *ATZ*, 2010, 112 (10), 758.
- [AUD13] AUDI AG, *Audi A8 erstrahlt in neuem Licht: Innovative Lichttechnologie im neuen Audi A8* (2013), www.audi.de/de_vdt_content_entry/brand/de/vorsprung_durch_technik/content/2013/08/Audi-A8-erstrahlt-in-neuem-Licht.html, zuletzt geprüft am 07.10.2015.
- [AUD15] AUDI AG, *Lichtsysteme der Zukunft* (2015), www.audi.de/content/dam/vorsprung_durch_technik/Video/2015/03/Audi%20lighting%20technology/W2015052_Matrix_Laser_Animation_de_prev.mp4, zuletzt geprüft am 20.05.2016.
- [BAR19] M. Barthel, *Aufmerksamkeitslenkung mithilfe ambienter Innenraumbeleuchtung im Automobil: (noch unveröffentlicht)*. Dissertation Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 19.07.2019.

- [BAS02] Bundesanstalt für Straßenwesen, *Optimierung des rückwärtigen Signalbildes zur Reduzierung von Auffahrunfällen bei Gefahrenbremsung*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen F, Fahrzeugtechnik, H. 39, Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss, Bremerhaven, 2002.
- [BEN14] BenQ, *Datenblatt Projektor SP840* (2014), www.benq.de/product/projector/SP840/specifications, zuletzt geprüft am 01.08.2014.
- [BLO11] A. Blondel, J. Rey, *Sur la perception des lumières brèves à la limite de leur portée*, in: *J. Phys. Theor. Appl.*, 1911, 1 (1), 530.
- [BMB16] BMBF, *KOLA: Kooperativer Laserscheinwerfer* (2016), www.technik-zum-menschen-bringen.de/projekte/kola.
- [BMW15] BMW Group, *BMW M4 Concept Iconic Lights - die helle Freude am Fahren*. (2015), www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0198805DE/bmw-m4-concept-iconic-lights-die-helle-freude-am-fahren?language=de, zuletzt geprüft am 23.01.2018.
- [BOR99] J. Bortz, *Statistik für Sozialwissenschaftler*, 5th ed., Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin, 1999.
- [BOX54] G. E. P. Box, *Some Theorems on Quadratic Forms Applied in the Study of Analysis of Variance Problems*, in: *Ann. Math. Statist.*, 1954, 25 (2), 290.
- [BRÜ64] E. W. Ritter von Brücke. *Über den Nutzeffect intermittierender Netzhautreizungen*, in *Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Aka-*

- demie der Wissenschaften*, Vol. 49, 49 (Eds: Kaiserliche Akademie der Wissenschaften). Wien, 1864.
- [BUD19] M. Budanow, C. Neumann, *Road projections as a new and intuitively understandable human-machine interface*, in: *Advanced Optical Technologies*, 2019, 8 (1), 77.
- [BUN78] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz, *Verordnung über eine allgemeine Richtgeschwindigkeit auf Autobahnen und ähnlichen Straßen: Autobahn-Richtgeschwindigkeits-V*, 1978.
- [BUR09] H. Burg, *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ / MTZ-Fachbuch, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2009.
- [CON75] M. M. Connors, *Conspicuity of Target Lights: The Influence of Flash Rate and Brightness*, Washington, D.C. (01.09.1975), ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19750023659, zuletzt geprüft am 01.08.2019.
- [COU15] M. Courcier, B. Reiss, V. Sanchez. New Front lighting Possibilities through High Definition Digital Lighting, in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstädter Lichttechnik, Vol. 16 (Eds: T. Q. Khanh), Herbert Utz Verlag. München, 2015.
- [CRI17] I. Cristea, *Kontrastbestimmung neuartiger Lichtfunktionen*. MasterarbeitKarlsruher Institut für Technologie (KIT), 13.07.2017.
- [CRO10] C. Croux, C. Dehon, *Influence functions of the Spearman and Kendall correlation measures*, in: *Statistical Methods & Applications*, 2010, 19 (4), 497.

- [DÖR16] *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*, 5th ed., Springer-Lehrbuch (Eds: N. Döring, J. Bortz), Springer, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [DUH17] D. Duhme, B. Fischer. Next Generation LCD Module, in *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstädter Lichttechnik, Vol. 17 (Eds: T. Q. Khanh), Herbert Utz Verlag. München, 2017.
- [DVR14] Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V. (DVR), *Fahrerassistenzsysteme: Autofahrer sind wenig informiert*, Bonn (Urteil vom 2014), www.dvr.de/programme/kampagnen/aktion-schulterblick/abc-der-mobilitaet/technik.html.
- [ECE11] UNECE, *Regulation No. 65 Rev. 2: ECE R 65*, 07.12.2011.
- [ECE13a] UNECE, *Regulation No. 112 Rev. 3: ECE R 112*, 09.01.2013.
- [ECE13b] UNECE, *Regulation No. 123 Revision 2: ECE R123*, 21.10.2013.
- [ELA08] L. Elazary, L. Itti, *Interesting objects are visually salient*, in: *Journal of vision*, 2008, 8 (3), 3.1-15.
- [EUR07] Europäische Union, *Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge: Richtlinie 2007/46/EG*, Vol. 09.10.2007, 05.09.2007.
- [FOR08] A. Forsythe, G. Mulhern, M. Sawey, *Confounds in pictorial sets*, in: *Behav Res*, 2008, 40 (1), 116.

- [FOR93] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, *Richtlinien für die Markierung von Straßen - Teil 1: Abmessung und geometrische Anordnung von Markierungszeichen: RMS-1*, 1993.
- [GER57] S. J. Gerathewohl, *Conspicuity of Flashing Light Signals*, in: *J. Opt. Soc. Am.*, 1957, 47 (1), 27.
- [GEß18] T. Geßner, *Evaluation eines Navigationssystems auf Basis von Bodenprojektion*. Bachelorarbeit Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), 02.07.2018.
- [GOL10] E. B. Goldstein, *Sensation and perception*, 8th ed., Wadsworth Cengage Learning, Belmont, Calif., 2010.
- [GOO] Google LLC, *Google Maps*, Mountain View, California www.google.de/maps, zuletzt geprüft am 04.12.2018.
- [GRE00] M. Green, "How Long Does It Take to Stop?", in: *Transportation Human Factors*, 2000, 2 (3), 195.
- [GUT15] C. Gut et al., *Das ideale Licht: Mikromechanischer Matrix Laser Scheinwerfer*, Elektronik im Fahrzeug (ELIV), Baden-Baden, 14.10.2015.
- [GUT17] C. Gut, M. Fiege, B. Böke. DIGITAL LIGHT – Experiences with the development of high resolution headlights at Daimler, in *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstädter Lichttechnik, Vol. 17 (Eds: T. Q. Khanh), Herbert Utz Verlag. München, 2017.
- [HAR09] J. Hartung, B. Elpelt, K.-H. Klösener, *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik ; [mit zahlreichen*

- durchgerechneten Beispielen*], 15th ed., Oldenbourg, München, 2009.
- [HEL16] Hella KG Hueck & Co., *MULTIBEAM LED Scheinwerfer von HELLA – eine ausgezeichnete Klasse für sich*, Lippstadt, 30.03.2016.
- [HEL17a] Hella KG Hueck & Co., *Hella Liquid Crystal HD: The Art of Light* (27.06.2017), www.hella.com/hella-com/de/Technik-Produkte-27-06-2017-13629.html, zuletzt geprüft am 20.10.2017.
- [HEL17b] Hella KG Hueck & Co., *Scheinwerfer: Lichtsysteme* (16.11.2017), www.hella.com/hella-at/Scheinwerfer-1120.html, zuletzt geprüft am 09.01.2018.
- [HOF14] R. Hofner, *Bewertung von Ausblendungsstrategien bei adaptiven Scheinwerfersystemen*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2014.
- [HOL14] G. Hollmig, *Auswahl und Verifikation von Filtern zum Markieren von Objekten im Straßenverkehr*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2014.
- [HUN10] C.-C. Hung et al., *Optical design of automotive headlight system incorporating digital micromirror device*, in: *Applied optics*, 2010, 49 (22), 4182.
- [IAL08] International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, *IALA Recommendation E-200-4 Ed. 1: IALA E-200-4*, 12/2008.
- [JAH14] P. Jahn, *Kriterien zur Auflösungsbestimmung von adaptiven Scheinwerfersystemen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Mai 2014.

