Information und Interaktion

Die Ermittlung von sicherheitsrelevanten Anforderungen an innovative Heckleuchten

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Von der Fakultät für Human- und Sozialwissenschaften der
Technischen Universität Chemnitz genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt von:	Isis Maria Mennig geboren am 02.10.1988 in Nürnberg
Tag der Einreichung:	18.05.2017
Tag der Verteidigung:	13.12.2017
Erstgutachter:	Prof. Dr. Josef F. Krems, Technische Universität Chemnitz
Zweitgutachter:	Prof. Dr. Mark Vollrath, Technische Universität Braunschweig

Danksagung

Mein größter Dank gilt Professor Dr. Josef F. Krems. Als Dozent ab dem ersten Semester, als Betreuer meiner Abschlussarbeiten und als Doktorvater begleitete er mich durch meine gesamte universitäre Karriere. Vielen Dank für die kontinuierliche Unterstützung und das Vertrauen in mich sowie für die Inspiration und Freude am wissenschaftlichen Arbeiten. Ebenso möchte ich Professor Dr. Mark Vollrath danken, der mir Rahmen der Doktorandenseminare der Fachgruppe Verkehrspsychologie eine große Hilfe im Entstehungsprozess der Arbeit war und nun zusätzlich bereit war, meine Arbeit abschließend zu begutachten. Vielen Dank auch an die Mitarbeiter der Professur für Allgemeine Psychologie und Arbeitspsychologie für den regelmäßigen und ungemein wertvollen Austausch im Rahmen der Forschungskolloquien und die Hilfsbereitschaft bei Fragestellungen jeder Art. Hierbei möchte ich insbesondere meiner lieben Freundin Tina Schneidereit danken, die mir jederzeit mit gutem Rat und Motivation zur Seite stand und mir Kost und Logis in Chemnitz angeboten hat.

Die Arbeit entstand im Rahmen meiner Doktoranden-Tätigkeit bei Audi in der Lichtentwicklung. Die Stelle wurde von Stephan Berlitz geschaffen, der mich stets interessiert und engagiert betreut hat. Für das wunderbare Arbeitsklima möchte ich meinen lieben Kollegen aus der Lichtentwicklung und dem Audi-Doktorandennetzwerk danken. Dabei gilt mein besonderer Dank Philipp Rabenau, der jederzeit bereit war, einen interdisziplinären fachlichen Austausch zu betreiben und dabei ausreichend Kaffee zu trinken. Ohne seine technische Unterstützung wäre ein Großteil der Studien nicht möglich gewesen. Die Dissertation basiert auf experimentellen Untersuchungen, die nur mithilfe der studentischen Unterstützung von Stefan Rosenhammer, Julia Paris und Anna Diepold durchgeführt werden konnten. Ihr habt euch einen Orden verdient. Auch wenn die Probanden der Studien bereits mit ausreichend Süßigkeiten belohnt wurden, möchte ich auch an dieser Stelle noch einmal danke sagen, für die Bereitschaft an den Experimenten teilzunehmen. Außerdem danke ich Manfred Meier und Daniel Ehrlichauf für die technische Umsetzung. Vielen Dank auch an Ashley Gleave für seine Korrekturarbeit.

Ohne meiner mentalen Stütze, meinem persönlichen Motivations-Couch und meinem Anker Roy Zakrzewski wäre die Arbeit an der Dissertation niemals möglich gewesen. Danke für deine Geduld. Ebenso möchte ich meiner lieben Familie Brigitte Mennig, Johannes Mennig und Marian Mennig für die bedingungslose Unterstützung und den notwendigen Ausgleich danken.

Zusammenfassung

Der Mensch erfasst die Umwelt mithilfe seiner Sinnessysteme. Licht macht die physikalische Welt sichtbar und liefert dem visuellen System dadurch wichtige Informationen über unsere Umgebung. Im Straßenverkehr wird die visuelle Wahrnehmung durch die Fahrzeugbeleuchtung unterstützt. Dabei erfüllen Heckleuchten zwei zentrale Funktionen: Zum einen wird die Sichtbarkeit des Fahrzeugs bei Dunkelheit und schlechter Sicht für andere Verkehrsteilnehmer erhöht. Das Schlusslicht übermittelt Informationen über die Anwesenheit eines Fahrzeugs, über den Fahrzeugtyp und über die Fahrzeugbreite. Diese Informationen sind notwendig, um während der Fahrt einen angemessenen Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug einschätzen und einhalten zu können. Die zweite zentrale Funktion von Heckleuchten ist die Kommunikation und Interaktion mit dem rückwärtigen Verkehr. Mithilfe von Lichtsignalen der Bremsleuchte und des Fahrtrichtungsanzeigers wird die Aufmerksamkeit auf das vorausfahrende Fahrzeug gelenkt und es werden gezielt Informationen an andere Verkehrsteilnehmer übertragen. So werden Verzögerungen in Längsrichtung, Fahrtrichtungsänderungen und der Hinweis auf eine mögliche Gefahrenquelle durch die Heckleuchte kommuniziert. Für alle Lichtfunktionen gilt, dass die ausgesendeten Signale in jeder Situation gut wahrnehmbar und intuitiv verständlich sein müssen.

In dieser Arbeit wurde der mögliche Einfluss verschiedener Heckleuchtenattribute auf den Straßenverkehr untersucht. Eine Unfallanalyse ergab, dass der Großteil der Auffahrunfälle durch ein angemessenes Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten sowie eine adäquate Aufmerksamkeitsverteilung vermieden werden könnte. Adaptive Schlusslichtfunktionen weisen das Potenzial auf, bei schlechter Sicht die Erkennbarkeit des Fahrzeugs zu erhöhen, ohne dabei den Hinterherfahrenden zu blenden. In der Literatur finden sich Hinweise darauf, dass die Anbauhöhe und Position von Heckleuchten sowie die Helligkeit des Schlusslichts die Entfernungsschätzung zwischen zwei Fahrzeugen beeinflussen können. Im Rahmen von verkehrspsychologischen Untersuchungen wurde der Einfluss einer adaptiven Helligkeitssteuerung im Schlusslicht auf die Wahrnehmung untersucht. Es zeigte sich, dass eine kontinuierliche Helligkeitsanpassung des Schlusslichts an den Abstand zum Hinterherfahrenden die Entfernungsschätzung nicht beeinflusste. Um die Bedeutung der Gestaltungsform einer Heckleuchte für die Güte der Entfernungsschätzung beurteilen zu können, wurden zwei psychophysikalische Experimente durchgeführt. Diese Experimente zeigten, dass der Abstand zwischen zwei Elementen durch das Hinzufügen einer Verbindungslinie minimal

verändert wahrgenommen wurde. Auf Heckleuchten übertragen könnte man daher von einer leichten Überschätzung der Breite des Fahrzeughecks bei verbundenen Schlussleuchten ausgehen. Dies könnte das Abstandsverhalten eines Hinterherfahrenden tendenziell positiv beeinflussen, indem der Fahrer durch diese Wahrnehmungstäuschung den Abstand zum Fahrzeug minimal unterschätzen würde. Da Licht und Bewegung durch ihre Salienz ein großes Potenzial zur Aufmerksamkeitslenkung aufweisen, beschäftigte sich eine weitere Versuchsreihe mit der Wirkung dynamischer Lichtfunktionen. Die Reaktionszeiten auf die Deaktivierung eines Bremslichts konnten durch eine Dynamik im Bremslicht nicht weiter verbessert werden. Die Untersuchung von Dynamiken im Schlusslicht zeigte jedoch, dass in Abhängigkeit bestimmter Umgebungsbedingungen, der Bewegungsart und -geschwindigkeit unterschiedliche Reaktionen hervorgerufen werden können. Durch die Entwicklung salienter und intuitiv verständlicher Lichtfunktionen könnten somit die Kommunikationsmöglichkeiten im Straßenverkehr erweitert und differenziert werden. Die gezielte Steuerung der Aufmerksamkeit durch Heckleuchtenfunktionen in kritischen Situationen kann zur Erhöhung der Verkehrssicherheit führen.

Ziel der automobilen Lichtentwicklung ist eine innovative, allgemein akzeptierte und sicherheitsfördernde Heckleuchtengestaltung. Die Arbeit zeigte im Rahmen einer Unfallanalyse und verschiedenen wahrnehmungspsychologischen Experimenten die sicherheitsrelevanten Anforderungen an Heckleuchten auf. Dabei weisen verschiedene Heckleuchtenattribute und -funktionen das Potenzial auf, positiven Einfluss auf die Verkehrssicherheit nehmen zu können.

Summary

Humans perceive the world through their senses. Light makes the world visible and provides the visual system with important information about our environment. On the road, visual perception is supported by automotive lighting. Tail lights have two main functions: firstly, they improve the visibility of the vehicle for other road users at night time and in bad weather conditions. The tail light gives information about the presence of a car and the type and width of the vehicle. This information is necessary to assess and keep the appropriate distance to a vehicle in front. The second important function of tail lights is the communication and interaction with the following traffic. The lighting signals of the brake light and the turn signal draw attention to the car in front and specific information can be transmitted to other road users. In this manner, the tail light communicates decelerations in the longitudinal direction, changes in the driving direction and the indication of a possible source of danger. It is essential for every lighting signal that it is detectable in all situations and that it is highly intuitive at any time.

This doctoral thesis studied the potential influence of distinct attributes of tail lights on the road traffic. Accident analysis showed that the majority of rear end crashes could be prevented by an appropriate speed and distance behavior as well as an adequate allocation of attention. Adaptive rear lighting shows potential to improve the perceptibility of the vehicle in poor visibility conditions without excessive glare for the following driver. Evidence from literature shows that the distance estimation between two vehicles could be influenced by the mounting height and the position of tail lights as well as by the brightness of the rear position lamp. Psychological experiments showed the influence of adaptive brightness control in the rear position lamp on the human perception. There was no effect on the distance perception by continuous adjustment of the brightness of the rear position lamp to the distance of the following vehicle. To evaluate the importance of the design of a tail light, two psychophysical experiments were conducted. These experiments showed a minimal influence on the perceived distance between two elements by adding a connection line. Transferred to tail lights, this effect implies a small overestimation of the width of the vehicle rear with connected rear position lamps. This could have a small positive effect on the distance behavior of the following driver due to the sensory illusion of slightly underestimating the distance. Because of the high potential for attention control by light and movement, another series of experiments was conducted, to assess the effect of dynamic light functions. Reaction times were not further improved through the use of dynamic functions in the brake light deactivation. However,

the use of dynamics in the rear position lamp produced different responses as a function of distinct environment variables, the type of movement and the speed of animation. The development of salient and intuitive understandable light functions points out various communication possibilities for use within road traffic. Capturing the attention of other road users in critical situations through tail light functions could lead to an improvement in road safety.

The aim of automotive lighting development is an innovative, universally accepted and safety enhancing tail light design. The dissertation demonstrated the safety requirements for tail lights through accident analysis and different perception experiments. Different attributes and functions of the tail light show the potential to have a positive influence on road safety.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1-1. Elektromagnetisches Spektrum in Anlehnung an Demtröder (2013). ...2

Abbildung 1.1-2. Die ersten Schritte des Wahrnehmungsprozesses in Anlehnung an Goldstein (2015). 6

Abbildung 1.2-1. Überblick über die verschiedenen Strahlungsquellen in Anlehnung an Naumann et al. (2014), Reif (2012) und Witting (2014). 17

Abbildung 4.1-1. Schematische Darstellung der beiden OLED-Displays mit dunkel eingezeichneter Leuchtfläche. 42

Abbildung 4.1-2. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit VP = Versuchsperson. 42

Abbildung 4.1-3. Vergleich zwischen geschätzten und vorgegebenen Distanzen. N = 25. 48

Abbildung 4.1-4. Mittlerer Fehler [%] der Entfernungsschätzung in Abhängigkeit der zu schätzenden Entfernungen und der Distance-Cue-Dichte. N = 25. 49

Abbildung 4.1-5. Mittlerer Fehler [%] der Entfernungsschätzung in Abhängigkeit der zu schätzenden Entfernungen und der Schlusslichtfunktion. N = 25. 49

Abbildung 4.1-6. Gemittelte Lichtstärken [cd], die in Abhängigkeit der Distanz (15.0 m, 35.0 m, 55.0 m, 75.0 m) und der Distance-Cue-Dichte (maximal reduziert, leicht reduziert) als zu hell und zu dunkel beurteilt wurden. N = 25. 51

Abbildung 4.2-1. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. 59

Abbildung 4.2-3. Boxplots der Entscheidungsaufgabe. Die eingezeichnete Linie entspricht der Größe des Standardreizes von 315 px. N = 34. 66

Abbildung 5.1-1. Schematische Darstellung der beiden OLED-Displays. 72

Abbildung 5.1-2. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für Studie 1 (links) und 2 (rechts). 74

Abbildung 5.1-3. Mittlere Reaktionszeiten [ms] in Abhängigkeit von Deaktivierungsart (statisch; teildynamisch) und Blickwinkel (fokal; peripher) in Studie 1. N = 32. 75

Abbildung 5.1-4. Mittlere Reaktionszeiten [ms] in Abhängigkeit von Deaktivierungsart (statisch; teildynamisch) und Blickwinkel (fokal; peripher) in Studie 2. N = 32. 77

Abbildung 5.2-1. Schematische Darstellung der beiden OLED-Displays mit dunkel eingezeichneter Leuchtfläche. 84

Abbildung 5.2-2. Schematische Darstellung der Dynamiken 1 bis 8 (linkes Display). ...85

Abbildung 5.2-3. Relative Häufigkeiten [%] für die subjektive Bewertung der Dringlichkeit. N = 31. 87