- [JAH16] P. Jahn, C. Neumann. Auflösungskriterien adaptiver Scheinwerfersysteme, in *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*, VDI-Berichte, 7 // 2278 (Eds: VDI Verlag GmbH), VDI Verlag GmbH; VDI-Verl. Düsseldorf, 2016.
- [JAH17] P. Jahn, I. Cristea, C. Neumann. High-Resolution Light-Based Driver-Assistance, in *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting: Optimal Contrast for Symbols*, Darmstädter Lichttechnik, Vol. 17 (Eds: T. Q. Khanh), Herbert Utz Verlag, München, 2017.
- [JOH13] H. Johannsen, *Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion: Grundlagen der Unfallaufklärung*, 3rd ed., ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [KLE82] D. Klebelsberg, *Verkehrspsychologie*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1982.
- [KÖH12] S. Köhler, *Messtechnische Bestimmung von Leuchtdichtkoeffizienten für Fahrbahndeckschichten unter flachen Anstrahlwinkeln*, Technische Universität Berlin, 2012.
- [KRA16] A. Z. Krahnstöver, S. Thomschke, G. Koether, M. Vollrath. Licht führt!? - Einsatzmöglichkeiten von lichtbasierten Fahrerassistenzsystemen in Einfädelsituationen, in *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*, VDI-Berichte, 7 // 2278 (Eds: VDI Verlag GmbH), VDI Verlag GmbH; VDI-Verl. Düsseldorf, 2016.
- [KRA17] A. Z. Krahnstöver, M. Vollrath, J. F. Krems, *Licht führt!?: Konzeption und Evaluation von Fahrmanöverunterstützung durch lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme*, AutoUni-

- Schriftenreihe, Band 98, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2017.
- [LGK09] LG Karlsruhe, Urteil vom 23.01.2009. AZ 3 O 172/08.
- [MER15] Mercedes-Benz, *Der Mercedes-Benz F 015 Luxury in Motion*. (2015), www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/innovation/forschungsfahrzeug-f-015-luxury-in-motion/, zuletzt geprüft am 03.01.2019.
- [MER16a] Mercedes-Benz, *„DIGITAL LIGHT“: Zukünftige Schweinwerfertechnologie in HD-Qualität* (2016), www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/innovation/digital-light-scheinwerfer-in-hd-qualitaet/, zuletzt geprüft am 10.01.2018.
- [MER16b] Mercedes-Benz, *„DIGITAL LIGHT“: Scheinwerfer in HD-Qualität*. (2016), www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/innovation/digital-light-scheinwerfer-in-hd-qualitaet/, zuletzt geprüft am 10.01.2018.
- [MER18] Mercedes-Benz, *DIGITAL LIGHT: Das Licht der Zukunft kommt auf die Straße*. (2018), www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/fahrzeuge/personenwagen/mercedes-maybach/digital-light-das-licht-der-zukunft-kommt-auf-die-strasse/, zuletzt geprüft am 04.01.2019.
- [MIC15] S. Michenfelder, *Konzeption, Realisierung und Verifikation eines automobilen Forschungsscheinwerfers auf Basis von Digitalprojektoren*, Spektrum der Lichttechnik / Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut, Vol. 9, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, Baden, 2015.

- [MÖL16] I. Möllers, J. Moisel, R. Fiederling, S. Grötsch. Ein effizienter hochauflösender ADB-Scheinwerfer auf Basis von mikrointegrierten LED-Arrays, in *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*, VDI-Berichte, 7 // 2278 (Eds: VDI Verlag GmbH), VDI Verlag GmbH; VDI-Verl. Düsseldorf, 2016.
- [OLG13] OLG Koblenz, Urteil vom 14.10.2013. AZ 12 U 313/13.
- [OLG17] OLG Düsseldorf, Urteil vom 21.11.2017. AZ I-1 U 44/17.
- [OPE17] Opel Automobile GmbH, *Starkes Doppel: Opel Astra und IntelliLux LED® Matrix-Licht* (2017), media.opel.de/media/de/de/opel/news.detail.html/content/Pages/news/de/de/2017/opel/01-23-astra-intellilux.html, zuletzt geprüft am 10.01.2018.
- [ORN62] M. T. Orne, *On the social psychology of the psychological experiment*, in: *American Psychologist*, 1962, 17 (11), 776.
- [ÖST04] J. Östlund et al., *Human Machine Interface And the Safety of Traffic in Europe: Project GRD1/2000/25361 S12.319626, Deliverable 2* (12.08.2004).
- [OTT98] D. Otte et al. Anprallmechanismen von Helmgeschützten Köpfen, in *Proceedings of the 1998 International Motorcycle Conference: Unfallstudie*, Vol. 8, Vol. 8. Bochum, 1998.
- [POW15] M. Powelleit et al., *Verhaltensbezogene Kennwerte zeitkritischer Fahrmanöver*, Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen - Fahrzeugtechnik (F), Vol. 100, Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; Wirtschaftsverlag NW, Hannover, Bremen, 2015.

- [RAS14] B. Rasch, M. Friese, W. Hofmann, E. Naumann, *Quantitative Methoden 2: Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*, 4th ed., Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin, 2014.
- [REI15] M. Reinprecht, N. Winterer, P. Hartmann. Solution Paths Towards High-Resolution ADB-Systems, in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstädter Lichttechnik, Vol. 16 (Eds: T. Q. Khanh), Herbert Utz Verlag. München, 2015.
- [ROT14] J. Roth, B. Meyer, S. Thomschke. Laser scanning unit for light symbol projection, in *VISION 2014* (Eds: SIA), 2014.
- [RSA15] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), *Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen: (RSA)*, 1995th ed., Kirschbaum, Bonn, 2015.
- [SCH09] P. Schelkens, A. Skodras, T. Ebrahimi, *The JPEG 2000 Suite*, Wiley, 2009.
- [SCH16] T. Schäfer, *Methodenlehre und Statistik: Einführung in Datenerhebung, deskriptive Statistik und Inferenzstatistik*, 1st ed., Basiswissen Psychologie, Springer, Wiesbaden, 2016.
- [SCH18] U. Schlöder, K. F. Albrecht. Headlamp DMD-Technology with High Resolution on the Road, in *VISION 2018* (Eds: SIA), 2018.
- [SCH71] H.-J. Schmidt-Clausen. The Influence of the Angular Size, Adaptation Luminance, Pulse Shape, and Light Colour on the Blondel-Rey Constant, in *The Perception and application of flashing lights* (Eds: J. G. Holmes), Adam Hilger Ltd. London, 1971.

- [SIE19] L. Siebel, *Kontrastwahrnehmung einer hochaufgelösten Lichtfunktion in Abhängigkeit der Ortsfrequenz*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 10.05.2019.
- [STA14] Statistisches Bundesamt (Destatis), *Verkehrsunfälle 2014*, Wiesbaden (2014), www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/VerkehrsunfaelleJ.html.
- [STR08] R. Streiter, *ABC Pre-Scan im F700*, in: *ATZ Automobiltech Z*, 2008, 110 (5), 388.
- [STU01] J. C. Stutts, D. W. Reinfurt, E. A. Rodgman, *The role of driver distraction in crashes: an analysis of 1995-1999 Crashworthiness Data System Data*, in: *Annual proceedings / Association for the Advancement of Automotive Medicine. Association for the Advancement of Automotive Medicine*, 2001, 45, 287.
- [StVO] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), *Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) mit Anlagen Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO): StVO*, Mai 2018.
- [SZ17] *Stuttgarter Zeitung*, *Fahrerassistenzsysteme sind gefragt*, in: *Stuttgarter Zeitung*, 11.09.2017.
- [SZA78] N. S. Szabo. Digital Image Anomalies: Static And Dynamic, in *Visual Simulation and Image Realism I*, SPIE Proceedings (Eds: L. Beiser), SPIE, 1978.
- [TEX16] Texas Instruments (TI), *Datenblatt DLP5531-Q1* (April 2016).

- [TRE10] B. Trefflich, *Videogestützte Überwachung der Fahreraufmerksamkeit und Adaption von Fahrerassistenzsystemen*, 1st ed., Audi Dissertationsreihe, Bd. 26, Cuvillier, Göttingen, 2010.
- [VOL15] VoLiFa 2020 research cooperation, H. Hesse. BMBF-Project VOLIFA 2020 - High resolution light distribution by using a LCD, in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstädter Lichttechnik, Vol. 16 (Eds: T. Q. Khanh), Herbert Utz Verlag, München, 2015.
- [VWV17] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), *Verkehrseinrichtungen nach Anlage 4 (zu § 43 Absatz 3 StVO): VwV-StVO*, 22.05.2017.
- [WAL06] H. Wallentowitz, K. Reif, *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik*, 1st ed., Vieweg, s.l., 2006.
- [WAR67] M. J. Wargo, *Human operator response speed, frequency, and flexibility*, in: *Human factors*, 1967, 9 (3), 221.
- [WAT09] A. H. Watt, *3D computer graphics*, 3rd ed., Pearson/Addison-Wesley, Harlow, 2009.
- [WIC01] C. D. Wickens et al., *Pilot Task Management: Testing an Attentional Expected Value Model of Visual Scanning*, Savoy, IL (2001), NASA Technical Report (ARL-01-14/NASA-01-7).
- [WIN15] H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, 3rd ed., ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.

- [ZUS67] K. Zuse, *US3316442A, Apparatus for controlling headlights by counterlight* (1967).
- [ZWA88] H. T. Zwahlen, C. C. Adams, Jr., D. P. DeBald. Safety Aspects of CRT Touch Panel Controls in Automobiles, in *Vision in vehicles II* (Eds: A. G. Gale), North-Holland. Amsterdam, 1988.

IV ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1:	Konzept des Baustellenlichtes von Audi, welches dem Fahrzeugführer die Breite seines Fahrzeuges mittels zweier projizierter Linien anzeigt [AUD15].2
Abbildung 1.2:	Beispiele für Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern [AUD15, KRA17]3
Abbildung 2.1:	aHDG (links) und vHDG (rechts) [HEL17b]9
Abbildung 2.2:	Funktionsprinzip eines DMD Arrays. Je nach Spiegelstellung wird das Licht entweder zur Projektionsoptik (helles Pixel) oder zum Absorber (dunkles Pixel) gelenkt [HUN10].....12
Abbildung 2.3:	Diamantanordnung des <i>DLP5531</i> von <i>Texas Instruments</i> [TEX16].....13
Abbildung 2.4:	Beispiele lichtbasierter Fahrerassistenz. l.o. Fußgängerkommunikation [AUD15], r.o. Radfahrermarkierung mit Sicherheitsbereich [HEL17a], l.u. Einfädelassistent [KRA17], r.u. Baustellenlicht [MER16a].....15
Abbildung 2.5:	Beispielhafter Boxplot. Kreise markieren milde Ausreißer, Sterne extreme Ausreißer.....19
Abbildung 3.1:	Projizierter Winkel einer 15 cm breiten Linie in Abhängigkeit vom Abstand vor

	dem Fahrzeug. Die markierte Entfernung von 65 m entspricht der Position der HDG.	30
Abbildung 3.2:	Trapez zur Projektion eines Baustellenlichts in 3-facher, 9-facher und 142-facher Auflösung der Mindestbreite ohne (oben) und mit (unten) Antialiasing.	31
Abbildung 3.3:	Leuchtdichteaufnahme eines Stücks Malervlies auf Asphalt in 2-fach logarithmischer Darstellung mit Grauwertbildschnitt (Linie 1)	33
Abbildung 3.4:	Varianten des Baustellenlichtes mit sich jeweils halbierender Fläche bzw. einem Gradienten.....	34
Abbildung 3.5:	Fotos der vier Varianten in der Tiefgarage inkl. homogenem Abblendlicht.....	35
Abbildung 3.6:	Leuchtdichtebilder der Variation „klein“ in 2-fach logarithmischer Darstellung. Die weißen Linien umranden die ausgewerteten Regionen für Objekt und Umfeld.	36
Abbildung 3.7:	Mittelwerte des ermittelten angenehmen Kontrasts über der Umgebungsleuchtdichte und der Fläche	37
Abbildung 3.8:	Boxplots der als angenehm empfundenen Kontraste	38
Abbildung 3.9:	Liniendiagramm des eingestellten Kontrasts jedes Probanden über der Umgebungsleuchtdichte	38

Abbildung 4.1:	4 Varianten des Baustellenlichts: oben Streifen, unten Teppich, statische Variante jeweils in blau, dynamische (mitlenkende) Variante in grün45
Abbildung 4.2:	Leuchtdichteaufnahme des Baustellenlichts. Oben: Bereich weit vor dem Fahrzeug. Unten: Bereich direkt vor dem Fahrzeug.....49
Abbildung 4.3:	Verkehrsübungsplatz der Fahrschulgemeinschaft Pforzheim [GOO]51
Abbildung 4.4:	Baustellensituation mit eingeschaltetem Baustellenlicht52
Abbildung 4.5:	Systematische Darstellung der Versuchsstrecke mit Startpunkt und Baustellenbereich55
Abbildung 4.6:	Rohdaten des Lenkradwinkels einer Versuchsfahrt und gezoomte Ansicht mit hervorgehobener 0°-Linie58
Abbildung 4.7:	Lenkradwinkel nach erstem Schritt der Entfernung der Wendebereiche59
Abbildung 4.8:	Vollständig gefiltertes Lenkwinkelsignal60
Abbildung 4.9:	Boxplots der HFC über die 17 ausgewerteten Probanden64
Abbildung 4.10:	Beispiel einer Lerneffektkurve, basierend auf Pseudodaten66
Abbildung 4.11:	Mittlere HFC über die Durchgänge zum Feststellen eines Lerneffekts67

Abbildung 4.12:	Mittlere Geschwindigkeit über die Durchgänge zum Feststellen eines Lerneffekts.....	70
Abbildung 4.13:	Boxplot der gefahrenen Durchschnittsgeschwindigkeit aller acht Durchgänge (links) bzw. des jeweils letzten Durchgangs (rechts) jeweils mit und ohne Baustellenlicht.....	71
Abbildung 4.14:	Plausibilitätsprüfung für die Fragebögen.....	74
Abbildung 4.15:	Gesamteindruck der Probanden zum Baustellenlicht.....	75
Abbildung 4.16:	Meinung der Probanden, ob sie sich mit Baustellenlicht sicherer gefühlt haben, das Baustellenlicht sie bei der Fahraufgabe unterstützt und beim Einschätzen der Fahrzeugbreite geholfen hat	75
Abbildung 4.17:	Meinung der Probanden, ob sie sich durch das Baustellenlicht unsicherer, abgelenkt oder gestört fühlten.....	76
Abbildung 4.18:	Einfluss auf das Blickverhalten. „BAST“ bedeutet mehr Blicke auf das Baustellenlicht.....	77
Abbildung 4.19:	Von den Probanden genannten Vorteile des Baustellenlichts. Die Einschätzung der Breite bezieht sich auf das eigene Auto, fremdes Auto meint die Unterstützung, wenn man ein fremdes oder neues Fahrzeug lenkt.	77

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 4.20:	Von den Probanden genannten Nachteile des Baustellenlichts.	78
Abbildung 4.21:	Änderungswünsche hinsichtlich der Größe des Baustellenlichts.	78
Abbildung 4.22:	Änderungswünsche hinsichtlich der Position des Baustellenlichts. Näher und weiter beziehen sich auf die Entfernung zum eigenen Fahrzeug.	79
Abbildung 4.23:	Wunsch, das Baustellenlicht im eigenen Fahrzeug zu haben.	79
Abbildung 4.24:	Problematik eines statischen (blau) und eines mitlenkenden (grün) Baustellenlichts.	83
Abbildung 4.25:	Engstellensituation mit Baustellenlicht. Die ersten beiden Varianten stellen den Status Quo dar, jeweils das linke Fahrzeug hat bereits auf die vermeintliche Kollision mit der Spurverengung reagiert. Variante 3: Baustellenlicht wird relativ zur Fahrbahn positioniert.	85
Abbildung 4.26:	Eye-Tracking-System im Versuchsfahrzeug. Auf dem Armaturenbrett die drei Tracking-Kameras sowie die beiden Infrarotstrahler (rot markiert). Hinter der Windschutzscheibe ist die Szenenkamera montiert (blau markiert). Die Kartonagen dienen der Abschattung der Infrarotlichter vor der Szenenkamera.	89

Abbildung 4.27: Beispiel einer 9p-Kalibrierung. Der Proband musste in Richtung des großen Kreises schauen, die kleinen Kreise entsprechen den zugehörigen, gemessenen Blickvektoren. 90

Abbildung 4.28: Screenshot aus *MAPPS*. In rot die ROI „linke Fahrbahn“, in blau die ROI „eigene Fahrbahn“. Der grüne Kreis ist die momentane Blickrichtung. Die scheinbare Blendquelle oberhalb der eigenen Fahrbahn ist lediglich Wärmestrahlung die von der IR-empfindlichen Szenenkamera, nicht jedoch vom Auge erfasst wird. 92

Abbildung 4.29: Schematische Darstellung der beiden Situationen; Überholfahrt oben, Parallelfahrt unten. 94

Abbildung 4.30: Boxplot der Blickzuwendungsdauern „linke Fahrspur“ in Prozent. 100% entspricht hierbei der kumulierten Blickzuwendungsdauer auf die linke und die eigene Fahrspur (N=19). 100

Abbildung 4.31: Relative Blickzuwendungsdauern der 1. und 3. Situation mit eingeschaltetem Baustellenlicht für die beiden Altersgruppen. 102

Abbildung 4.32: Histogramm der Fragenummer, wann das Baustellenlicht bemerkt wurde (1=sofort, 4=gar nicht; N=20). 106

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 4.33:	Verteilung der Antworthäufigkeit nach der Störungsursache bei Frage 2.....	106
Abbildung 4.34:	Verteilung der Antworthäufigkeit nach der Störungsursache bei Frage 4.....	107
Abbildung 4.35:	Verteilung der Antworthäufigkeit nach der Störungsursache bei Frage 6.....	107
Abbildung 4.36:	Zahl der Unfälle außerorts mit einem anderen Fahrzeug, das seitlich in gleicher Richtung fährt, für das Jahr 2014 [STA14].....	108
Abbildung 4.37:	Verteilung der Antworthäufigkeit eines potenziellen Sicherheitsgewinns	109
Abbildung 4.38:	Verteilung der Antworthäufigkeit eines potenziellen Sicherheitsrisikos.....	110
Abbildung 4.39:	Leuchtdichteaufnahme des für den Probanden bestimmten Rechtspfeils.....	114
Abbildung 4.40:	Situation A (Probandenfahrzeug biegt auf der linken Spur nach links ab, Dummyfahrzeug auf der rechten Spur nach rechts), Foto von Geßner [GEß18]	116
Abbildung 4.41:	Route der ersten 3 Durchgänge, das Quadrat markiert den Endpunkt (nach Geßner [GEß18])	118
Abbildung 4.42:	Übersicht der gefahrenen 16 Durchgänge für korrekt und falsch gefahrene Routen (nach Geßner [GEß18]).....	121
Abbildung 4.43:	Kumulierte Antworthäufigkeit auf die Frage, ob die angezeigten Pfeile für die zu fahrende Route irritierend waren (nach Geßner [GEß18])	122