Abbildung 5.2-4. Relative Häufigkeiten [%] für die subjektive Bewertung der Sichtbarkeit. N = 31. 88

Abbildung 5.2-5. Relative Häufigkeiten [%] für die subjektive Bewertung der Aufmerksamkeitsanziehung. N = 31. 90

Abbildung 5.2-6. Relative Häufigkeiten [%] für die subjektive Bewertung des Informationsgehalts. N = 31. 90

Abbildung 5.2-7. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit VL = Versuchsleiter und VP = Versuchsperson. 93

Abbildung 5.2-8. Schematische Darstellung der Dynamik 1. 95

Abbildung 5.2-9. Schematische Darstellung der Dynamik 2 (linkes Display). 96

Abbildung 5.2-10. Boxplots der subjektiven Bedeutung. N = 42. 98

Abbildung 5.2-11. Relative Häufigkeiten [%] für die subjektive Bewertung der Dringlichkeit. N = 42. 99

Abbildung 5.2-12. Relative Häufigkeiten [%] für die subjektive Bewertung der Sichtbarkeit. N = 42. 99

Abbildung 5.2-13. Relative Häufigkeiten [%] für die subjektive Bewertung der Aufmerksamkeitsanziehung. N = 42. 100

Abbildung 5.2-14. Mittelwerte der Reaktionszeiten [s] mit Fehlerindikatoren (Standardabweichungen) aufgeteilt nach Versuchsbedingungen. N = 37. 104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1-1. Überblick über die lichttechnischen Größen, ihre Formelzeichen und Einheiten in Anlehnung an Carraro (2009). 3

Tabelle 1.1-2. Rezeptoren im Auge in an Anlehnung an Myers (2014). 7

Tabelle 1.1-3. Tagsehen, Dämmerungssehen und Nachtsehen in Anlehnung an Reif (2012). 8

Tabelle 1.1-4. Beispiele für physikalische, perzeptive und kognitive Filter in Anlehnung an Schlag et al. (2009). 11

Tabelle 1.2-1. Historische Entwicklung von Heckleuchten in Anlehnung an Moore & Rumar (1999). 14

Tabelle 4.1-1. Überblick über die wichtigsten Tiefenkriterien der vorliegenden Studie. .43

Tabelle 4.1-2. Ergebnisse der Reliabilitätsanalyse. N = 25. 47

Tabelle 4.1-3. Deskriptive Betrachtung der Entfernungsschätzungen. N = 25. 48

Tabelle 4.2-1. Acht verschiedene Versionen des Verschiebeexperiments. 60

Tabelle 4.2-2. Acht verschiedene Versionen der Entscheidungsaufgabe. 61

Tabelle 4.2-3. Beispielhafter Ablauf und Ergebnisse einer Versuchsperson für das Entscheidungsexperiment. 62

Tabelle 4.2-4. Ergebnisse des Verschiebeexperiments. N = 34. 64

Tabelle 4.2-5. Ergebnisse Entscheidungsaufgabe. N = 34. 65

Tabelle 5.2-1. Relative Häufigkeiten [%] der frei assoziierten inhaltlichen Bedeutungen der acht verschiedenen Animationen. N = 31. 87

Tabelle 5.2-2. Mittelwerte und Standardabweichungen für die Eigenschaftsbewertung der Dynamiken auf einer 7-stufigen Skala von stimme absolut nicht zu (−3) bis stimme absolut zu (+3). N = 31. 89

Tabelle 5.2-3. Relative Häufigkeiten [%] der Bewertungen der inhaltlichen Bedeutung der acht verschiedenen Animationen. N = 31. 91

Tabelle 5.2-4. Relative Häufigkeiten [%] der Reaktionen aufgeteilt nach Hits, Falses und Misses. N = 42. 101

Tabelle 5.2-5. Mittelwerte, Standardfehler und 95%-Konfidenzintervalle der Reaktionszeiten [s]. N = 42. 102

Inhaltverzeichnis

DANKSAGUNG I

ZUSAMMENFASSUNG III

SUMMARY V

ABBILDUNGSVERZEICHNIS VII

TABELLENVERZEICHNIS IX

INHALTVERZEICHNIS X

1 EINLEITUNG 1

1.1 Licht 2
1.1.1 Lichttechnische Grundlagen 3
1.1.2 Wahrnehmungspsychologische Grundlagen 5
1.1.3 Die Rolle von Licht im Straßenverkehr 10
1.2 Heckleuchten 13
1.2.1 Historische Entwicklung 13
1.2.2 Beleuchtungs- und Signaleinrichtungen im Fahrzeugheck (UN/ ECE) 15
1.2.3 Lichtquellen 17
1.3 Verkehrssicherheit durch Information und Interaktion 19

2 FORSCHUNGSZIELE DER DISSERTATION 22

2.1 Forschungsziel 1: Untersuchung der Rolle von Heckleuchten bei Auffahrunfällen 22
2.2 Forschungsziel 2: Untersuchung der Beeinflussungsmöglichkeiten des Abstandsverhalten durch Heckleuchten 23
2.3 Forschungsziel 3: Untersuchung der Möglichkeiten der Aufmerksamkeitssteuerung durch Heckleuchten 24

3 DIE ROLLE VON HECKLEUCHTEN BEI AUFFAHRUNFÄLLEN 26

3.1 Nutzerzentrierte Ansätze in der automobilen Lichtentwicklung 26
3.2 Analyse von Auffahrunfällen 27
3.2.1 Unfallbeschreibung 27
3.2.2 Betrachtung potenzieller Risiko- und Schutzfaktoren 28
3.2.2.1 Sichtbarkeit des Unfallgegners 28
3.2.2.2 Verkehrsaufkommen 30
3.2.2.3 Psychologische und physiologische Einflussfaktoren 31
3.3 Verkehrssicherheit durch Heckleuchten 34
3.4 Zusammenfassung 36

4 BEEINFLUSSUNG DES ABSTANDSVERHALTENS DURCH HECKLEUCHTEN ...37

4.1 Helligkeitsadaption im Schlusslicht und ihr Einfluss auf Distanzschätzungen von Fahrzeuglenkern 37
4.1.1 Forschungsfrage 40
4.1.2 Methode 41
4.1.2.1 Stichprobe 41
4.1.2.2 Versuchsaufbau 41
4.1.2.3 Studiendesign 43
4.1.2.4 Versuchsablauf 45
4.1.3 Ergebnisse 46
4.1.3.1 Ergebnisse der Entfernungsschätzungen 46
4.1.3.2 Ergebnisse des subjektiven Helligkeitsempfindens 50
4.1.3.3 Ergebnisse der Nachbefragung 51
4.1.4 Diskussion 52
4.1.4.1 Einfluss einer adaptiven Heckleuchte auf die Entfernungsschätzung 52
4.1.4.2 Einfluss der Distanz auf das Helligkeitsempfinden 52
4.1.4.3 Schlussfolgerungen 53
4.1.4.4 Einschränkungen und Ausblick 54
4.2 Einfluss der Heckleuchtengestaltung auf die Distanzwahrnehmung 55
4.2.1 Klassische Methoden der Psychophysik 55
4.2.2 Anwendung der psychophysikalischen Methoden auf die Forschungsfrage 57
4.2.3 Methode 58
4.2.3.1 Stichprobe 58
4.2.3.2 Versuchsaufbau 58

4.2.3.3 Aufgabenstellung und Versuchsablauf ... 59
4.2.3.3.1 Verschiebeexperiment (Herstellungsmethode) ... 59
4.2.3.3.2 Entscheidungsaufgabe (Grenzwertmethode) ... 61
4.2.4 Ergebnisse ... 63
4.2.4.1 Ergebnisse des Verschiebeexperiments (Herstellungsmethode) ... 63
4.2.4.2 Ergebnisse der Entscheidungsaufgabe (Grenzwertmethode) ... 64
4.2.5 Diskussion ... 66
4.2.5.1 Diskussion der Ergebnisse des Verschiebeexperiments ... 66
4.2.5.2 Diskussion der Ergebnisse der Entscheidungsaufgabe ... 67
4.2.5.3 Übertragung der Ergebnisse auf Heckleuchten ... 67

5 AUFMERKSAMKEITSSTEUERUNG DURCH HECKLEUCHTEN ... 70

5.1 Potenzial innovativer Heckleuchten zur Unfallvermeidung ... 70
5.1.1 Analyse von Auffahrunfällen ... 71
5.1.2 Teildynamische Deaktivierung des Bremslichts ... 72
5.1.2.1 Forschungsfrage ... 72
5.1.2.2 Methode ... 73
5.1.2.2.1 Stichprobe ... 73
5.1.2.2.2 Studiendesign ... 73
5.1.2.3 Ergebnisse ... 74
5.1.2.3.1 Ergebnisse aus Studie 1 ... 75
5.1.2.3.2 Ergebnisse aus Studie 2 ... 76
5.1.2.4 Diskussion ... 77
5.1.3 Dynamisches Schlusslicht zur Aufmerksamkeitssteuerung ... 78
5.1.4 Potenzial von Heckleuchten zur Vermeidung von Auffahrunfällen ... 79
5.2 Effekte dynamischer Schlusslichtfunktionen auf die Wahrnehmung ... 81
5.2.1 Forschungsfrage ... 82
5.2.2 Experiment 1 ... 83
5.2.2.1 Methode ... 83
5.2.2.1.1 Stichprobe ... 83
5.2.2.1.2 Versuchsaufbau ... 83
5.2.2.1.3 Aufgabenstellung ... 84
5.2.2.1.4 Versuchsablauf ... 86
5.2.2.2 Ergebnisse ... 86

5.2.2.2.1 Spontane Assoziationen und freie Bedeutungsbewertung ... 86
5.2.2.2.2 Bedeutung und Wirkung der Dynamiken ... 88
5.2.2.3 Diskussion ... 91
5.2.3 Experiment 2 ... 92
5.2.3.1 Methode ... 92
5.2.3.1.1 Stichprobe ... 92
5.2.3.1.2 Versuchsaufbau ... 92
5.2.3.1.3 Aufgabenstellung ... 93
5.2.3.1.4 Studiendesign ... 94
5.2.3.1.5 Versuchsablauf ... 97
5.2.3.2 Ergebnisse ... 98
5.2.3.2.1 Bedeutungsbewertung ... 98
5.2.3.2.2 Analyse der subjektiven Bewertung und der Reaktionszeiten ... 99
5.2.3.3 Diskussion ... 105
5.2.4 Allgemeine Diskussion ... 105
5.2.4.1 Anwendungskontext ... 106
5.2.4.2 Einschränkungen ... 106
5.2.4.3 Fortsetzung des Ansatzes ... 108

6 IMPLIKATIONEN UND SCHLUSSFOLGERUNGEN ... 110

6.1 Zusammenfassung der Befunde ... 110
6.2 Theoretische und praktische Implikationen ... 114
6.3 Kritische Reflexion der Studienmethodik ... 115
6.4 Zusammenfassung und Ausblick ... 117

7 LITERATUR ... 119

8 ANHANG ... 130

8.1 Lebenslauf ... 130
8.2 Publikationen ... 132
8.3 Eidesstattliche Erklärung ... 133

1 Einleitung

Vorsprung durch Technik. Der Slogan von Audi verrät einen hohen Anspruch an die Innovationskraft des Unternehmens. Bei der Entwicklung innovativer Produkte ist es entscheidend, die Möglichkeiten neuer Technologien so auszunutzen, dass die Anforderungen des Nutzers erfüllt werden. Dabei muss die Innovation dem Kunden und weiteren Verkehrsteilnehmern einen neuen Nutzen stiften und ihren Bedürfnissen und Ansprüchen entsprechen. Die Anforderungen an innovative Lichtsysteme sind vielschichtig und komplex und bedürfen daher einer detaillierten Analyse.

Eine Heckleuchte muss beispielsweise in jeder Situation und aus allen Betrachtungswinkeln gut für den Hinterherfahrenden erkennbar sein, ohne ihn zu blenden. Zusätzlich ist ein intuitives Verständnis für die verschiedenen Funktionen der Heckleuchte (z.B. Schlusslicht, Bremslicht, Nebelschlusslicht, Blinklicht und Rückfahrlicht) unabdingbar. Neben solchen sicherheitsrelevanten Anforderungen steht auch das Aussehen der Heckleuchten im Fokus des Kunden. Das Design einer Leuchte ist ein wichtiges, individuelles Merkmal eines Fahrzeugs, wodurch sich schon aus der Ferne verschiedene Modelle eindeutig voneinander differenzieren lassen. Um Sicherheit im Straßenverkehr gewährleisten zu können, müssen Innovationen immer die gesetzlichen Bestimmungen erfüllen und kompatibel zum aktuellen Straßenverkehr sein. So wird darauf geachtet, dass sich Heckleuchten überall auf der Welt in ihrer Funktion gleichen und intuitiv verständlich bleiben. Deshalb scheut man sich davor, ein etabliertes System, wie das der Heckleuchten grundlegend zu verändern, da die Bedeutung abstrakter Signale zunächst gelernt werden muss, um nach einiger Zeit schnelle und automatische Reaktionen hervorrufen zu können (Moore & Rumar, 1999). Eine größere Revolution in der Gestaltung von Heckleuchten, wie beispielsweise die Einführung einer hochgesetzten Bremsleuchte (siehe Kapitel 1.2.1 und 1.2.2), braucht daher gute Gründe und die neue Gestaltungsform muss auf lange Sicht überall auf der Welt eingesetzt und verstanden werden.

Ziel in der Lichtentwicklung muss daher eine innovative, allgemein akzeptierte und sicherheitsfördernde Heckleuchtengestaltung sein. Um die vielschichten Anforderungen an neuartige Heckleuchten erfüllen zu können, müssen bei der Entwicklung Ingenieure, Designer, Elektroniker und Psychologen eng zusammenarbeiten, um so die Komplexität des Themenfelds durch Interdisziplinarität lösen zu können. Das folgende Kapitel gibt einen kurzen Einblick in die wichtigsten Grundlagen des interdisziplinären Fachbereichs der automobilen Lichtentwicklung.

1.1 Licht

Was ist eigentlich Licht? Licht sind Wellen im elektromagnetischen Feld (Lemmer, Bahr, & Piccolo, 2017). Diese elektromagnetische Strahlung besteht aus kleinen Teilchen, sogenannten Photonen, die wiederum verschieden große Energiepakete bilden (Goldstein, 2015; Lemmer et al., 2017). Licht verhält sich somit in mancher Hinsicht wie eine Welle und in anderer Hinsicht wie ein Teilchen (Pinel & Pauli, 2007). Dabei unterscheiden sich die elektromagnetischen Wellen in ihrer Frequenz und in ihrer Energiemenge (Lemmer et al., 2017). Je kürzer die Wellenlänge von Licht ist, desto mehr Energie ist in der elektromagnetischen Welle gespeichert (Lemmer et al., 2017). Abbildung 1.1-1 gibt einen Überblick über das elektromagnetische Spektrum.

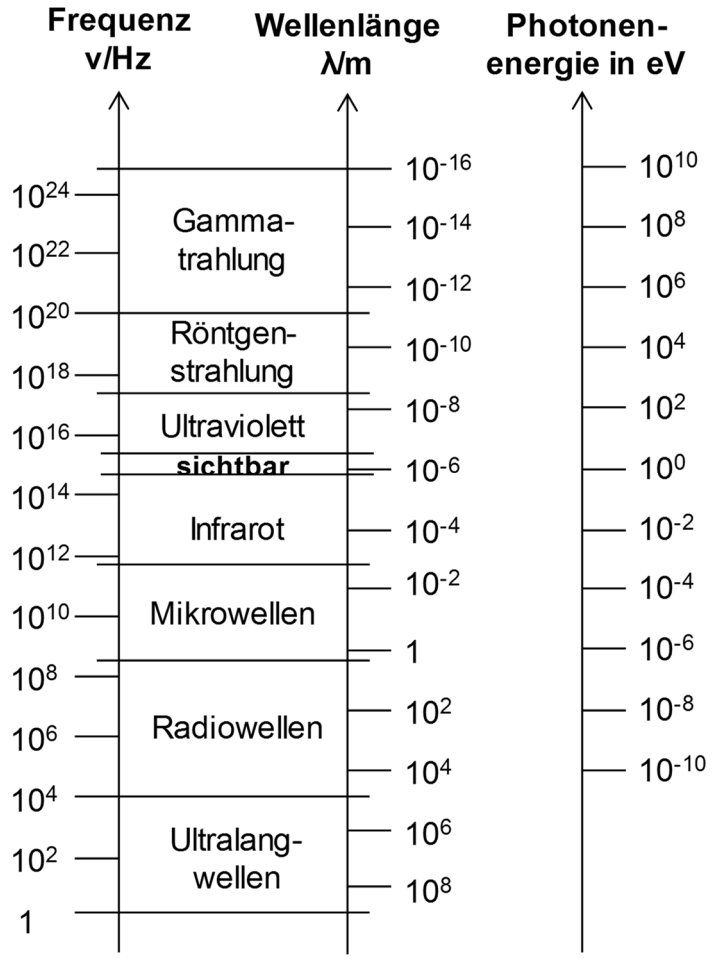

Abbildung 1.1-1. Elektromagnetisches Spektrum in Anlehnung an Demtröder (2013).

„Mit Licht wird der Bereich elektromagnetischer Strahlung bezeichnet, der im Auge eine Hellempfindung hervorrufen kann und daher sichtbar ist“ (Schlag, Petermann, Weller, & Schulze, 2009, S. 17). Der Bereich zwischen 380 nm und 780 nm des elektromagnetischen Wellenspektrums entspricht der für den Menschen sichtbaren

Strahlung (Witting, 2014). Genau genommen ist dabei nicht das Licht sichtbar, sondern das Material, auf das das Licht trifft (Witting, 2014). Die spektrale Hellempfindlichkeits-Kurve, auch als V(λ)-Kurve bezeichnet, gibt an, wie hell Strahlungen derselben Intensität, aber unterschiedlicher Wellenlängen, dem Auge erscheinen (Pinel & Pauli, 2007; Witting, 2014). Die Hellempfindlichkeit des Sehapparats ist, neben der Wellenlänge, auch vom allgemeinen Helligkeitsniveau abhängig. So verschiebt sich die V(λ)-Kurve für das mesopische oder Dämmerungssehen und das skotopische oder Nachtsehen jeweils etwas nach links in den Bereich niedrigerer Wellenlängen (Witting, 2014).

1.1.1 Lichttechnische Grundlagen

Um Licht objektiv messbar zu machen, muss eine Brücke zwischen Mensch und Physik geschlagen werden (Witting, 2014). Im Folgenden sollen die physikalischen Grundgrößen Raumwinkel, Lichtstrom, Lichtstärke, Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte kurz beschrieben werden sowie auf die Farbtemperatur und Reflexionseigenschaften eingegangen werden. Tabelle 1.1-1 gibt einen Überblick über die Formelzeichen und Einheiten der lichttechnischen Größen.

Tabelle 1.1-1. Überblick über die lichttechnischen Größen, ihre Formelzeichen und Einheiten in Anlehnung an Carraro (2009).

Lichttechnische Größe	Einheit	Formelzeichen
Raumwinkel	Steradiant (sr)	Ω
Lichtstrom	Lumen (lm)	Φ
Lichtstärke	Candela (cd)	I
Beleuchtungsstärke	Lux (lx)	E
Leuchtdichte	cd/m²	L
Farbtemperatur	Kelvin (K)	

Licht breitet sich in der Regel nie in einer Ebene, sondern in einem Raum aus (Witting, 2014). Das dreidimensionale, räumliche Gegenstück des ebenen Winkels ist der sogenannte Raumwinkel (Carraro, 2009). Der Raumwinkel hilft dabei, die Lichtausbreitung zu beschreiben und ist somit genau genommen keine lichttechnische Größe (Carraro, 2009). Um den Winkel zu berechnen, wird der Flächeninhalt A einer Kugeloberfläche durch das Quadrat des Radius r der Kugel geteilt (Witting, 2014).

Die abgestrahlte Lichtmenge wird in Lumen angegeben. Sie beschreibt wie viel Licht insgesamt, unabhängig von der Richtung, von einer Lichtquelle abgegeben

wird (Carraro, 2009; Schlag et al., 2009). Der Lichtstrom wird als die gesamte Strahlungsleistung definiert, die von einer Lichtquelle in alle Richtungen des Raumes ausgeht (Witting, 2014). In der automobilen Lichttechnik findet die Angabe des Lichtstroms seine Anwendung in der Beschreibung der Performance von Scheinwerfern (Hamm, 2017).

Die Lichtmenge, die in eine bestimmte Richtung abgegeben wird, lässt sich mit der Lichtstärke angeben. Sie berechnet sich aus dem Verhältnis von Lichtstrom und Raumwinkel (Carraro, 2009; Witting, 2014) und ist damit eine richtungsabhängige Größe (Witting, 2014). Sie gilt als Maß für die Intensität des Lichts, das von einer Lichtquelle in eine bestimmte Richtung in den Raum abgegeben wird (Schlag et al., 2009). Die Angabe der Lichtstärke wird für die Charakterisierung von Rückleuchten, Signalleuchten und Scheinwerfern (USA) genutzt (Hamm, 2017).

Die Beleuchtungsstärke gibt in der Maßeinheit Lux das auf eine Fläche auftretende Licht an (Witting, 2014). Sie wird durch das Verhältnis von Lichtstrom und beleuchteter Fläche beschrieben (Carraro, 2009; Witting, 2014) und nimmt mit dem Quadrat des Abstands zur Lichtquelle ab (Witting, 2014). Wie hell eine Fläche unter einem bestimmten Beobachtungswinkel erscheint, ist jedoch stark vom Reflexionsgrad des Materials abhängig, auf welches das Licht fällt. Die Beleuchtungsstärke wird zur Beschreibung der Performance von Scheinwerfern (Abblendlicht und Fernlicht) herangezogen (Hamm, 2017).

Die Leuchtdichte gilt als maßgebende Größe für den Helligkeitseindruck (Carraro, 2009). „Sie ist definiert als jener Lichtstromanteil, der in eine vorgegebene Richtung in ein Raumwinkelelement, bezogen auf die scheinbar leuchtende Fläche, einfällt“ (Witting, 2014, S. 96). Mithilfe der Leuchtdichte kann die Helligkeit und die Homogenität einer Leuchtfläche am Fahrzeug beschrieben werden (Hamm, 2017).

Die Lichtstrahlung kann zusätzlich durch ihre Farbtemperatur charakterisiert werden (Witting, 2014). Die verwendete Temperaturskala ist die Kelvin-Skala. Dabei ist zu beachten, dass ein kühler Körper durch eine niedrige Farbtemperatur beschrieben wird und dabei „warmes“ (eher rötliches) Licht abstrahlt (Witting, 2014). „Kaltes“ (eher bläuliches) Licht wird durch Körper mit hoher (Farb-)Temperatur abgegeben (Witting, 2014). Strahlt eine künstliche Lichtquelle warmweißes bis weißes Licht ab, dann bedeutet dies, dass sie einen Großteil des sichtbaren Spektrums erfasst (Witting, 2014). In der automobilen Lichttechnik wird die Farbtemperatur für die Charakterisierung von Lichtquellen verwendet (Hamm, 2017).

Der Farb- und Helligkeitseindruck eines Gegenstandes hängt außerdem von den Reflexionseigenschaften der Oberfläche sowie von der Fähigkeit zur Absorption von Licht (bzw. von Wellenlängen) ab (Witting, 2014). Die Transmission ist dabei eine Größe für die Durchlässigkeit eines Materials für elektromagnetische Wellen (Witting, 2014). In Abhängigkeit des Reflexions- und Transmissionsgrades einer Oberfläche, muss eine unterschiedlich hohe Beleuchtungsstärke auftreten, damit die gleiche Helligkeit (Leuchtdichte) erzielt werden kann (Witting, 2014). Durch die Wechselwirkung von Licht mit den verschiedenen Oberflächen in unserer Umwelt erhalten wir Informationen über unsere Umgebung (Witting, 2014).

1.1.2 Wahrnehmungspsychologische Grundlagen

Mit den beschriebenen lichttechnischen Maßen lässt sich Licht zwar objektiv messen, doch müssen in der Lichtentwicklung auch die Empfindungen des Menschen abgebildet werden (Witting 2014). Wir nehmen mit verschiedenen Sinnen unsere Umwelt wahr. Dabei ist insbesondere unsere visuelle Wahrnehmung extrem leistungsfähig. So können mithilfe von fast einer Million Ganglienfasern ungefähr ebenso viele Informationen zeitgleich übertragen werden (Myers, 2014). Im Vergleich dazu besteht der Hörnerv aus nur etwa 30.000 Nervenfasern (Myers, 2014). “Das visuelle System fertigt [jedoch] keine genaue innere Kopie der äußeren Welt an. Es leistet viel mehr. Es erschafft aus den kleinen, verzerrten, auf dem Kopf stehenden, zweidimensionalen Netzhautbildern, die auf die visuellen Rezeptoren projiziert werden, die die Rückseite der Augen auskleiden, eine genaue, sehr detaillierte, dreidimensionale Wahrnehmung“ (Pinel & Pauli, 2007, S. 166).

So brachte die Komplexität des Auges selbst Darwin zum Staunen: „Die Annahme, dass […] das Auge mit allen seinen der Nachahmung unerreichbaren Vorrichtungen, um den Focus den manchfaltigsten Entfernungen anzupassen, verschiedene Licht-Mengen zuzulassen und die sphärische und chromatische Abweichung zu verbessern, nur durch Natürliche Züchtung zu dem geworden seye, was es ist, scheint, ich will es offen gestehen, im höchsten Grade absurd zu seyen“ (Darwin, 1860, S. 196). Nach eingehender Analyse kam er jedoch zu dem Schluss, dass auch das Auge einer evolutionären Entwicklung unterlegen haben musste (Welsch & Liebmann, 2012).

Evolutionär betrachtet ist die älteste Form des Sehens vor 570 bis 500 Millionen Jahren entstanden und befähigte Tiere zur Unterscheidung verschiedener Helligkeiten (Goldstein, 2015). Das dichromatische Tagsehen wurde möglich, indem Pigmente gebildet wurden, die hauptsächlich im kurzwelligen Bereich und andere, die

eher im langweiligen Bereich absorbieren (Welsch & Liebmann, 2012). Diese sogenannten Sehpigmente (wie z.B. Rhodopsin in den Stäbchen der Netzhaut) sind lichtempfindliche Substanzen, die durch einfallendes Licht ihre Struktur verändern (Ansorge & Leder, 2011; Goldstein, 2015). Durch diese Isomerisierung werden elektrische Signale in den Rezeptoren erzeugt (Goldstein, 2015). Das trichromatische Farbensehen entstand erst vor 30 Millionen Jahren, durch eine weitere Aufspaltung in rot- und grünempfindliche Zapfenpigmente (Welsch & Liebmann, 2012).