Abbildung 4.44:	Häufigkeitsverteilung der Irritation bei den falsch gefahrenen Situationen.....	123
Abbildung 5.1:	Beispiel für Komplexität zweier Symbole, dargestellt in Graustufen, wie dies für einen Projektionsscheinwerfer möglich wäre. Links: Zeichen 205 StVO („Vorfahrt gewähren“). Rechts: Zeichen 356 StVO („Verkehrshelfer“).....	128
Abbildung 5.2:	Beispiel für zunehmende Komplexität bei Änderung der Geometrie, der Homogenität oder beidem gleichzeitig.	129
Abbildung 5.3:	Einfluss der Anzahl und Dauer von Blickabwendungen auf die Ablenkung [ZWA88]	132
Abbildung 5.4:	Übersicht über die verwendeten Symbole.....	136
Abbildung 5.5:	Anpassungskurve durch die mittleren Bewertungen der visuellen Komplexität	142
Abbildung 5.6:	Um 250 ms korrigierte Reaktionszeiten von Connors [CON75]. Bei niedriger und mittlerer Intensität wurde auf alle Frequenzen statistisch signifikant schneller reagiert, als im persistenten Fall.....	150
Abbildung 5.7:	Visualisierung der Wahrscheinlichkeit P, dass ein Fahrzeugführer abgelenkt wird in Abhängigkeit der Anzahl n beteiligter Fahrzeuge und der a priori Wahrscheinlichkeit p	152
Abbildung 5.8:	Verhältnis von $P(\text{Ablenkung} n \text{ Teilnehmer})$ zu $P(\text{Ablenkung} \text{ein$	

	Teilnehmer) in Abhängigkeit der Anzahl n beteiligter Fahrzeuge und der a priori Wahrscheinlichkeit p154
Abbildung 5.9:	Verletzungsschwere nach MAIS bei Frontalkollision in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit ([JOH13], zitiert in [OTT98]).....156
Abbildung 5.10:	Anhalteweg bei einer beliebigen Geschwindigkeit im Verhältnis zum Anhalteweg bei 50 km/h als Bewertung der Geschwindigkeit161
Abbildung B.1:	Informationsblatt für Probanden zur Studie „Wirksamkeit des Baustellenlichts“215
Abbildung B.2:	Abschlussfragebogen zur Studie „Wirksamkeit des Baustellenlichts“220
Abbildung B.3:	Informationsblatt für Probanden zur Studie „Ablenkung durch das Baustellenlicht“222
Abbildung B.4:	Abschlussfragebogen zur Studie „Ablenkung durch das Baustellenlicht“226
Abbildung B.5:	Flussdiagramm des Versuchsablaufs.....227
Abbildung C.1:	Leuchtdichteaufnahme des Linkspfeils für den Probanden232
Abbildung C.2:	Leuchtdichteaufnahme des Rechtspfeils für den Probanden233
Abbildung C.3:	Leuchtdichteaufnahme des Linkspfeils für das Dummyfahrzeug233
Abbildung C.4:	Leuchtdichteaufnahme des Rechtspfeils für das Dummyfahrzeug234

V TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1:	Entscheidungstabelle mit Wahrscheinlichkeiten P nach Döring [DÖR16]	21
Tabelle 2.2:	Cohens f und Cohens d mit zugehöriger Effektstärke	24
Tabelle 3.1:	Gemessene Umgebungsleuchtdichten bei vier definierten Dimmstufen der LED- Streifen	35
Tabelle 3.2:	Statistische Auswertung der Paarvergleiche bzgl. des Innersubjektfaktors „Fläche“	40
Tabelle 4.1:	Auswertung der Leuchtdichteaufnahmen des Baustellenlichtes (BAST)	48
Tabelle 4.2:	Deskriptive Statistik der HFC	68
Tabelle 4.3:	Ergebnisse des ALM mit Messwiederholung für den Vergleich der Situationen mit und ohne Baustellenlicht für die HFC	68
Tabelle 4.4:	Test der Zwischensubjekteffekte zur Überprüfung einer möglichen Altersabhängigkeit	69
Tabelle 4.5:	Deskriptive Statistik der Geschwindigkeit mit und ohne Baustellenlicht	71

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 4.6:	Ergebnisse des ALM mit Messwiederholung für die gefahrene Geschwindigkeit.....72
Tabelle 4.7:	Plausibilitätstabelle für die Inverse Frage nach Sicherheit und Unsicherheit durch das Baustellenlicht.....73
Tabelle 4.8:	Übersicht über die gegebenen Antworten, die in die Kategorie „Sonstige“ einsortiert wurden..... 80
Tabelle 4.9:	Ergebnisse des ALM mit Messwiederholung, Effektstärke ohne signifikanten Unterschied der Mittelwerte nicht von Bedeutung..... 103
Tabelle 4.10:	Übersicht über die Leuchtdichte der Navigationspfeile und der daraus resultierenden Weber-Kontraste 114
Tabelle 4.11:	Übersicht über die Kombinationen der untersuchten Funktionen, Tabelle nach Geßner [GEß18] 116
Tabelle 5.1:	Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman (Spearman's ρ) für die Komprimierungen JPEG und GIF für vier ausgewählte Bildsätze [FOR08]..... 133
Tabelle 5.2:	Namen zu den verwendeten Symbolen..... 135
Tabelle 5.3:	Korrelationstabelle der Probandenbewertungen mittels Kendalls τ ; gelb: signifikant auf 5%-Niveau, rot: nicht signifikant..... 139

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 5.4:	Überblick über die Eignung der Methoden zur Bewertung der effektiven Intensität. +: geeignet, o: nur bedingt geeignet, -: nicht geeignet.....	144
Tabelle 5.5:	Verzögerungen in der kognitiven Reizverarbeitung nach Wargo [WAR67].....	146
Tabelle 5.6:	Reaktionszeiten der <i>BAS</i> t-Studie [BAS02] abzüglich 200 ms motorischer Reaktionszeit [GRE00] und 50 ms afferenter und efferenter Verarbeitung [WAR67] und das daraus resultierende Verhältnis bei blinkendem und persistentem Betrieb.....	147
Tabelle 5.7:	Übersicht über die in Connors Studie verwendeten Leuchtdichten für die zu erkennenden Lichtsignale [CON75] mit Umrechnung in die SI-basierte Einheit cd/m ²	148
Tabelle 6.1:	Übersichtstabelle mit der Bewertungsfunktion und den einzusetzenden Parametern.....	175
Tabelle C.1:	Statistische Auswertung der Paarvergleiche bzgl. des Innersubjektfaktors „Umgebungsleuchtdichte“.....	231
Tabelle C.2:	Vollständige Statistik der Leuchtdichteaufnahmen zur Studie „Navigationspfeile“.....	235

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle C.3:	Untersuchte Symbole der Umfrage mit Dateigröße, daraus errechneter visueller Komplexität und mittlerer Bewertung nach Bereinigung der Ausreißer.....	236
Tabelle C.4:	Motorische Reaktionszeiten wie sie von Green zusammengefasst wurden.....	237

VI VERÖFFENTLICHUNGEN

- P. Jahn: *Propix – a 3D pixel-lighting research platform*, Intelligent Automotive Lighting, Düsseldorf, Januar 2015
- P. Jahn; D. gr. Austing; M. Helmer; C. Neumann: *Glaring effects of stop lamps in LED or incandescent bulb technology*, International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, September 2015
- P. Jahn: *Advanced Automotive Lighting Functions*, Karlsruhe Days of Optics and Photonics, Karlsruhe, November 2015
- P. Jahn: *Auflösungskriterien adaptiver Scheinwerfersysteme*, VDI Wissensforum „Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik“, Karlsruhe, Mai 2016
- P. Jahn; C. Neumann: *Ablenkpotenzial eines Baustellenlichtes auf andere Verkehrsteilnehmer*, Lux Junior, Dörfeld a.d. Ilm, September 2017
- P. Jahn; I. Cristea; C. Neumann: *High-Resolution Light-Based Driver-Assistance – Optimal Contrast for Symbols*, International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, September 2017

- P. Jahn; C. Neumann: *Bewertungskriterien für die Zulassung lichtbasierter Fahrerassistenz*, VDI Wissensforum „Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik“, Karlsruhe, Juni 2018
- P. Jahn; M. Barsch; C. Neumann: *Optimizing the Visual Recognition of Pedestrians Based on Networked Infrastructure (OpEr)*, Lux Junior, Dörnfeld a.d. Ilm, September 2019

VII BETREUTE ARBEITEN

- Raphael Lempa, Untersuchung zum Eigenblendverhalten durch Nebel auf den Autofahrer, Bachelorarbeit, April 2016
- Rajat Sharma, Development and Integration of an Adaptive Ambient Interior Lighting in a Vehicle, Diplomarbeit, Juni 2016
- Christian Berten, Implementierung und Evaluation eines Radarsystems für hochauflösende Scheinwerfer, Masterarbeit, Dezember 2016
- Iulia Cristea, Kontrastbestimmung neuartiger Lichtfunktionen, Masterarbeit, Juli 2017
- Mathias Mayer, Evaluation der Flimmerwahrnehmung eines scannenden Laserscheinwerfers, Bachelorarbeit, Mai 2018
- Theresa Geßner, Evaluation eines Navigationssystems auf Basis von Bodenprojektion, Bachelorarbeit, Juli 2018
- David Fischer, Auslösekriterien für ein automatisches Notbremsystem im Fußgängerschutzbereich, Bachelorarbeit, August 2018

- Maximilian Bartels, Optical Safety Zone – Evaluierung einer hochauflösenden Lichtfunktion im automobilen Umfeld, Masterarbeit, April 2019
- Leonie Siebel, Kontrastwahrnehmung einer hochaufgelösten Lichtfunktion in Abhängigkeit der Ortsfrequenz, Bachelorarbeit, Mai 2019

VIII ANHANG

A: ABKÜRZUNGEN, SYMBOLE UND FORMELZEICHEN

A.1 ABKÜRZUNGEN

ACC	<u>A</u> dpative <u>C</u> ruise <u>C</u> ontrol
ADAS	<u>A</u> dvanced <u>D</u> river- <u>A</u> ssistance <u>S</u> ystems
AIS	<u>A</u> bbreviated <u>I</u> njury <u>S</u> cale
aHDG	<u>a</u> dpative <u>H</u> ell- <u>D</u> unkel- <u>G</u> renze
ALM	<u>A</u> llgemeines <u>L</u> ineares <u>M</u> odell
ANOVA	<u>A</u> nalysis of <u>V</u> ariances
AR	<u>a</u> ugmented <u>R</u> eality
AV	<u>A</u> bhängige <u>V</u> ariable
BAST	<u>B</u> undes <u>a</u> nstalt für <u>S</u> traßenwesen
BAST	<u>B</u> austellenlicht
BMBF	<u>B</u> undes <u>m</u> inisterium für <u>B</u> ildung und <u>F</u> orschung
CIE	<u>C</u> ommission <u>I</u> nternationale de l'É <u>cl</u> airage
dbc	<u>d</u> ata- <u>b</u> ase <u>C</u> AN
DLP	<u>D</u> igital <u>L</u> ight <u>P</u> rocessing
DMD	<u>D</u> igital <u>M</u> icromirror <u>D</u> evice
ECE	siehe UNECE

ANHANG

ESP	<u>E</u> lektronisches <u>S</u> tabilitäts <u>P</u> rogramm
FAS	<u>F</u> ahrer <u>a</u> ssistenz <u>s</u> ystem
HDG	<u>H</u> ell- <u>D</u> unkel- <u>G</u> renze
HFC	<u>H</u> igh <u>F</u> requency <u>C</u> omponent
HUD	<u>H</u> ead- <u>u</u> p- <u>D</u> isplay
IALA	<u>I</u> nternational <u>A</u> ssociation of Marine Aids to Navigation and <u>L</u> ighthouse <u>A</u> uthorities
iLaS	<u>i</u> ntelligentes <u>L</u> aserlicht für kompakte und hochauflösende <u>a</u> daptive <u>S</u> cheinwerfer
IQR	<u>I</u> nterquartils <u>a</u> bstand
KBA	<u>K</u> raftfahr <u>t</u> bund <u>e</u> s <u>a</u> mt
LCD	<u>L</u> iquid <u>C</u> rystal <u>D</u> isplay
MAIS	<u>M</u> aximum <u>A</u> IS (siehe AIS)
MMI	Audi <u>M</u> ulti <u>M</u> edia <u>I</u> nterface
PWM	<u>P</u> ulse- <u>W</u> idth <u>M</u> odulation/ <u>P</u> uls <u>w</u> eiten <u>m</u> odulation
RMS	<u>R</u> oot <u>M</u> ean <u>S</u> quare
ROI	<u>R</u> egion <u>o</u> f <u>I</u> nterest
StVO	<u>S</u> traßen <u>v</u> erkehr <u>s</u> ord <u>n</u> ung
UNECE	<u>U</u> nited <u>N</u> ations <u>E</u> conomic <u>C</u> ommission for Europe
UV	<u>U</u> nabhängige <u>V</u> ariable
vHDG	<u>v</u> ertikale <u>H</u> ell- <u>D</u> unkel- <u>G</u> renze
WCS	<u>W</u> orld <u>C</u> oordinate <u>S</u> ystem
ZNS	<u>Z</u> entrales <u>N</u> ervensystem

A.2 FORMELZEICHEN

griechische Formelzeichen	
η_p	Partielles Eta
μ	Mittelwert
ρ	Spearman's Rho
σ	Standardabweichung
τ	Kenall's Tau
Lateinische Formelzeichen	
B	Anzahl der Betrachter
C	Zeitkonstante bei effektiver Intensität I_e
d/D	Dynamik und zugehörige Gewichtung d
F	Formfaktor bei effektiver Intensität I_e
f	Cohen's f als Maß der Effektstärke
g	Dateigröße
H_0	Nullhypothese
H_1	Alternativhypothese
I_e	effektive Intensität
K_W	Weber-Kontrast
L_O	Objektleuchtdichte
L_U	Umfeldleuchtdichte
N	Stichprobenumfang
n	Anzahl
$P(X)$	Wahrscheinlichkeit, dass X eintritt
p	Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses
s/S	Salienc und zugehörige Gewichtung s

ANHANG

T	Periodendauer
t_R	Reaktionszeit
v	gefahrere Geschwindigkeit
V	Kriterium „Geschwindigkeit“
vc/VC	Visuelle Komplexität und zugehörige Gewichtung vc
v^*/V^*	Value und zugehörige Gewichtung v^*
W	Bewertung(-sfunktion)

B: DOKUMENTE ZU DEN PROBANDENSTUDIEN

B.1 BAUSTELLENLICHT – WIRKSAMKEIT



Informationsblatt für Probanden

Sehr geehrte/r Teilnehmer/in,

vielen Dank für die Teilnahme an dem Versuch des Lichttechnischen Instituts. Bitte lesen Sie die nachfolgend aufgeführten Informationen aufmerksam durch.

Organisation und Durchführung

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Lichttechnisches Institut (LTI)
Abteilung: Optische Technologien im Automobil (OTIA)

Engesserstraße 13
76131 Karlsruhe

Projektleitung:
Patric Jahn
Patric.Jahn@kit.edu

Allgemeine Informationen:

Zur Vergleichbarkeit der einzelnen Messergebnisse ist es erforderlich, dass alle Teilnehmer mit den gleichen Voraussetzungen an der Studie teilnehmen. Sprechen Sie daher nach Ihrer Teilnahme an dem Versuch auf keinen Fall mit anderen Teilnehmern über Einzelheiten der Studie.

Versuchsfahrzeug:

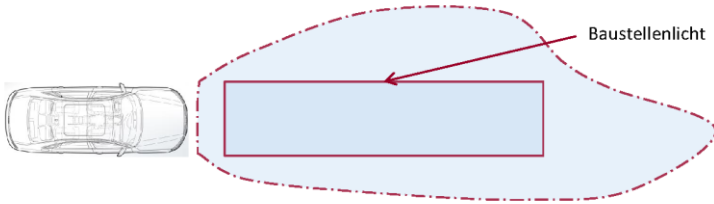
Innerhalb der Versuchsfahrt fahren Sie einen Audi A8 mit Automatikgetriebe. Zu Beginn der Testfahrt erhalten Sie eine Einweisung in das Versuchsfahrzeug durch den Versuchsleiter. Stellen Sie vor Beginn der Fahrt den Sitz sowie die Spiegel des Fahrzeuges korrekt ein.

Des Weiteren werden Sie gebeten Schalter/Knöpfe oder Ähnliches nur nach Aufforderung zu bedienen bzw. zu betätigen. Bitte lassen Sie auch das Radio ausgeschaltet um Messfehler zu verhindern. Sollten Sie Fragen zum Versuchsablauf selbst haben, dürfen Sie diese selbstverständlich jederzeit stellen.

Aufgabenstellung und Ablauf:

Die Fahrt findet entlang einer vorgeschriebenen Strecke statt. Der Versuchsleiter wird Sie rechtzeitig hinweisen, in welche Richtung Sie fahren sollen. Bitte orientieren Sie sich während der Fahrt am rechten Fahrbahnrand und versuchen Sie mit angepasster Geschwindigkeit zu fahren. Fahren Sie möglichst entspannt, so wie Sie es im Alltag auch tun würden.

Während der Versuchsfahrt werden Sie mehrfach durch eine baustellenähnliche Situation mit Engstellen geleitet. Fahren Sie bitte stets so, dass Sie sich sicher fühlen. In einigen Fällen wird eine zusätzliche Lichtfunktion vor dem Fahrzeug aktiviert. Diese zeigt Ihnen die Breite des eigenen Fahrzeuges sowie dessen Fahrtrichtung an und wird im weiteren Verlauf „Baustellenlicht“ genannt. Bei Fragen zum Baustellenlicht können Sie sich gerne an den Versuchsleiter wenden.



Rechtliche Informationen:

Alle Angaben der Probanden werden selbstverständlich vertraulich behandelt. Die Datenanalyse erfolgt anonym und ohne Möglichkeit des Rückschlusses auf einzelne Versuchspersonen. Daten einzelner Versuchspersonen werden niemals an Dritte weitergegeben, müssen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis aber bei uns für mindestens 10 Jahre gespeichert werden. Insbesondere vertrauliche Daten werden dabei ausschließlich sicher verwahrt.

Den Anweisungen des Versuchsleiters ist Folge zu leisten.

Ich habe das Informationsblatt für Probanden gelesen und verstanden.

Name:

Datum und Unterschrift:

Abbildung B.1: Informationsblatt für Probanden zur Studie „Wirksamkeit des Baustellenlichts“



Fragebogen zur Studie

(vom Versuchsleiter auszufüllen)

Name: _____ Vorname: _____

Datum: _____ Uhrzeit: _____ Prob. #: _____

Sehr geehrter Proband,

vielen Dank für die Teilnahme an dieser Studie. Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen, nehmen Sie sich Zeit und gehen Sie dabei entsprechend der Reihenfolge vor.