Der Prozess des Sehens beginnt mit dem Licht, das auf Objekte unserer Umgebung trifft. Dabei wird das Licht von einem Gegenstand reflektiert und fällt durch die Pupille, eine Öffnung der Iris, ins Auge (Goldstein, 2015; Pinel & Pauli, 2007). Die Iris besteht aus ringförmigen kontrahierbaren Muskeln, die die eintreffende Lichtmenge regulieren (Pinel & Pauli, 2007). Die Fokussierung des Lichts auf der Retina (der Netzhaut aus Neuronen) geschieht durch die Cornea (die transparente Hornhaut mit 80 % der Brechkraft) und durch die Linse direkt hinter der Pupille (mit 20 % der Brechkraft) (Goldstein, 2015; Pinel & Pauli, 2007). Die Ziliarmuskeln regulieren die Zugkraft der sogenannten Ligamente (Zonulafasern) und wirken so auf die Form und damit wiederum auf die Brechkraft der Linse (Pinel & Pauli, 2007). Rezeptoren, Horizontalzellen, Bipolarzellen, amakrine Zellen und retinale Ganglienzellen bilden die Retina (Pinel & Pauli, 2007). Nachdem das Licht die anderen vier Schichten passiert hat, erreicht es die Rezeptorschicht und aktiviert dort die Rezeptoren (Pinel & Pauli, 2007). Durch diese visuelle Transduktion oder Phototransduktion wird das Licht in Elektrizität umgewandelt und als neuronale Botschaft wieder durch die Netzhautschichten zu den retinalen Ganglienzellen geschickt (Goldstein, 2015; Pinel & Pauli, 2007). Der Ablauf dieser ersten Wahrnehmungsschritte ist in Abbildung 1.1-2 dargestellt.

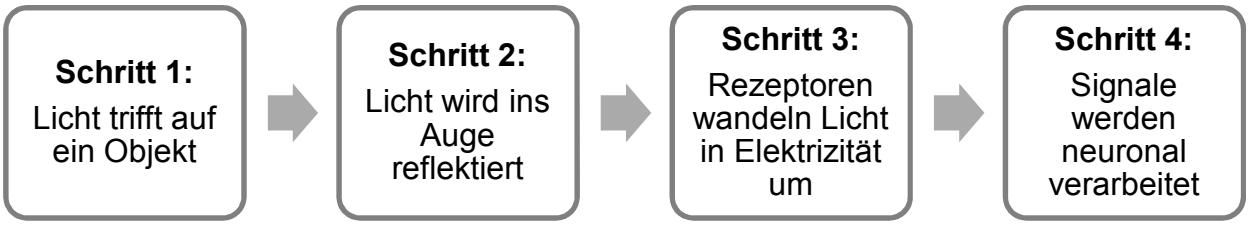

Abbildung 1.1-2. Die ersten Schritte des Wahrnehmungsprozesses in Anlehnung an Goldstein (2015).

Die Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie findet in den Rezeptoren statt (Goldstein, 2015). Die Retina enthält zwei Arten von Rezeptoren: die Zapfen und die Stäbchen (siehe Tabelle 1.1-2). In dem Bereich der Fovea centralis, dem Punkt des schärfsten Sehens, sind ausschließlich Zapfen vorhanden (Goldstein, 2015;

Pinel & Pauli, 2007). Ungefähr ein Viertel des primären visuellen Cortex wird zur Analyse der Informationen aus diesem, doch nur relativ kleinen Teil der Retina, benötigt (Pinel & Pauli, 2007). In der peripheren Retina sind sowohl Zapfen als auch Stäbchen vorhanden (Goldstein, 2015). Bei ausreichender Menge an Umgebungslicht wird durch das zapfenvermittelte Sehen (skotopisches Sehen) eine detaillierte und farbige Wahrnehmung ermöglicht (Pinel & Pauli, 2007). Eine schwächere Beleuchtung kann die Zapfen jedoch nicht hinreichend erregen (Pinel & Pauli, 2007). Hierbei weisen die Stäbchen eine höhere Sensitivität auf und ermöglichen das sogenannte skotopische Sehen (Pinel & Pauli, 2007). Dieses ist allerdings weniger detailgenau und ermöglicht kein Farbensehen (Pinel & Pauli, 2007). Die elektrischen Signale verlassen das Auge über den Sehnerv und werden zum Gehirn weitergeleitet (Goldstein, 2015). An dieser Stelle der Retina, dem sogenannten blinden Fleck, befinden sich keine Rezeptoren (Goldstein, 2015).

Tabelle 1.1-2. Rezeptoren im Auge in an Anlehnung an Myers (2014).

	Zapfen	**Stäbchen**
Anzahl	6 Millionen	120 Millionen
Verteilung auf der Netzhaut	Zentrum	Peripherie
Dämmerungsempfindlichkeit	Gering	Hoch
Farbempfindlichkeit	Ja	Nein
Detailempfindlichkeit	Ja	Nein

Die unterschiedlichen Sehpigmente in den Zapfen und Stäbchen führen zu verschiedenen Wahrnehmungsleistungen (Goldstein, 2015). Ändern sich die Beleuchtungsverhältnisse, so gibt es zwei Formen der Adaption: Eine Anpassung der Pupillengröße sowie eine Anpassung über die Rezeptoren (Hagendorf, Krummenacher, Müller, & Schubert, 2011). Letzteres läuft in zwei Stufen ab: Bei einer visuellen Adaption an eine geringere Helligkeit (Dunkeladaption) sind zunächst (die ersten 3–4 Minuten) die Zapfen aktiv, bis anschließend die Stäbchen übernehmen (Hagendorf et al., 2011). Die maximale Empfindlichkeit wird bei den Stäbchen erst nach 20–30 Minuten erreicht (Hagendorf et al., 2011). Der sogenannte Kohlrausch-Knick kennzeichnet den Übergang vom Zapfen- zum Stäbchensehen (Müsseler & Rieger, 2017). Die spektrale Hellempfindlichkeit des Auges wird in Abhängigkeit des Helligkeitsniveaus in Tabelle 1.1-3 dargestellt.

Tabelle 1.1-3. Tagsehen, Dämmerungssehen und Nachtsehen in Anlehnung an Reif (2012).

Bereich	**Leuchtdichte**	**Maximum**	**Aktive Rezeptoren**
Tagsehen (Photopisches Sehen)	> 10^1 [cd/m²]	555 [nm]	Zapfen (ca. 5 x 10^6)
Dämmerungssehen (Mesopisches Sehen)	10^1–10^{-2} [cd/m²]	555–507 [nm]	Zapfen, Stäbchen
Nachtsehen (Skotopisches Sehen)	< 10^{-3} [cd/m²]	507 [nm]	Stäbchen (ca. 1,2 x 10^8)

Das Sehen meint genau genommen lediglich eine Reaktion von Lebewesen auf Licht (Witting, 2014). Die Wahrnehmung beschreibt zusätzlich die Verarbeitung des Lichtreizes und das Ergebnis dieses Prozesses (Kirschbaum, 2008). Sie lässt sich grob in zwei Phasen aufteilen: Der Empfindung (Englisch: sensation) folgt die Wahrnehmung (Englisch: perception) (Myers, 2014; Pinel & Pauli, 2007). Die Empfindung ist ein Prozess, der dafür sorgt, dass wir einen Reiz in der Umwelt entdecken und aufnehmen können (Myers, 2014; Pinel & Pauli, 2007). Diese empfangenen Informationen werden dann integriert, erkannt und interpretiert (Myers, 2014; Pinel & Pauli, 2007). Unser sensorisches System ist hierarchisch nach der Spezifität und Komplexität seiner Funktionen aufgebaut (Pinel & Pauli, 2007). Die Informationen werden dabei parallel und auf unterschiedliche Arten im neuronalen Netzwerk verarbeitet und analysiert (Pinel & Pauli, 2007).

Es ist uns nicht möglich, alle Reize der Umwelt bewusst wahrzunehmen. Die sogenannte selektive Aufmerksamkeit sorgt dafür, dass bestimmte Reize unsere Sinne erregen und andere ignoriert werden (Pinel & Pauli, 2007). Blicksprünge, die sogenannten sakkadischen Augenbewegungen, dienen der Fixation verschiedener Objekte und stehen daher in einem engen Zusammenhang mit der Orientierung von Aufmerksamkeit (Müsseler & Rieger, 2017; Vollrath & Krems, 2011). Indem wir aus der Flut an verfügbaren Informationen eine relevante Teilmenge auswählen, können wir effektiv mit unserer Umwelt interagieren und Handlungen ausführen (Müsseler & Rieger, 2017). Dabei können wir unsere Aufmerksamkeit durch internale kognitive Prozesse gezielt auf einen Reiz fokussieren (Pinel & Pauli, 2007). Man spricht hierbei von einer endogenen Aufmerksamkeit, welche über top-down Mechanismen vermittelt wird (Pinel & Pauli, 2007). Diese konzeptgesteuerte

Informationsverarbeitung greift bei der Wahrnehmung und Rekonstruktion unserer Umwelt auf Erfahrungen und Erwartungen zurück (Myers, 2014). Aber auch die Außenwelt kann unsere Aufmerksamkeit auf sich ziehen (Pinel & Pauli, 2007). Die exogene Aufmerksamkeit wird dabei durch externale Ereignisse bottom-up vermittelt (Pinel & Pauli, 2007). Man spricht hierbei von einer datengesteuerten Informationsverarbeitung (Myers, 2014). Es werden jedoch auch Reize überwacht, die dem Bewusstsein nicht direkt zugänglich sind (Pinel & Pauli, 2007). Der sogenannte Cocktail-Party-Effekt zeigt, dass die Erwähnung des eigenen Namens in einem fremden Gespräch, dem man vermeintlich gar keine Aufmerksamkeit geschenkt hat, herausgehört werden kann (Müsseler & Rieger, 2017; Pinel & Pauli, 2007). Dies deutet darauf hin, dass eine Vielzahl von Reizen zwar durch unsere Sinnesorgane aufgenommen werden, aber die Botschaften dieser Signale nur zu einem kleinen Teil bewusst wahrgenommen werden können (Müsseler & Rieger, 2017).

„Mittels bottom-up- und top-down-gesteuerter Prozesse wird aus der Integration von Umweltwahrnehmung, Zielen und dem Vorwissen einer Person ein mentales Modell der aktuellen Situation entwickelt (Situationsbewusstsein)“ (Vollrath & Krems, 2011, S. 28). Die Wahrnehmung bildet somit die Umwelt nicht ab, sondern konstruiert aus den verfügbaren und handlungsrelevanten Informationen eine interne Repräsentation unserer wahrgenommenen Welt (Hagendorf et al., 2011). Auf Basis dieses Situationsmodells werden weitere Reize aus der Umwelt gezielt aufgenommen, analysiert und verarbeitet (Vollrath & Krems, 2011), um zielgerichtetes Handeln in der physikalischen Umwelt zu ermöglichen (Hagendorf et al., 2011; Müsseler & Rieger, 2017). So leitet das visuelle System nur bestimmte Schlüsselinformationen zum Cortex (Pinel & Pauli, 2007). Durch Ergänzungsprozesse wird beispielsweise die Farbe und Helligkeit von Oberflächen vervollständigt und muss somit bei großen Objekten nicht komplett aufgenommen werden (Pinel & Pauli, 2007). Aus den Informationen der verschiedenen Sinnesorgane wird eine interne Repräsentation erzeugt. Diese ist modalitätsunabhängig, um den verschiedenen informationsverarbeitenden kognitiven Prozessen, wie dem Denken oder der Sprache, dienen zu können (Hagendorf et al., 2011). Um die Vielfalt an möglichen Interpretationen einzugrenzen und die Informationen zu strukturieren, folgt die Konstruktion der Umwelt bestimmten Regeln und Kausalzusammenhängen (Hagendorf et al., 2011). So werden beispielsweise einzelne Elemente zu Objekten gegliedert, um eine interne Repräsentation zu konstruieren (Anderson, 2013). Dabei folgt die Wahrnehmung

bestimmten Leitlinien, die als Gestaltgesetze der Wahrnehmungsorganisation oder als Gestaltprinzipien bekannt wurden (Anderson, 2013). Dazu zählen das Prägnanzprinzip bzw. das Gesetz der guten Gestalt, das Gesetz der Ähnlichkeit, das Gesetz der Nähe, das Gesetz der Geschlossenheit, das Gesetz des guten Verlaufs und das Gesetz der Vertrautheit (Anderson, 2013; Goldstein, 2015; Hagendorf et al., 2011; Müsseler & Rieger, 2017; Myers, 2014; Raab, Unger, & Unger, 2010). Zusätzlich erfüllen unsere Sinnessysteme bestimmte Wahrnehmungskonstanzleistungen, wie die Größenkonstanz, die Formkonstanz und die Farbkonstanz (Müsseler & Rieger, 2017; Raab et al., 2010).

1.1.3 Die Rolle von Licht im Straßenverkehr

Das visuelle System ist von zentraler Bedeutung für das Autofahren (Schlag et al., 2009) und lässt sich kurz in der Aussage „Fahren ist Sehen“ (Vollrath & Krems, 2011, S. 29) festhalten. Es wird angenommen, dass ein Anteil von 90 % bis 96 % der verkehrsrelevanten Informationen über das Auge empfangen wird (Hills, 1980; Schlag et al., 2009; Woelk, Chmielarz, Grauberg, & Groetzner, 1988). Auch wenn sich in den genannten Quellen keine methodischen Beschreibungen über die Ermittlung dieser Prozentzahlen finden lassen, so geben die Angaben zumindest die Größenordnung, und damit die Bedeutsamkeit des visuellen Systems, wieder (Vollrath & Krems, 2011).

Die gesammelten sensorischen Informationen werden für die Bewältigung zahlreicher Fahraufgaben benötigt: Der Fahrer überwacht die aktuelle Verkehrssituation, er kontrolliert seine Quer- und Längsbeschleunigung, er analysiert Verkehrsschilder, er navigiert zu seinem Ziel, er achtet auf die Einhaltung der Verkehrsregeln, er überwacht das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer und kommuniziert mit ihnen (Lappe et al., 2000; Vollrath & Krems, 2011). Sowohl das foveale wie auch das periphere Sehen spielen eine bedeutende Rolle beim Fahren (Vollrath & Krems, 2011). Mittels peripherer Wahrnehmung wird die Aufmerksamkeit auf Objekte außerhalb des zentralen Blickfeldes gelenkt (Vollrath & Krems, 2011). Das zentrale Sehen erlaubt die Beobachtung der Straße mit ihrem Verlauf und Hindernissen und ist von elementarer Bedeutung für eine angemessene Geschwindigkeits- und Abstandsregulierung sowie die Gefahrenerkennung (Vollrath & Krems, 2011).

Die visuelle Informationsaufnahme beim Fahren wird durch bestimmte Filterungsprozesse beeinflusst (Schlag et al., 2009). Dabei unterscheidet man zwischen drei Arten von Filtern: physikalische, perzeptive und kognitive Filter (siehe Tabelle 1.1-4).

Tabelle 1.1-4. Beispiele für physikalische, perzeptive und kognitive Filter in Anlehnung an Schlag et al. (2009).

Physikalische Filter	Perzeptive Filter	Kognitive Filter
• Dämmerung • Dunkelheit • Nebel, Regen, Schnee • Windschutz-scheiben • Scheinwerfer • Reflexionen auf der Fahrbahn	• Leistungsvermögen des Auges • Physiologische Blendung • Sehvermögen • Alter • Sichtdistanzen • Ermüdung • Alkohol und Drogen	• Entfernungs- und Geschwindigkeits-wahrnehmung • Kapazitätsgrenzen • Ressourcenwahr-nehmung und Motive • Rückmeldungen • Psychologische Blendung

Als Beispiel für physikalische Filter kann die verringerte Umgebungshelligkeit bei Dämmerung und Nacht genannt werden (Schlag et al., 2009). Dabei wird die Sicht auf die aktuelle Verkehrssituation erschwert, das Informationssuchverhalten muss angepasst werden und Blendungseffekte können auftreten (Schlag et al., 2009). Für eine verbesserte Sicht und Sichtbarkeit werden Scheinwerfer und Heckleuchten eingesetzt. Witterungsbedingungen, wie Nebel, Regen und Schnee führen zur Absorption und Streuung des Lichts. Seitens Fahrzeugbeleuchtung kann mit Nebelscheinwerfern und -schlussleuchten sowie adaptiven Systemen der Lichtsteuerung negativen Effekten entgegengewirkt werden (Schlag et al., 2009). Verschmutzte und zerkratzte Windschutzscheiben und Scheinwerfer führen zu einer erhöhten Lichtstreuung und damit zu einer schlechteren Sicht und größeren Blendungsgefahr (Schlag et al., 2009). Reinigungsanlagen für Windschutzscheiben und Scheinwerfer helfen diesen Filtereffekten entgegen zu wirken. Neben physikalischen Barrieren spielt auch die menschliche Physiologie eine entscheidende Rolle für die visuelle Wahrnehmung im Straßenverkehr (Schlag et al., 2009). So müssen Reize eine bestimmte Schwelle (Intensität) überschreiten, um eine Empfindung in unserem visuellen System auslösen zu können. Diese Schwellenkontraste, wie auch die menschliche Sehschärfe, variieren jedoch in Abhängigkeit verschiedener Personen- und Situationseigenschaften (Schlag et al., 2009). Das Auge verfügt über eine hohe Adaptations- und Anpassungsfähigkeit an verschiedene Leuchtdichten, Sichtbedingungen und Entfernungen (Schlag et al., 2009). Die physiologische Blendung durch „zu hohe

absolute Leuchtdichten, zu große Leuchtdichteunterschiede oder durch eine inhomogene Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld“ (Schlag et al., 2009, S. 32) führt zu einer Verschlechterung der Sehleistung. Ein ausreichendes Seh- und Reaktionsvermögen und eine gute Ausleuchtung des Straßenraums sind wichtig für die perzeptive Wahrnehmung (Schlag et al., 2009). Die kognitiven Filter können sich auf eine adäquate interne Repräsentation der äußeren Umwelt negativ auswirken (Schlag et al., 2009). „Kognitive Grenzen der wahrnehmungsbezogenen Informationsverarbeitung beim Kraftfahren beziehen sich im Wesentlichen auf Probleme der Entfernungs- und Geschwindigkeitswahrnehmung, auf die Blicksteuerung, Kapazitätsgrenzen, die Wahrnehmung der eigenen Ressourcen und Motive, angemessene Rückmeldungen und die psychologische Blendung“ (Schlag et al., 2009, S. 49).

Licht ist Information. Mithilfe des Lichts können wir unsere Umwelt visuell erfassen und die Informationen in eine interne Repräsentation umwandeln. Im Straßenverkehr sind Fahrzeuge mit verschiedenen Leuchten ausgestattet, die unterschiedliche Aufgaben erfüllen. So dienen die Scheinwerfer mit ihrem Abblend- und Fernlicht hauptsächlich der Sicht des Fahrers, indem sie die Fahrbahn vor dem Fahrzeug ausleuchten (United Nations, 2013a). Zusätzlich verbessern sie die Sichtbarkeit des Fahrzeugs für entgegenkommenden Verkehrsteilnehmer. Eine Ähnliche Funktion erfüllen auch die Heckleuchten, indem sie mithilfe des Schlusslichts das Vorhandensein und die Breite des Fahrzeugs anzeigen (United Nations, 2013a). Die Bremsleuchte zeigt eine Verzögerung des Fahrzeugs nach hinten an (United Nations, 2013a). Der Fahrtrichtungsanzeiger („Blinker“) kündigt einen Fahrtrichtungswechsel nach rechts oder links an oder weist mit dem Warnblinken auf eine besondere Gefahr hin (United Nations, 2013a). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Leuchten am Fahrzeug maßgeblich zwei Funktionen erfüllen: eine Beleuchtungsfunktion und eine Signalfunktion (United Nations, 2013a). Durch die Ausleuchtung der Fahrbahn kann der Fahrer die verkehrsrelevanten visuellen Informationen der Umwelt besser wahrnehmen. Durch die Signalfunktion werden Informationen an andere Verkehrsteilnehmer weitergegeben, die sich auf die Anwesenheit eines Fahrzeugs, auf dessen Breite, eine Fahrtrichtungsänderung, eine Verzögerung in Längsrichtung oder auf eine mögliche Gefahrenquelle beziehen. Für beide Funktionen gilt, dass die Signale gut wahrnehmbar und einfach zu interpretieren sein müssen (Moore & Rumar, 1999).

1.2 Heckleuchten

Heckleuchten dienen dazu, die Sichtbarkeit des Fahrzeugs zu erhöhen und Signale an den rückwärtigen Verkehr abzugeben. Außerdem zeigen sie uns die Fahrzeugbreite und -klasse (PKW, LKW, Motorrad) an und helfen dadurch bei der Distanzschätzung. Die Hauptfunktion von Heckleuchten ist damit die Vermeidung von Unfällen, insbesondere von Auffahrunfällen (Moore & Rumar, 1999).

1.2.1 Historische Entwicklung

Die ersten Fahrzeuge waren noch ohne Beleuchtung unterwegs. Lichtsignale für Automobile wurden erst notwendig, um auch nachts fahren zu können (Moore & Rumar, 1999). Handzeichen und Gesten waren nachts nicht mehr ausreichend sichtbar, um mit anderen Verkehrsteilnehmern kommunizieren zu können (Moore & Rumar, 1999). Mittels Kerzen und Kerosinlampen wurde das Fahrzeug in der Dunkelheit markiert und dadurch für andere besser wahrnehmbar (Moore & Rumar, 1999). Nach einiger Zeit wurden die Schlussleuchte, die Kennzeichenleuchte und das Bremslicht mit definierten Eigenschaften verpflichtend (Moore & Rumar, 1999). Tabelle 1.2-1 gibt einen Überblick über die geschichtliche Entwicklung von Heckleuchten.

Tabelle 1.2-1. Historische Entwicklung von Heckleuchten in Anlehnung an Moore & Rumar (1999).

Jahr	Entwicklung
1890–1899	Kaum Heckleuchten
1900–1911	Einige Kerosin- oder Karbidlampen; erste elektrische Leuchten, Dynamos und Akkumulatoren
1912–1919	Weniger Kerosin- oder Karbidlampen, mehr elektrische Leuchten (zunächst in der Front, anschließend im Heck); meist nur eine Heckleuchte als Kombination aus Schluss- und Kennzeichenleuchte
1920–1929	Erste Fahrzeuge mit zwei elektrischen Heckleuchten
1923	Erste Regularien für die Fahrzeugbeleuchtung in Deutschland
1930–1939	Erste Signalleuchten (Bremsen, Abbiegen) meist in Rot, einige jedoch auch in Grün oder Gelb
1939	Fahrtrichtungsanzeiger mit automatischer Deaktivierung auf beiden Seiten des Fahrzeugs in den USA
1940–1949	Die meisten Fahrzeuge mit jeweils zwei Schluss- und Bremsleuchten und einer Kennzeichenleuchte in den USA; viele Fahrzeuge mit blinkenden Fahrtrichtungsanzeigern, Rückfahrleuchten in den USA; viele Fahrzeuge mit jeweils einer Schluss- und Bremsleuchte, sog. Winker als Fahrtrichtungsanzeigern, einer Kennzeichenleuchte in Europa
1950–1959	Die meisten Fahrzeuge mit zwei Schlussleuchten, zwei Bremsleuchten, zwei Fahrtrichtungsanzeigern, einer oder zwei Rückfahrleuchten, einer oder zwei Kennzeichenleuchten; noch viele gelbe Winker als Fahrtrichtungsanzeiger in Deutschland, hauptsächlich rote, blinkende Fahrtrichtungsanzeiger in den USA
1960–1969	Erste größere Leuchten; ein-, zwei oder drei-Kammern-Leuchten; erste Nebelschlussleuchten in Europa; ECE-Regulierungen in Europa; Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS 108) in den USA
1970–1979	Erste Vereinheitlichungen bezüglich Lichtintensitäten; einige Fahrzeuge mit Heckleuchten über die gesamte Fahrzeugbreite
1985	Hochgesetzte Bremsleuchte wird in den USA verpflichtend
1990–1999	Hochgesetzte Bremsleuchte und Nebelschlussleuchte wird in Europa verpflichtend; weitere Vereinheitlichungen bezüglich Anbau und geometrischer Sichtbarkeit; erste LED-Leuchten in den USA und Europa

1.2.2 Beleuchtungs- und Signaleinrichtungen im Fahrzeugheck (UN/ ECE)

Die ECE (Economic Comission for Europe) „wurde 1958 als Sektion der UNO (United Nations Organization) gegründet. Sie hat unter anderem die Aufgabe, zur Erhöhung der Verkehrssicherheit einheitliche Anforderungen an lichttechnische Einrichtungen zu erstellen, diese bei Bedarf zu optimieren und als ECE-Regelungen zu veröffentlichen“ (Ripperger, 2001, S. 22). In der ECE-Regelung R48 werden die Anbauvorschriften für lichttechnische Einrichtungen festgelegt (United Nations, 2013a). Die wichtigsten Vorrichtungen im Heck werden im Folgenden kurz beschrieben.

Die Schlussleuchte zeigt nach hinten das Vorhandensein eines Fahrzeugs an und lässt Rückschlüsse auf die Fahrzeugbreite zu (United Nations, 2013a). Das Fahrzeug muss über zwei Schlussleuchten verfügen (United Nations, 2013a). Die Leuchte muss mit einem Licht der Farbe Rot abstrahlen. Eine automatische Helligkeitsregelung an die Umgebungshelligkeit, aktuelle Witterungsbedingungen (wie Nebel, Schnee, Regen oder Gischt) sowie Staub und Verschmutzung ist zulässig (United Nations, 2013a). Es wird eine Mindestlichtstärke von 4 cd gefordert sowie eine Maximallichtstärke von 17 cd (bzw. 42 cd bei variabler Lichtstärke) (United Nations, 2012).

Die Nebelschlussleuchte dient dazu, die Sichtbarkeit eines Fahrzeugs nach hinten bei dichtem Nebel zu verbessern (United Nations, 2013a). Das Fahrzeug darf über eine oder zwei Nebelschlussleuchten verfügen (United Nations, 2013a). Entsprechend der Vorgaben für die Schlussleuchte ist die Farbe Rot vorgeschrieben und eine automatische Helligkeitsregelung zulässig (United Nations, 2013a). Ein ausreichender Abstand zur Bremsleuchte ist geregelt (United Nations, 2013a). Es wird eine Mindestlichtstärke von 150 cd gefordert sowie eine Maximallichtstärke von 300 cd (bzw. 840 cd bei variabler Lichtstärke) (United Nations, 2013b). Nach § 17 (3) StVO ist es erlaubt die Nebelschlussleuchten zu benutzen, wenn Nebel, Schneefall oder Regen die Sicht so erheblich behindert, dass die Sicht weniger als 50 m beträgt. Gleichzeitig regelt § 3 (1) StVO, dass bei einer witterungsbedingten Sicht von weniger als 50 m eine Geschwindigkeit von 50 km/h nicht überschritten werden darf. Der Fahrer steht somit in der Pflicht, Sichtweiten bei Nebel korrekt einzuschätzen und die Nebelschlussleuchte entsprechend der Straßenverkehrsordnung richtig zu benutzen.