WICHTIG: Bitte denken Sie daran, keine Informationen über den Versuchsablauf an andere Testpersonen weiterzugeben, die noch an dieser Studie teilnehmen werden. Dies könnte die Ergebnisse der Untersuchung beeinflussen.

Vielen Dank.

Patric Jahn

Teil 1: Fragen zur Versuchsfahrt

Wie würden Sie den Gesamteindruck des Baustellenlichts beurteilen?

negativ

positiv

-3

0

+3

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Durch das Baustellenlicht habe ich mich unsicherer gefühlt.

Stimme **nicht** zu

Stimme zu

-3

0

+3

Das Baustellenlicht hat mich von der Fahraufgabe abgelenkt.

Stimme **nicht** zu

Stimme zu

-3

0

+3

Das Baustellenlicht hat mich gestört.

Stimme **nicht** zu

Stimme zu

-3

0

+3

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Durch das Baustellenlicht habe ich mich sicherer gefühlt.

Stimme **nicht** zu

Stimme zu

-3

0

+3

Das Baustellenlicht hat mich bei der Fahraufgabe unterstützt.

Stimme **nicht** zu

Stimme zu

-3

0

+3

Das Baustellenlicht hat mir bei der Einschätzung der Fahrzeugbreite geholfen.

Stimme **nicht** zu

Stimme zu

-3

0

+3

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Hat das Baustellenlicht Ihr Blickverhalten beeinflusst? Wenn ja, inwiefern?

- Nein.
- Ja, nämlich

Denken Sie, das Baustellenlicht hat Vorteile? Wenn ja, welche?

- Nein.
- Ja, nämlich

Denken Sie, das Baustellenlicht hat Nachteile? Wenn ja, welche?

- Nein.
- Ja, nämlich

Hätten Sie hinsichtlich der Größe des Baustellenlichts einen Änderungswunsch?

- Nein.
- Ja, es sollte länger sein.
- Ja, es sollte kürzer sein.
- Ja, die Streifen sollten breiter sein.
- Ja, die Streifen sollten schmaler sein.
- Ja, nämlich

Hätten Sie hinsichtlich der Position des Baustellenlichts einen Änderungswunsch?

- Nein.
- Ja, näher am eigenen Fahrzeug
- Ja, weiter weg vom eigenen Fahrzeug
- Ja, nämlich

Hätten Sie das Baustellenlicht gerne in Ihrem eigenen Fahrzeug?

- Nein.
- Ja.

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Teil 2: Allgemeine Fragen

1. Haben Sie bereits vorher an einer ähnlichen Studie teilgenommen?

- Nein
- Ja

2. Bitte beurteilen Sie den Schwierigkeitsgrad des Versuches

- sehr einfach
- einfach
- mittelmäßig
- schwer
- sehr schwer

3. Wie empfanden Sie die Einweisungen des Versuchsleiters?

- verständlich
- überwiegend verständlich
- teilweise verständlich
- überwiegend nicht verständlich
- gar nicht verständlich

4. Hätten Sie Interesse noch einmal an einer Studie teilzunehmen?

- Nein
- Ja

Abbildung B.2: Abschlussfragebogen zur Studie „Wirksamkeit des Baustellenlichts“

B.2 BAUSTELLENLICHT – ABLENKUNG

Informationsblatt für Probanden

Sehr geehrte/r Teilnehmer/in,

vielen Dank für die Teilnahme an dem Versuch des Lichttechnischen Instituts. Bitte lesen Sie die nachfolgend aufgeführten Informationen aufmerksam durch.

Organisation und Durchführung

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Lichttechnisches Institut (LTI)

Abteilung: Optische Technologien im Automobil (OTIA)

Engesserstraße 13

76131 Karlsruhe

Projektleitung:

Patric Jahn

Patric.Jahn@kit.edu

Allgemeine Informationen:

Zur Vergleichbarkeit der einzelnen Messergebnisse ist es erforderlich, dass alle Teilnehmer mit den gleichen Voraussetzungen an der Studie teilnehmen. Sprechen Sie daher nach Ihrer Teilnahme an dem Versuch auf keinen Fall mit anderen Teilnehmern über Einzelheiten der Studie.

Sehtest:

Zu Beginn werden Sie einen Sehtest durchführen um Ihre Sehleistung zu ermitteln. Bitte tragen Sie zur Versuchsfahrt evtl. vorhandene Sehhilfen (Brille bzw. Kontaktlinsen).

Ihnen werden nacheinander jeweils ein Sehobjekt, sogenannte Landoltringe (siehe Abbildung 1) im Messgerät gezeigt. Ihre Aufgabe besteht darin, die Öffnung des Ringes zu erkennen.



Abbildung 1 Landoltring

Bitte benennen Sie die Öffnungen wie folgt:

- Oben
- Oben rechts/ rechts oben
- Rechts
- Unten rechts/ rechts unten
- Unten
- Unten links/ links unten
- Links
- Oben links/ links oben

Versuchsfahrzeug:

Innerhalb der Versuchsfahrt fahren Sie einen Audi A6 Avant mit Automatikgetriebe. Zu Beginn der Testfahrt erhalten Sie eine Einweisung in das Versuchsfahrzeug durch den Versuchsleiter. Stellen Sie vor Beginn der Fahrt den Sitz sowie die Spiegel des Fahrzeuges korrekt ein.

Des Weiteren werden Sie gebeten Schalter/Knöpfe oder Ähnliches nur nach Aufforderung zu bedienen bzw. zu betätigen.

Bitte vermeiden Sie während der Fahrt unnötige Gespräche und lassen Sie das Radio ausgeschaltet um Messfehler zu verhindern. Sollten Sie Fragen zum Versuchsablauf selbst haben, dürfen Sie diese selbstverständlich jederzeit stellen.

Aufgabenstellung und Ablauf:

Die Fahrt findet entlang einer vorgeschriebenen Strecke auf dem Hockenheimring statt. Der Versuchsleiter wird Sie rechtzeitig hinweisen, in welche Richtung Sie fahren sollen. Bitte orientieren Sie sich während der Fahrt an der rechten Fahrbahnrandmarkierung und versuchen Sie eine Geschwindigkeit von 50-60km/h zu halten. Fahren Sie möglichst entspannt, so wie Sie es im Alltag auch tun würden.

Während des Versuchsablaufs wird Ihnen immer ein anderes Fahrzeug folgen. In einigen Situationen wird dieses Sie auch überholen. Für die gesamte Versuchsdauer werden wir Ihre Blickbewegungen aufzeichnen um ableiten zu können, wann sie wohin geschaut haben.

Den Anweisungen des Versuchsleiters ist Folge zu leisten.

Rechtliche Informationen:

Alle Angaben der Probanden werden selbstverständlich vertraulich behandelt. Die Datenanalyse erfolgt anonym und ohne Möglichkeit des Rückschlusses auf einzelne Versuchspersonen. Bereits in der Auswertung wird kein Videomaterial, auf dem Sie zu sehen sein könnten, verwendet. Daten einzelner Versuchspersonen werden niemals an Dritte weitergegeben, müssen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis aber bei uns gespeichert werden. Vertrauliche Daten werden dabei ausschließlich sicher verwahrt.

Ich habe das Informationsblatt für Probanden gelesen und verstanden.

Name:

Datum und Unterschrift:

Abbildung B.3: Informationsblatt für Probanden zur Studie „Ablenkung durch das Baustellenlicht“

Fragebogen zur Studie

(vom Versuchsleiter auszufüllen)

Name: _____ Vorname: _____ Prob. #: _____

Datum: _____ Uhrzeit: _____

Sehr geehrter Proband,

vielen Dank für die Teilnahme an dieser Studie. Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen, nehmen Sie sich Zeit und gehen Sie dabei entsprechend der Reihenfolge vor.

WICHTIG: Bitte denken Sie daran, keine Informationen über den Versuchsablauf an andere Testpersonen weiterzugeben, die noch an dieser Studie teilnehmen werden. Dies könnte die Ergebnisse der Untersuchung beeinflussen.

Vielen Dank.

Patric Jahn

Teil 1: Fragen zur Versuchsfahrt

1. Konnten Sie Unterschiede zwischen den einzelnen Situationen feststellen?

- Nein.
- Ja, nämlich

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

2. Empfanden Sie in einer oder mehreren Situationen etwas als störend?

- Nein.
- Ja, nämlich

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

ANHANG

3. Ist Ihnen etwas an dem anderen Fahrzeug aufgefallen?

- Nein.
 Ja, nämlich

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

4. Hat Sie etwas an dem anderen Fahrzeug, also nicht am Fahrverhalten des Fahrers, gestört?

- Nein.
 Ja, nämlich

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

5. Ist Ihnen etwas am Licht des anderen Fahrzeuges aufgefallen?

- Nein.
 Ja, nämlich

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

6. Wurden Sie durch das Licht des anderen Fahrzeuges gestört?

- Nein.
 Ja, nämlich

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

7. Denken Sie, dass die Lichtfunktion des anderen Fahrzeuges einen Beitrag zur Verkehrssicherheit liefern kann?

- Nein.
 Ja, weil

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

8. Denken Sie, dass die Lichtfunktion des anderen Fahrzeuges die Verkehrssicherheit gefährden könnte?

Nein.