Mit der Bremsleuchte wird dem rückwärtigen Verkehr eine absichtliche Verzögerung in Längsrichtung angezeigt (United Nations, 2013a). Das Fahrzeug muss über zwei Bremsleuchten verfügen (United Nations, 2013a). Das ausgestrahlte Licht hat die Farbe Rot (United Nations, 2013a). Entsprechend der Bestimmungen für

(Nebel-) Schlussleuchten ist eine automatische Helligkeitsregelung zulässig. Die Mindestlichtstärke beträgt 60 cd und darf eine Lichtstärke von 260 cd (bzw. 730 cd bei variabler Lichtstärke) nicht überschreiten (United Nations, 2012). Das Notbremslicht zeigt automatisch eine besonders starke Verzögerung durch Blinken in Gelb (Fahrtrichtungsanzeiger) oder Rot (Bremsleuchte) an (United Nations, 2013a).

Mit der hochgesetzten Bremsleuchte wird zusammen mit der Bremsleuchte dem rückwärtigen Verkehr eine absichtliche Verzögerung in Längsrichtung angezeigt (United Nations, 2013a). Das Fahrzeug muss über eine hochgesetzte Bremsleuchte verfügen (United Nations, 2013a). Das ausgestrahlte Licht hat die Farbe Rot (United Nations, 2013a). Es wird eine Mindestlichtstärke von 25 cd gefordert sowie eine Maximallichtstärke von 110 cd (bzw. 160 cd bei variabler Lichtstärke) (United Nations, 2012). Die hochgesetzte Bremsleuchte wurde als zusätzliches Bremssignal eingeführt, um die Detektionsrate des Bremssignals zu erhöhen (Moore & Rumar, 1999). Dazu wurde sie räumlich von den anderen Leuchten im Heck getrennt und in das Zentrum des visuellen Blickfeldes positioniert (Moore & Rumar, 1999).

Der Fahrtrichtungsanzeiger ist eine Leuchte, die anderen Verkehrsteilnehmer die Absicht anzeigt, die Fahrtrichtung nach rechts oder links zu ändern (United Nations, 2013a). Der Fahrtrichtungsanzeiger im Heck ist eine Blinkleuchte, bestehend aus zwei Leuchten mit der Farbe Gelb (United Nations, 2013a). Nach den SAE-Standards (SAE = Society of Automotive Engineers) werden in den USA auch Fahrtrichtungsanzeiger der Farbe Rot zugelassen (Bullough, Van Derlofske, & Kleinkes, 2007). Eine automatische Helligkeitsregelung entsprechend der Bestimmungen für Schlussleuchten ist zulässig (United Nations, 2013a). Mit dem Warnblinklicht wird eine besondere Gefahr aufgezeigt, indem alle Fahrtrichtungsanzeiger gleichzeitig blinken (United Nations, 2013a).

Am Fahrzeugheck sind außerdem noch ein Rückfahrscheinwerfer und eine Kennzeichenleuchte angebracht. Der Rückfahrscheinwerfer mit der Farbe Weiß erfüllt zwei Funktionen: zum einen leuchtet er die Fahrbahn hinter dem Fahrzeug aus, um dem Fahrer (und auch Assistenzsystemen) eine ausreichende Sicht zum Rückwärtsfahren zu ermöglichen und zum anderen zeigt er anderen Verkehrsteilnehmern an, dass sich das Fahrzeug rückwärts bewegt (United Nations, 2013a). Die Kennzeichenleuchte leuchtet das Kennzeichen eines Fahrzeugs in der Farbe Weiß aus, um die Lesbarkeit bei Nacht zu verbessern (United Nations, 2013a).

1.2.3 Lichtquellen

Zunächst soll ein kleiner Einschub die wichtigsten Begriffe für lichttechnische Einrichtungen kurz beschreiben. Eine „Birne“ ist ziemlich lecker. Ihr Erscheinungsbild ist meist glockenförmig und sie wird weltweit zum Verzehr angebaut (Hédelin & Lebot, 2010). Mit der Bezeichnung „Lampe“ ist das Leuchtmittel gemeint (Witting, 2014). Wenn dieses Leuchtmittel in ein “metallisches Gehäuse mit spezifischen Zusatzmodulen wie Reflektoren, Spiegelraster, Verkabelungen usw. eingebaut ist […], spricht man von einer „Leuchte““ (Witting, 2014, S. 57–58).

Abbildung 1.2-1 gibt einen Überblick über die Arten von Strahlungsquellen. Dabei werden Strahlungsquellen in Temperatur- und Lumineszenzstrahler unterteilt (Naumann, Schröder, & Löffler-Mang, 2014). In den ECE-Regularien sind Glühlampen-, Gasentladungslichtquellen und Leuchtioden (LEDs) als Lichtquellen für Beleuchtungs- und Signaleinrichtungen definiert (United Nations, 2013a). Bei der Glühlampenlichtquelle wird die sichtbare (und auch thermische) Strahlung durch Glühfäden hervorgebracht (United Nations, 2013a). Mit einer Gasentladungslichtquelle wird ein Elektrolumineszenz- oder Fluoreszenz-Effekt erzeugt (United Nations, 2013a). Die Leuchtdiode besteht aus Halbleiterverbindungen, die Injektionslumineszenz- oder Fluoreszenz-Effekte bewirken (United Nations, 2013a).

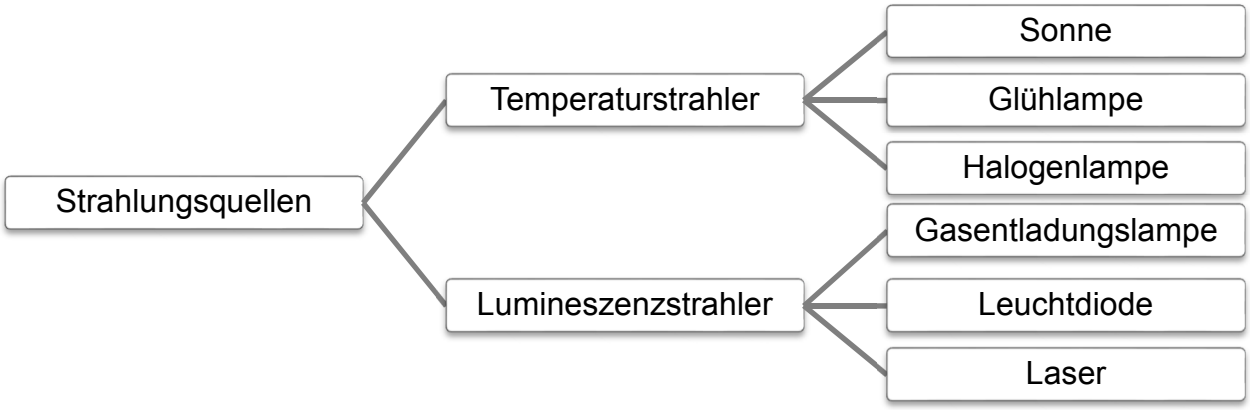

Abbildung 1.2-1. Überblick über die verschiedenen Strahlungsquellen in Anlehnung an Naumann et al. (2014), Reif (2012) und Witting (2014).

Glühlampenlichtquellen fallen in die Kategorie der Temperaturstrahler. Wie bei einer Kerze wird die Strahlung in Form von sichtbarer und thermischer Strahlung abgegeben (Reif, 2012). In einer elektrischen Glühlampe wird ein Wolframdraht zum Glühen gebracht (Reif, 2012). Um eine Oxidation und Verdampfung des Drahtes zu verhindern, kann Halogen eingesetzt werden, um eine Gasatmosphäre zu erzeugen (Reif, 2012). „Durch den Kreisprozess zwischen Wolfram und Halogendampf

wird das gesamte verdampfte Wolfram wieder auf die Glühwendel zurückgeführt. Dadurch gibt es keine Schwärzung des Glaskolbens, eine erhöhte Lichtausbeute bei höherer Lebensdauer und einen nahezu konstanten Lichtstrom über die gesamte Lebensdauer“ (Reif, 2012, S. 402).

Eine erhöhte Lebensdauer und verbesserten Wirkungsgrad versprechen Gasentladungslampen (Reif, 2012). Diese sind mit dem Edelgas Xenon und einer Mischung aus Metallhalogeniden gefüllt (Reif, 2012). Eine Hochspannung erzeugt Wärme, was die Metallhallogenide verdampfen lässt (Reif, 2012). Dabei entsteht ein Lichtbogen zwischen den Elektroden (Reif, 2012).

Leuchtdioden (LEDs = Light Emitting Diodes) strahlen Licht ab, indem elektrische Energie aufgenommen wird und die Elektroden anschließend wieder in ihren Urzustand zurückkehren (Reif, 2012). Für Heckleuchtenfunktionen sind Leuchtdioden durch ihre hohe Lichtausbeute gut geeignet, da sie die vorgegebene rote Farbe bereits ohne Farbfilter abstrahlen können (Reif, 2012). LEDs lassen eine größere Gestaltungsfreiheit zu und tragen dazu bei, dass Heckleuchten das Erscheinungsbild von Fahrzeugen auf den Straßen entscheidend prägen und als Unterscheidungsmerkmal für die verschiedenen Automobilhersteller gelten (Rabenau, Ogonda, & Pohlmann, 2017).

Organische lichtemittierende Dioden (OLEDs = Organic Light Emitting Diodes) bestehen aus vielen dünnen organischen Halbleiter-Schichten (Thomas, Lendle, & Rabenau, 2015). Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung geben die Moleküle des organischen Stoffs Energie in Form von Strahlung ab (Thomas et al., 2015). Im Unterschied zur LED als Punktlichtquelle stellt die OLED eine Flächenlichtquelle dar (Thomas et al., 2015). Dies ermöglicht homogen leuchtende Flächen, ohne dazu Reflektoren, Lichtleiter oder zusätzliche Optiken in der Heckleuchte anbringen zu müssen (Thomas et al., 2015). Eine gute Verkapselung des Bauteils ist wichtig, um die organischen Schichten vor Feuchtigkeit und Sauerstoff zu schützen (Thomas et al., 2015). Lichtspektrum und Farbort ergeben sich durch die Zusammensetzung der Emitterschichten (Thomas et al., 2015).

Mittels Laserstrahlung lässt sich eine annähernd punktförmige Lichtquelle erzeugen (Naumann et al., 2014). Durch die hohen Leuchtdichten fand der Laser zunächst den Eingang in die automobiltechnische Beleuchtung im Scheinwerfer (Berlitz, Gut, & Krstajic, 2014; Kleinkes & Pohlmann, 2015; Werkstetter, Weber, Hirth, & Amann, 2014). Auch für das Fahrzeugheck gibt es erste Konzepte, die Laserdiode anzuwenden (siehe AUDI AG, 2015; Kleinkes & Pohlmann, 2015).

Die nutzbaren Lichtquellen für Leuchten werden vielfältiger und ermöglichen neue technische Konzepte für Heckleuchten. In der Literatur finden sich zahlreiche innovative Ideen, wie die Heckleuchte der Zukunft aussehen sollte. Hierbei werden insbesondere adaptive Funktionen diskutiert. Gleichzeitig ist die Zulassung für Beleuchtungs- und Signaleinrichtungen streng reguliert. Es gilt einen Weg zu finden, der den gesetzlichen Anforderungen gerecht wird und gleichzeitig dem Kundenwunsch nach Innovation, Verkehrssicherheit und Komfort entspricht.

1.3 Verkehrssicherheit durch Information und Interaktion

Einleitend lässt sich zusammenfassen, dass die visuelle Wahrnehmung eine zentrale Funktion im Straßenverkehr erfüllt. Dabei erhöhen Heckleuchten die Sichtbarkeit eines Fahrzeugs und ermöglichen zusätzlich die Kommunikation und Interaktion mit dem rückwärtigen Verkehr. Im weitesten Sinne lassen sich Heckleuchten damit in die Kategorie von Fahrerinformations- bzw. Assistenzsystemen einordnen, da ihre Funktion primär der Information und Unterstützung des Hinterherfahrenden dient. Durch die Signalgebung der Heckleuchten soll verhindert werden, dass einem vorderen Fahrzeug (zu dicht) aufgefahren wird und Unfälle geschehen. Die hohe Anzahl an Auffahrunfällen bringt die Frage auf, ob eine Weiterentwicklung von Heckleuchten zu einer Erhöhung der Verkehrssicherheit führen könnte.

Aus verkehrspsychologischer Sicht muss die Heckleuchte verschiedenen Anforderungen gerecht werden. So sollte die Heckleuchte jederzeit und in jeder Situation optimal sichtbar sein. Auch bei größeren Abständen und schlechten Witterungsbedingungen, wie Nebel, Schnee, Regen oder Gischt, muss ein vorausfahrendes Fahrzeug für den rückwärtigen Verkehr rechtzeitig erkennbar sein, damit die Hinterherfahrenden einen adäquaten Sicherheitsabstand einstellen können. Bei eingeschränkter Sicht orientieren sich Fahrer häufig an einem vorausfahrenden Fahrzeug und wünschen sich gleichzeitig das Einhalten eines ausreichendend großen Sicherheitsabstands durch das hinterherfahrende Fahrzeug (Debus et al., 2005). Dabei werden Abstände zwischen den Fahrzeugen bei Nebel vermehrt überschätzt (Cavallo, Colomb, & Doré, 2001) und die eingestellten Geschwindigkeiten sind hinsichtlich der geringen Sichtweiten häufig als unangemessen zu bewerten (Debus et al., 2005). Die durch Nebel entstehenden Abstandsschwingungen und das oszillierende Fahrverhalten bergen dabei zusätzlich ein hohes Risiko für Auffahrunfälle (Debus et al., 2005). Um gleichmäßige Sicherheitsabstände auch bei schlechten Sichtbedingungen zu

ermöglichen, sollten konstante Kontrastverhältnisse (siehe Lee, Wierwille, & DeHart, 2003) gewährleistet werden, die unabhängig von den Umgebungsbedingungen eine optimal sichtbare Heckleuchte zur Folge hätten. Durch die kontinuierliche Variation der Lichtstärke würde zusätzlich die Gefahr einer möglichen Blendung reduziert werden, die „zu einem unangenehmen Gefühl („psychologische Blendung“) oder einer tatsächlich messbaren Herabsetzung der Sehleistung („physiologische Blendung“) führen [kann]“ (Wittlich, 2010, S. 1). Bei der Funktionsanpassung einer Heckleuchte sind dabei die spezifischen Anforderungen der Verkehrssicherheit zu berücksichtigen. Da Heckleuchten Lichtsignale aussenden, die weltweit für alle Verkehrsteilnehmer gut sichtbar und schnell und intuitiv verständlich sein müssen, ist auf eine Kompatibilität zum aktuellen Straßenverkehr zu achten. Dabei müssen die gesetzlichen Bestimmungen und etablierten Standards eingehalten werden. Bei der Gestaltung neuer Heckleuchten müssen außerdem verschiedene wahrnehmungspsychologische Aspekte berücksichtigt werden. So helfen Schlussleuchten bei Dunkelheit und schlechter Sicht die Entfernung zu einem vorausfahrenden Fahrzeug einzuschätzen. Veränderungen der Form oder Helligkeit einer Leuchte müssen daher sorgfältig auf mögliche Auswirkungen auf die Güte der Abstandsschätzung untersucht werden.

Neben der Wahrnehmung des Vorhandenseins eines Fahrzeugs in einer bestimmten Distanz, dienen die Lichtfunktionen einer Heckleuchte auch der Kommunikation mit dem rückwärtigen Verkehr. Mittels Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger werden saliente Lichtsignale ausgesendet, die die Hinterherfahrenden informieren und warnen können. Dabei wird die visuelle Warnung direkt am Ort der möglichen Gefahrenquelle gut sichtbar abgegeben und erzeugt damit auch bei geringer visueller Aufmerksamkeit eine hohe Detektionsquote. Damit werden schnelle und gerichtete Reaktionen ermöglicht, wie etwa das Verzögern des eigenen Fahrzeugs. Die Einführung der hochgesetzten Bremsleuchte konnte die Anzahl der Auffahrunfälle langfristig leicht verringern (Kahane & Hertz, 1998; Lee, Wierwille, & Klauer, 2002). Die Idee eines dynamischen Bremslichts, das die Bremsstärke durch eine Flächen- oder Helligkeitsvariation wiedergeben könnte, wird immer wieder diskutiert. Die grundsätzliche Herausforderung dabei ist, die Information über die Stärke der Verzögerung so darzustellen, dass sie sofort und intuitiv verständlich ist und keine verzögerten Reaktionen bewirkt (Bauckhage, Decker, & Lachmayer, 2004). Untersuchungen der National Highway Traffic Safety Adminsitration (NHTSA) zeigen,

dass die Visualisierung des Bremsvorgangs, durch eine Erhöhung der Helligkeit und der Verwendung blinkender Signale, ein hohes Potenzial zur Aufmerksamkeitslenkung aufweist (Llaneras, Neurauter, & Perez, 2010; Wierwille, Llaneras, & Neurauter, 2009). Die Signalisierung von Notbremsungen durch eine solche Konfiguration wurde bereits erfolgreich umgesetzt. Bremsleuchten bilden jedoch immer nur eine Betätigung des Bremspedals ab. Ein Fahrzeug das bereits zum Stehen gekommen ist oder ohne Bremse verzögert, sendet hingegen keine Signale an den rückwärtigen Verkehr aus (Schaudt, Bowman, Stone, & Perez, 2014). Ein Hinweis auf einen drohenden Auffahrunfall wird in diesen Situationen nicht gegeben, da eine Bremsleuchte nicht generell auf die Kritikalität der Situation hinweist, sondern lediglich eine Verzögerung mittels Bremspedal abbildet (Lee, Llaneras, Klauer, & Sudweeks, 2007). Um Auffahrunfälle erfolgreich verhindern zu können, muss in Situationen der visuellen oder mentalen Abwesenheit des Fahrers ein rückwärtiges Signalsystem die Aufmerksamkeit zurück auf die Straße vor dem Fahrzeug lenken können (Lee et al., 2002; Lee et al., 2007) sowie auf kritische Abstände hinweisen können. Lichtkonfigurationen mit der Fähigkeit zu einer optimalen Aufmerksamkeitsanziehung müssen daher auch in der Peripherie gut detektierbar sein und gleichzeitig eine niedrige Blendungsrate und eine minimale Systemkomplexität aufweisen (Lee et al., 2003). Möchte man zusätzliche und weiter differenzierte Hinweise an den rückwärtigen Verkehr übertragen, muss auf eine adäquate Codierung dieser Informationen geachtet werden, damit diese in verschiedenen Situationen gut wahrnehmbar sind und nicht falsch interpretiert werden könnten. Nur durch eine an die menschlichen Anforderungen optimal angepasste optische Gestaltung und Auslegung der Lichtfunktionen können Heckleuchten die Sicherheit im Straßenverkehr weiter erhöhen.

Im Anschluss an dieses einführende Kapitel werden im Folgenden die Forschungsziele der Dissertation vorgestellt. Eine im darauffolgenden Kapitel beschriebene Unfallanalyse dient der Definition von Anforderungen an innovative Heckleuchten. Zur Beantwortung der zu untersuchenden Forschungsfragen werden in den anschließenden Kapiteln die verschiedenen verkehrspsychologischen und psychophysikalischen Experimente dargestellt und die Erkenntnisse in einer abschließenden Diskussion erörtert.

2 Forschungsziele der Dissertation

Die Anforderungen an zukünftige Heckleuchten sind vielfältig und breit gefächert. Da Heckleuchten durch ihre Beleuchtungs- und Signalfunktion eine immense Bedeutung für die Verkehrssicherheit haben, werden in dieser Arbeit vornehmlich die sicherheitsrelevanten Anforderungen betrachtet.

2.1 Forschungsziel 1: Untersuchung der Rolle von Heckleuchten bei Auffahrunfällen

Durch Faktoren in der Umwelt und dem Fahrer entsteht ein Unfallrisiko, das mittels Unfallanalysen ermittelt werden soll (Vollrath & Krems, 2011). Unfallanalysen bieten dabei außerdem die Möglichkeit, Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme abzuleiten (Vollrath, Briest, Schießl, Drewes, & Becker, 2006). Die Analyse in Kapitel 3.2 wurde auf Basis der Datenbank der German In-Depth Accident Study (GIDAS) durchgeführt, einem Projekt der Bundesanstalt für Straßenwesen und der Forschungsvereinigung für Automobiltechnik (Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH, 2013). Die Ergebnisse wurden mit Erkenntnissen aus der Literatur verglichen und durch sie ergänzt. Mithilfe der Unfallanalyse wurden verschiedene potenzielle Risiko- und Schutzfaktoren für Auffahrunfälle betrachtet, wie etwa die Sichtbarkeit des Unfallgegners, das Verkehrsaufkommen und psychologische sowie physiologische Einflussfaktoren. Die Analyse des Unfalls mit seinen Begleitfaktoren ermöglichte die Diskussion der Rolle von Heckleuchten zur Vermeidung von Auffahrunfällen.

Die Analyse im Rahmen dieser Arbeit betrachtete die Ursachen und relevante Begleitfaktoren von Auffahrunfällen und ermöglichte, durch das Aufdecken von Problem- und Potenzialfeldern, die Definition von Anforderungen an innovative Heckleuchten. Mithilfe der Anforderungen konnten die weiteren Forschungsziele festgelegt werden.

Es bleibt zu berücksichtigen, dass Unfallanalysen immer nur einen unvollständigen Datensatz bieten, da sie beispielsweise kritische Situationen und Beinahe-Unfälle nicht beinhalten (Horrey, Wickens, & Consalus, 2006; Vollrath & Krems, 2011). Außerdem sind Unfälle häufig das Ergebnis vieler sich gegenseitig beeinflussender Faktoren und es ist teilweise schwierig, Rückschlüsse auf einzelne Ursachen zu ziehen (Horrey et al., 2006; Vollrath & Krems, 2011). Daher bieten experimentelle Untersuchungen eine Ergänzung zur Unfallanalyse und eine gute Möglichkeit, konkrete Hypothesen und Fragestellungen gezielt zu untersuchen.

2.2 Forschungsziel 2: Untersuchung der Beeinflussungsmöglichkeiten des Abstandsverhalten durch Heckleuchten

Mit Experimenten wird der Einfluss verschiedener Variablen auf die Wahrnehmung und das daraus resultierende Verhalten des Menschen untersucht (Vollrath & Krems, 2011). In der vorliegenden Arbeit wurden die wahrnehmungspsychologischen Untersuchungen mit zwei Heckleuchten-Demonstratoren durchgeführt, die jeweils mit LED- und bzw. oder OLED-Technologie ausgestattet waren. Die Arbeit mit Mustern anstelle von Serienheckleuchten erlaubte eine individuelle Programmierung der Signalgebung und eine exakt auf die Fragestellung zugeschnittene Darbietung und Variation der unabhängigen Variablen. Durch die Verwendung von LED- und OLED-Lichtquellen, anstelle von Computerbildschirmen, konnten realitätsnahe Lichtwerte von Heckleuchten erreicht werden. Um die in einem Experiment gewonnenen Ergebnisse auf reale Verkehrssituationen übertragen zu können, fand ein Kompromiss zwischen weitgehend standardisierten Versuchsbedingungen (um den Einfluss möglicher Störvariablen ausschließen zu können und die zu untersuchenden Faktoren systematisch zu variieren) und realen Szenarien statt. Die vorliegenden Untersuchungen wurden zum größten Teil im Lichtassistenzzentrum der AUDI AG durchgeführt. Hierbei handelt es sich um einen 120 m langen, befahrbaren Lichtkanal (Strohbach & Floss, 2015). Dies ermöglichte Versuchsdurchführungen in echten Fahrzeugen auf einem straßenähnlichen Bodenbelag mit Demonstratoren, die die Lichtwerte von Heckleuchten gut abbilden konnten.

Eine Erkenntnis der Analyse in Kapitel 3.2 war, dass ein großer Anteil der Auffahrunfälle durch ein angemessenes Abstands- und Geschwindigkeitsverhalten vermeidbar wäre. Heckleuchten dienen der Erkennbarkeit von vorausfahrenden Fahrzeugen und spielen damit für die zur Abstandswahl notwendige Entfernungsschätzung eine entscheidende Rolle. Wodurch lässt sich eine Heckleuchte charakterisieren? Zum einen kann sich die Anbauposition zwischen den verschiedenen Fahrzeugen unterscheiden. Leuchten differenzieren sich dabei durch ihren vertikalen Abstand zwischen Boden und Leuchte. So sind Heckleuchten in großen Fahrzeugen, wie Geländewagen, in der Regel höher angebracht, als Leuchten in flacheren Sportwagen. Auch der horizontale Abstand zwischen Leuchten kann variieren. Gründe dafür können die Fahrzeugbreite sowie die Größe der Leuchte sein. Für beide Arten von Abständen (vertikaler und horizontaler Abstand) wurde ein Einfluss auf die Entfernungsschätzung zu einem vorderen Fahrzeug bereits beobachtet (Buchner, Brandt, Bell, & Weise, 2006; Cavallo et al., 2001). Die Helligkeit der verschiedenen Lichtfunktionen kann im Rahmen

der gesetzlichen Vorgaben zwischen verschiedenen Fahrzeugen variieren. In einer Studie zur Entfernungsschätzung wurde daher untersucht, inwiefern eine adaptive Helligkeitsanpassung im Schlusslicht, Einfluss auf den Straßenverkehr nehmen könnte.

Auch in Form und Größe der Leuchten lassen sich die verschiedenen Hersteller und Fahrzeugmodelle voneinander differenzieren. Dieser Aspekt wurde bisher noch nicht näher untersucht. So wurde in der vorliegenden Arbeit der Frage nachgegangen, inwiefern die Gestaltungsform der Heckleuchte eine Rolle bei der Entfernungsschätzung im Straßenverkehr spielen kann. Diese Fragestellung erforderte die Ermittlung von Wahrnehmungsschwellen. Dazu eignete sich die Methode der Psychophysik, die die Beziehung zwischen einer physikalischen Stimulation mit einem Reiz und dem psychischen Empfinden wissenschaftlich erforscht (Gescheider, 1997). Um die dargebotenen Reize in möglichst kleinen Schritten variieren zu können, wurden die Untersuchungen dabei unter weitgehend sterilen Laborbedingungen untersucht (Hellbrück & Kals, 2012).

Forschungsziel dieses Kapitels war damit die Untersuchung verschiedener Attribute einer Heckleuchte, wie die Helligkeit und die Gestaltung des Schlusslichts, auf ihre möglichen Einflüsse auf die Wahrnehmung des Abstandes zwischen zwei Fahrzeugen.