Ja, weil

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Teil 2: Allgemeine Fragen

1. Haben Sie bereits vorher an einer ähnlichen Studie teilgenommen?

- Nein
- Ja

2. Bitte beurteilen Sie den Schwierigkeitsgrad des Versuches

- sehr einfach
- einfach
- mittelmäßig
- schwer
- sehr schwer

3. Wie empfanden Sie die Einweisungen des Versuchsleiters?

- verständlich
- überwiegend verständlich
- teilweise verständlich
- überwiegend nicht verständlich
- gar nicht verständlich

4. Wie sehr fühlten Sie sich durch die Messaufbauten (z.B. Kameras, Mikrofone, etc.) im Versuchsfahrzeug abgelenkt?

- stark
- weniger stark
- mittelmäßig
- wenig
- gar nicht

5. Hätten Sie Interesse noch einmal an einer Studie teilzunehmen?

- Nein
- Ja

Abbildung B.4: Abschlussfragebogen zur Studie „Ablenkung durch das Baustellenlicht“

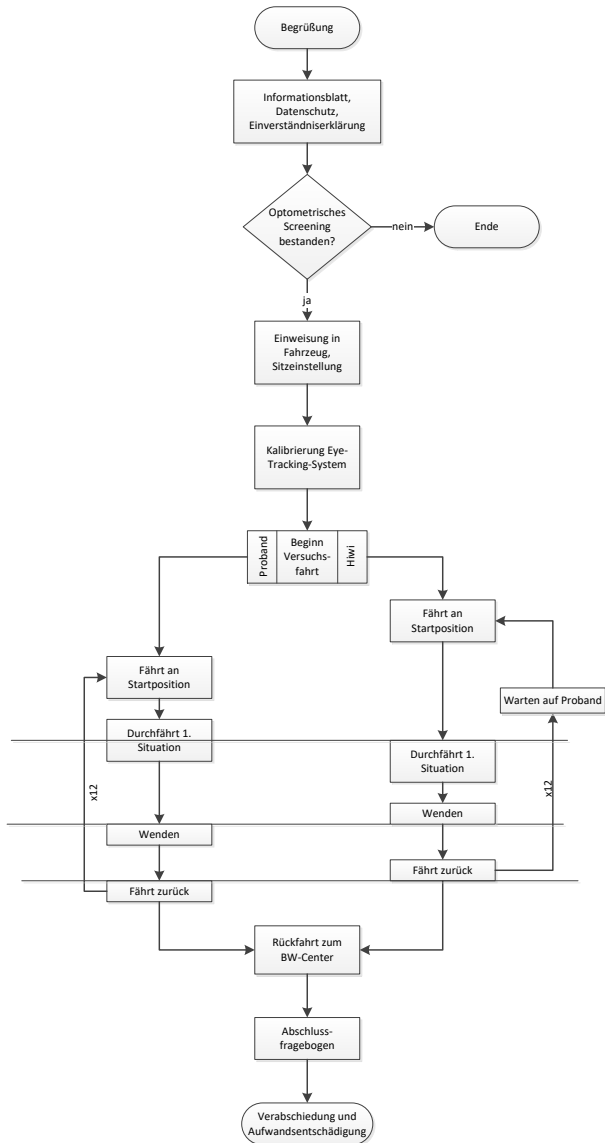


Abbildung B.5: Flussdiagramm des Versuchsablaufs

B.3 UMFRAGE VISUELLE KOMPLEXITÄT

Einleitungstext

Liebe Teilnehmerin, lieber Teilnehmer,

vielen Dank für die Unterstützung! Sie werden auf den folgenden Seiten einige Symbole und Piktogramme sehen mit der Bitte, diese hinsichtlich ihrer "visuellen Komplexität" zu bewerten. Ob die Symbole überhaupt eine Bedeutung haben und wenn ja welche, spielt dabei keine Rolle. Lediglich die Komplexität der Darstellung soll bewertet werden.

Folgende Aspekte könnten Sie bei Ihrer Bewertung berücksichtigen:

- Die Wahrnehmungsdauer, also ob sie tendenziell eher länger oder kürzer brauchen würden, um alles abgebildete wahrzunehmen
- Der Umfang der Darstellung, also beispielsweise ob eher wenig oder viel zu erkennen ist
- Der Detailgrad, also beispielsweise ein Dreieck mit abgerundeten Kanten hat mehr Details als ein normales Dreieck, ist aber dennoch nur ein Dreieck und wird als solches erkannt
- Dauer Ihrer Blickzuwendung, also ob Sie das Symbol/Piktogramm tendenziell eher länger oder nur kurz betrachten würden

Bei Ihrer Bewertung handelt es sich stets um eine rein subjektive Einschätzung, d. h. Sie können dabei nicht falsch antworten. Sie haben bis zum Abschluss der Umfrage auch jederzeit die Möglichkeit, zu einem bereits bewerteten Symbol/Piktogramm zurück zu gehen, und die Bewertung zu ändern.

Um Ihnen eine hinreichend feine Unterscheidung geben zu können, reicht die Bewertungsskala immer von 1 (überhaupt nicht komplex) bis 10 (sehr komplex). Es steht Ihnen dabei frei, ob Sie die gesamte Skala ausnutzen oder nur einen beliebigen Bereich. Dabei sollte aber stets der größere Wert einer höheren Komplexität entsprechen.

Damit Sie bereits im Vorfeld besser einschätzen können, welche Symbole Sie zu bewerten haben, werden Sie auf der nächsten Seite zunächst eine Übersicht mit allen zu bewertenden Symbolen sehen. Auf dieser Seite müssen Sie noch nichts bewerten.

Nach jedem Symbol sowie zum Abschluss des Formulars haben Sie die Möglichkeit, noch einen Kommentar zu hinterlassen. Sie können hier beliebige Anmerkungen eintragen, sei es zu Ihrer Bewertung oder ganz allgemein zu der Umfrage.

Wenn Sie auf der letzten Seite der Umfrage Ihren Namen eintragen, so nehmen Sie auch an der Verlosung des 10€ Amazon Gutscheins teil.

Vielen Dank!

C: MESSWERTE, ROHDATEN UND STATISTIKEN

C.1 KONTRASTSTUDIE

Tabelle C.1: Statistische Auswertung der Paarvergleiche bzgl. des Innersubjektfaktors „Umgebungsleuchtdichte“

Vergleich	p-Wert	Cohen's <i>d</i>	Effektstärke
0% – 30%	<0,001	0,968	groß
0% – 60%	<0,001	1,461	groß
0% – 90%	<0,001	1,735	groß
30% – 60%	<0,001	0,585	mittel
30% – 90%	<0,001	0,963	groß
60% – 90%	<0,001	0,429	klein

C.2 STUDIE NAVIGATIONSPEILE

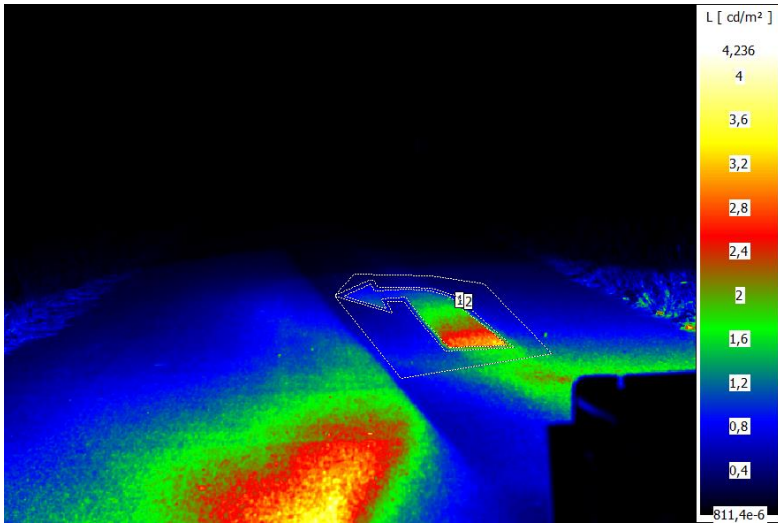


Abbildung C.1: Leuchtdichteaufnahme des Linkspfeils für den Probanden

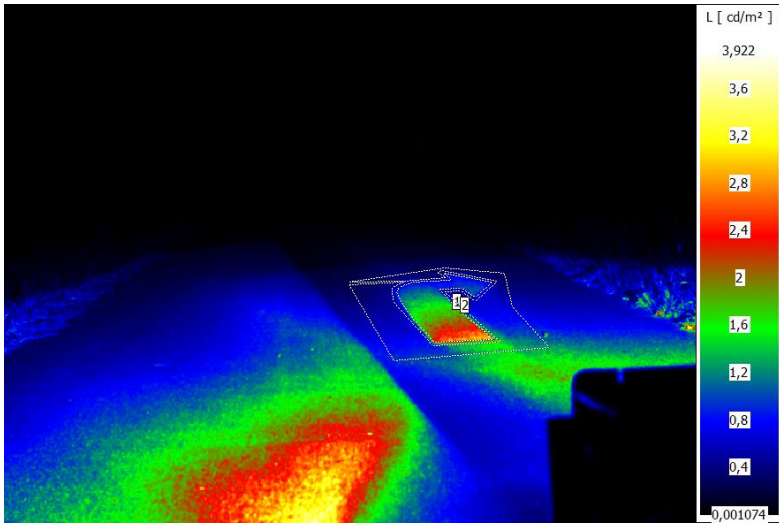


Abbildung C.2: Leuchtdichteaufnahme des Rechtspfeils für den Probanden

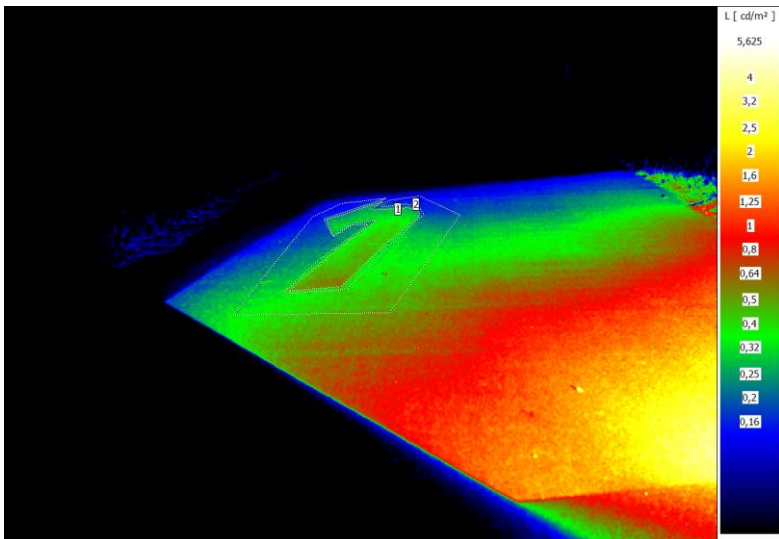


Abbildung C.3: Leuchtdichteaufnahme des Linkspfeils für das Dummyfahrzeug

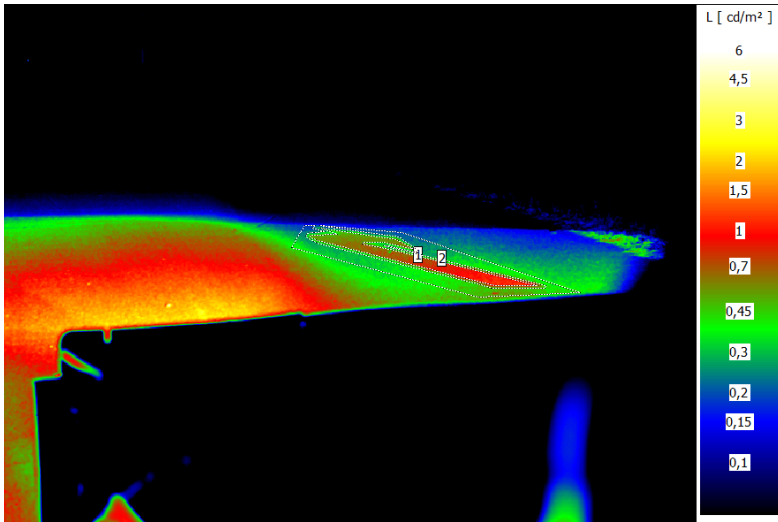


Abbildung C.4: Leuchtdichteaufnahme des Rechtspfeils für das Dummyfahrzeug

Tabelle C.2: Vollständige Statistik der Leuchtdichteaufnahmen zur Studie „Navigationspfeile“

Region	Fläche	Min	Max	Mittelwert	Streuung	Weber-Kontrast
Einheit	- Pixel	cd/m ²	cd/m ²	cd/m ²	cd/m ²	a.u.
Proband rechts	1	0,5663	3,226	1,5990	0,6184	1,171
	2	0,2451	1,791	0,7365	0,3248	
Proband links	1	0,4820	3,567	1,8180	0,7046	1,305
	2	0,2367	1,997	0,7886	0,3650	
Dummy rechts	1	0,2905	1,250	0,7509	0,2025	1,107
	2	0,1487	0,859	0,3564	0,0883	
Dummy links	1	0,1944	0,642	0,4069	0,0922	0,2783
	2	0,1227	1,040	0,3183	0,1019	

C.3 VISUELLE KOMPLEXITÄT

Tabelle C.3: Untersuchte Symbole der Umfrage mit Dateigröße, daraus errechneter visueller Komplexität und mittlerer Bewertung nach Bereinigung der Ausreißer

ID	Name	Dateigröße [Bytes]	Visuelle Komplexität	Mittlere Bewertung
1	Pfeil	833	2,061	2,310
2	Abstandsstreifen	914	2,914	2,988
3	OSZ	997	3,668	4,930
4	Chevron	1058	4,155	4,370
5	Navigationspfeil	1224	5,239	5,545
6	Rechteck	759	1,165	1,215
7	GRA	1750	7,143	6,783
8	GRA aktiviert	1918	7,458	8,763
9	ACC Abstandswarnung	1957	7,518	8,421
10	Dreieck	819	1,900	1,977
11	Reifendruck	1687	6,998	8,309
12	Schneeflocke	1896	7,422	6,011
13	Kreis	761	1,190	1,131
14	Achtung Baustelle	2112	7,721	6,324
15	Verkehrshelfer	3703	8,314	9,120
16	Fußspuren	1489	6,419	4,652
17	Baustellenlicht	829	2,015	2,392
18	Stoppeschild	1188	5,030	5,941

C.4 DYNAMIK

Tabelle C.4: Motorische Reaktionszeiten wie sie von Green zusammengefasst wurden

Studie	Motorische Reaktionszeit [s]
Olson&Sivak (1986)	0,20-0,22
Olson&Sivak (1986)	0,19-0,20
Lings (1991)	0,27
Wright&Shephard (1978)	0,17-0,218
Davies&Watts	0,149-0,309
Lieberman et al. (1995)	0,24
Hankey (1996)	0,324
Broen&Chang (1996)	0,17
Arbuthnott (1980)	0,313

D: SKRIPTE

D.1 EXPORTSKRIPT VON CORELDRAW INS SVG FORMAT ZUR BESTIMMUNG DER VC

```
Sub VC_Export_SVG()  
    ActiveLayer.Shapes.All.CreateSelection  
    Dim expopt As StructExportOptions  
    Set expopt = CreateStructExportOptions  
    expopt.UseColorProfile = False  
    Dim expflt As ExportFilter  
    Dim strFileName$, myPath$  
    myPath = "D:\All Graphics\" 'change path here  
    strFileName = ActiveDocument.FileName  
    If Len(strFileName) = 0 Then strFileName = "unsaved.cdr"  
    strFileName = VBA.Left(strFileName, Len(strFileName) - 4)  
    Set expflt = ActiveDocument.ExportEx(myPath & strFileName & ".svg",  
    cdrSVG, cdrSelection, expopt)  
    With expflt  
        .Version = 1 ' FilterSVGLib.svgVer11  
        .Encoding = 0 ' FilterSVGLib.svgUTF8  
        .Styling = 0 ' FilterSVGLib.svgInternalStyleSheet  
        .EmbedJavaScript = True  
        '.Width = 210#  
        '.Height = 297#  
        .Units = 1 ' FilterSVGLib.svgMillimeters  
        .DrawingPrecision = 2 ' FilterSVGLib.svg_1to100  
        .FountainSteps = 2  
        .TextAsCurves = True  
        .EmbedFont = True  
        .CharacterSubsetting = 0 ' FilterSVGLib.svgUsedOnly
```

```
.GiveEmbeddedFontPriority = True
.BmpExportType = 2 ' FilterSVGLib.svgPng
.EmbedImages = False
.UseDecimalPrecision = True
.Finish
End With
End Sub
```

D.2 MATLAB-SKRIPT ZUR BERECHNUNG DER KOEFFIZIENTEN DES VC-MODELLS $G(x)$

```
x = [833 914 997 1058 1224 759 1750 1918 1957 819 1687 1896 761 2112 3703
1489 829 1188]';
y = [2.31 2.99 4.93 4.37 5.55 1.21 6.78 8.76 8.42 1.98 8.31 6.01 1.13 6.32 9.12 4.65
2.39 5.94]';
start = [8 -25 0];
up = [inf;inf;1];
low = [-100;-100;-1];
options = fitoptions('Method','NonlinearLeastSquares', 'Upper',up,
'Lower',low, 'Display','iter', 'TolFun',10^-6, 'TolX',10^-6, 'StartPoint',start);
g = fitype('a-(a-b)*exp(-c*x)', 'dependent',{'y'}, 'independent',{'x'},
'coefficients',{'a','b','c'}, 'options',options);
f = fit(x,y,g);
plot(f,x,y);
v=coeffvalues(f);
```


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



Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Der Einsatz modernster Technologien erlaubt es zukünftigen Scheinwerfern, nahezu beliebige Symbole und Animationen direkt vor dem Fahrzeug auf die Straße zu projizieren. Die möglichen Anwendungsszenarien hierfür erstrecken sich von lichtbasierter Fahrerassistenz über Fahrerinformation bis hin zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern. Doch bei allen Möglichkeiten darf auch die Gefahr einer Ablenkung des Fahrers oder anderer nicht außer Acht gelassen werden.

Die vorliegende Arbeit zeigt Möglichkeiten auf, wie die abstrakte Größe des Ablenkpotenzials operationalisiert und quantifiziert werden kann. Basierend auf der so ermittelten Bewertung kann dann über eine Zulassung der vorliegenden Lichtfunktion entschieden werden.