2.3 Forschungsziel 3: Untersuchung der Möglichkeiten der Aufmerksamkeitssteuerung durch Heckleuchten

Eine weitere Erkenntnis der Unfallanalyse in Kapitel 3.2 war, dass durch eine angemessene Aufmerksamkeitsverteilung und schnelle Reaktionsfähigkeit des Fahrers zahlreiche Auffahrunfälle vermieden werden könnten. Zur gezielten Aufmerksamkeitssteuerung eignen sich insbesondere Helligkeitsveränderungen (Gail, Lorig, Gelau, Heuzeroth, & Sievert, 2001) sowie blinkende Objekte (Trick, Enns, Mills, & Vavrik, 2004). Fahrzeugleuchten erfüllen damit die optimalen Voraussetzungen, Warnungen und Informationen an andere Verkehrsteilnehmer auszusenden. Die verschiedenen Lichtfunktionen der Heckleuchte unterscheiden sich zum einen in ihrer Farbe (so ist der Fahrtrichtungsanzeiger in ECE-Ländern gelb) sowie in ihrer Darbietungsfrequenz. Das Schlusslicht leuchtet in eingeschalteten Zustand konstant. Das Bremslicht hingegen wird unmittelbar bei Betätigung des Bremspedals aktiviert und leuchtet so lange, wie die Bremse betätigt ist. Durch den großen Helligkeitsunterschied zwischen Schluss- und Bremslicht wird die Verzögerung für einen Hinterherfahrenden

klar und deutlich signalisiert. Der Fahrtrichtungsanzeiger blinkt in einer bestimmten Frequenz, um maximale Aufmerksamkeit zu erzielen. Das Blinken wird ebenso beim Bremsen für den sogenannten Notbremsassistenten verwendet, um maximale Aufmerksamkeitslenkung bei einer Notbremsung zu erzielen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, inwiefern die Kommunikation und Aufmerksamkeitslenkung durch Heckleuchten, mithilfe von dynamischen Lichtfunktionen im Schlusslicht, zusätzliches Potenzial für eine erweiterte Kommunikation bieten und die Verkehrssicherheit durch gezielte Aufmerksamkeitslenkung positiv beeinflussen könnten.

In diesem Kapitel wurden die Forschungsziele der Dissertation übergreifend beschrieben. Die Motivation für diese Ziele bestand darin, auf Grundlage wahrnehmungspsychologischer Erkenntnisse, Anforderungen an zukünftige Heckleuchten ableiten zu können. Dies liefert Ansatzpunkte zur Verbesserung der Verkehrssicherheit im Rahmen der automobilen Lichtentwicklung. Im folgenden Kapitel wurden Auffahrunfälle analysiert, um mögliche Potenzialfelder für neuartige Heckleuchtenkonzepte herauszuarbeiten.

3 Die Rolle von Heckleuchten bei Auffahrunfällen[1]

Die Analyse von Auffahrunfällen stellt den ersten Schritt bei der Ermittlung von sicherheitsrelevanten Anforderungen an Heckleuchten dar.

3.1 Nutzerzentrierte Ansätze in der automobilen Lichtentwicklung

Die Lichtentwicklung von Audi macht den Slogan Vorsprung durch Technik für den Kunden im wahrsten Sinne des Wortes sichtbar. Dabei entstehen Innovationen durch die Entwicklung von neuartigen Lichtfunktionen sowie durch die Verwendung innovativer Lichttechnologien im automobilen Kontext. So leuchten beispielsweise Matrix LED-Scheinwerfer die Fahrbahn in jeder Situation, durch Zu- und Abschaltung einzelner Dioden, präzise aus, ohne vorausfahrende oder entgegenkommende Verkehrsteilnehmer zu blenden. Damit die Heckleuchten im Fahrzeug nicht das sprichwörtliche Schlusslicht in der Entwicklung bilden, fokussiert sich die Forschung immer konzentrierter auch auf diesen Bereich.

Heckleuchten bestehen unter anderem aus einem Schlusslicht, einem Bremslicht und einem Blinklicht. Sie gewährleisten die Sichtbarkeit des Fahrzeugs sowohl bei Tag als auch bei Nacht und ermöglichen die Kommunikation mit dem Hinterherfahrenden durch eine visuelle Signalübertragung. Eine neue Funktion der letzten Jahre bildet dabei der dynamische Fahrtrichtungsanzeiger, welcher eine noch intuitivere Kommunikation mit dem Hinterherfahrenden gewährleistet (Hamm, 2013). Im Bereich der Lichttechnologien werden zukünftig neben LEDs auch OLEDs eingesetzt. Diese organischen LEDs ermöglichen extrem homogen leuchtende Flächen, welche sich stufenlos dimmen lassen und keine Reflektoren oder Lichtleiter benötigen.

Eine Heckleuchte muss in jeder Situation und aus allen Betrachtungswinkeln gut für den Hinterherfahrenden erkennbar sein, ohne ihn jedoch zu blenden. Neben sicherheits- und komfortrelevanten Anforderungen haben Nutzer auch designrelevante Wünsche. Durch neue Heckleuchtendesigns und innovative Lichtfunktionen kann die Begehrlichkeit eines Fahrzeugs erhöht werden. Eine neue Innovation muss außerdem immer den gesetzlichen Bestimmungen gerecht werden und kompatibel zum aktuellen Straßenverkehr sein.

---

[1] Dieses Kapitel basiert auf einer vorherigen Publikation: Mennig, I. (2016). Analyse von Auffahrunfällen im Hinblick auf Anforderungen an innovative Heckleuchten. In VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik (Hrsg.), *Proceedings of the Automotive meets Electronics Conference* (S. 128–133). Berlin, Offenbach, Deutschland: VDE Verlag GmbH.

3.2 Analyse von Auffahrunfällen

Heckleuchten dienen als Kommunikationsmittel von zwei hintereinanderfahrenden Fahrzeugen. Wenn ein Fahrzeug auf ein vorderes Fahrzeug auffährt, spricht man von einem Auffahrunfall. Der Unfall ist unvermeidbar, wenn das hintere Fahrzeug keine angemessene Handlung ausführen kann, um den Aufprall zu verhindern (Nekovee & Bie, 2013).

Die hohe Relevanz für die Unfallforschung ist durch die Häufigkeit von Auffahrunfällen gegeben. Ca. 25-33 % aller polizeilich erfassten Unfälle sind Auffahrunfälle (Baldock, Long, Lindsay, & McLean, 2005; Lee et al., 2002; Nekovee & Bie; 2013). Neben den finanziellen Kosten durch Unfallschäden verursachen Auffahrunfälle somit zahlreiche Verkehrsbehinderungen und Staus auf den Straßen.

Zur Ermittlung von sicherheitskritischen Anforderungen an Heckleuchten, wurde eine Analyse von Auffahrunfällen durchgeführt. Die German In-Depth Accident Study (GIDAS) ist ein Projekt der Bundesanstalt für Straßenwesen und der Forschungsvereinigung für Automobiltechnik (Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH, 2013). Dabei werden seit 1999 pro Jahr ca. 2000 Unfälle mit Personenschaden in die Datenbank aufgenommen und mit jeweils bis zu 3000 Parametern kodiert (Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH, 2013). Die hier vorliegende Analyse beruht auf einem Datenabzug von Dezember 2014. Die Stichprobe besteht aus 2946 Fällen mit 6062 Fahrern und insgesamt 9394 beteiligten Personen. Betrachtet wurden nur vollständig rekonstruierte PKW-Unfälle der Unfallart 1 und 2. Unfallart 1 beschreibt den Zusammenstoß mit einem anderen Fahrzeug, das anfährt, anhält oder im ruhenden Verkehr steht; Unfallart 2 beschreibt den Zusammenstoß mit einem anderen Fahrzeug, das vorausfährt oder wartet.

3.2.1 Unfallbeschreibung

Der Unfalltyp bezeichnet den Verkehrsvorgang bzw. die Konfliktsituation, woraus der Unfall entstanden ist. In der vorliegenden Analyse der GIDAS-Datenbank stehen ungefähr ein Drittel aller Auffahrunfälle in Verbindung mit einem Stauende (32.42 %). In einem Viertel der Fälle (24.88 %) fährt ein Fahrzeug auf ein wartepflichtiges Fahrzeug auf. In Verbindung mit einer Abbiegesituation stehen 14.12 % der Unfälle. Ein Einparkmanöver ist in 1.32 % der Fälle auszumachen. In den restlichen 27.26 % der Auffahrunfälle entstand der Unfall im Zuge einer Nachfolgefahrt.

Zu 70.77 % sind zwei Fahrzeuge an dem Unfall beteiligt. Insgesamt 29.23 % der Unfälle ereignen sich mit mehr als zwei Fahrzeugen. Die Hauptunfallursache für Auffahrunfälle sind Abstandsvergehen (38.32 %). In der gleichen Größenordnung sind sogenannte andere Fehler beim Fahrzeugführer klassifiziert (38.12 %). Mit 16.16 % stellen Geschwindigkeitsverstöße ebenfalls eine schwerwiegende Ursache für Auffahrunfälle dar. Technische Mängel (0.41 %), Witterungseinflüsse (0.17 %) oder Straßenverhältnisse (0.10 %) scheinen nicht als relevante Ursachen für Auffahrunfälle in Frage zu kommen.

Im Einklang mit den Unfallursachen zeigt sich, dass sich 70.88 % der Unfälle auf einer trockenen Straßenoberfläche ereignen. Der Anhalteweg sollte unter diesen Umständen nicht negativ beeinflusst sein. In 12.93 % der Unfälle ist die Straße feucht und in 13.99 % nass. Raureif bzw. Eis (0.84 %) und Schnee (0.99 %) kommen nur bei wenigen Unfällen vor, was sicherlich auch dem selteneren Auftreten dieser Ereignisse zuzuschreiben ist.

Die von der GIDAS in die Datenbank aufgenommen Unfälle verteilen sich über das Jahr relativ gleichmäßig (Minimum: 6.55 % im Januar; Maximum: 9.74 % im November). In den Sommermonaten wurden tendenziell etwas häufiger Auffahrunfälle verzeichnet (April bis September: 53.46 %) als in den Wintermonaten (Oktober bis März: 46.54 %). Die Erhebungsquote entspricht den erfassten Unfällen mit Personenschaden des Statistischen Bundesamts im Jahr 2014 (April bis September: 54.99 % Oktober bis März: 45.01 %) (Statistisches Bundesamt, 2015).

3.2.2 Betrachtung potenzieller Risiko- und Schutzfaktoren

3.2.2.1 Sichtbarkeit des Unfallgegners

Die vorherrschenden Lichtverhältnisse variieren in Abhängigkeit der Jahreszeit. Die Wintermonate sind geprägt durch einen tieferen Sonnenstand und eine kürzere Tageslänge. Der tiefere Sonnenstand kann eine höhere Blendung hervorrufen, was unter anderem eine schlechtere Erkennbarkeit der Heckleuchten des vorausfahrenden Fahrzeuges zur Konsequenz haben kann. Dieser Effekt sollte jedoch in der Gesamtunfallstatistik durch eine längere Dunkelzeit ausgeglichen werden. Umso dunkler die Umgebung ist, desto besser sollten die Heckleuchten des Vordermannes erkennbar sein. Jedoch ist hierbei ein möglicher negativer Einfluss der Witterung (Schnee, Regen, Nebel) denkbar.

In 93.29 % der Fälle liegt keine Sichtbehinderung für die beteiligten Fahrer durch Gebüsch, Mauern, parkende Fahrzeuge, Kurven, Kuppen, Dunkelheit oder Nebel vor.

Es zeigt sich außerdem, dass Auffahrunfälle bei jedem Bewölkungszustand auftreten. Die meisten Unfälle ereignen sich bei geschlossener Wolkendecke (37.44 %). In 15.78 % ist es bewölkt (viele Wolken). Ein Viertel aller Unfälle (26.68 %) geschehen bei heiterem Wetter (wenig Wolken) und in 16.87 % ist es wolkenlos. In 0.48 % der Auffahrfälle herrscht Nebel.

Eine Straßenbeleuchtung bei Nacht ist in der Hälfte der Fälle (46.72 %) nicht vorhanden bzw. ausgeschaltet. In 51.49 % der Fälle ist die Straßenbeleuchtung eingeschaltet; zu den restlichen Fällen kann keine Aussage gemacht werden. Innerorts sind 74.60 % der Unfall-Straßen ausgeleuchtet und in 23.09 % ist eine Straßenbeleuchtung nicht vorhanden bzw. ausgeschaltet. Außerorts sind ist in 4.01 % der Fälle eine Straßenbeleuchtung vorhanden und eingeschaltet. Die meisten Auffahrunfälle bei Nacht geschehen innerorts bei beleuchteter Straße. Um Rückschlüsse über die Sichtbedingungen der Verkehrsteilnehmer ziehen zu können, wird zusätzlich betrachtet, ob zum Unfallzeitpunkt Scheinwerfer eingeschaltet waren. Am Tag war das Fahrlicht zu 71.74 % ausgeschaltet. 10.46 % der Unfallbeteiligten fuhren mit Abblendlicht. In 15.73 % konnte diese Variable nicht erfasst werden. In der Nacht zeigt sich der gegenteilige Effekt. Hier hatten 76.46 % das Abblendlicht eingeschaltet und bei zusätzlich 9.20 % war ein Licht eingeschaltet, ohne dass nähere Angaben dazu gemacht werden können. Bei 8.00 % der Beteiligten war das Licht jedoch auch in einer als Nacht kategorisierten Unfallsituation ausgeschalten (parkende Fahrzeuge können in dieser Stichprobe nicht ausgeschlossen werden). In 5.97 % der Fälle liegen keine Informationen zu dieser Variable vor. In der Dämmerung ist das Bild wie zu erwarten etwas heterogener. Hier fuhren 58.67 % der Personen mit Abblendlicht und bei zusätzlichen 9.26 % der Fälle war ein Licht ohne nähere Angaben eingeschaltet. 17.10 % der Fahrer fuhren ohne ihr Scheinwerferlicht einzuschalten. In 14.96 % kann keine Aussage über die Beleuchtungssituation des Fahrzeugs getroffen werden.

Die Sichtbarkeit von Heckleuchten scheint keinen direkten Einfluss auf die Verursachung von Auffahrunfällen zu haben. Keine der ausgewerteten Variablen deutet auf eine mangelnde Erkennbarkeit der Hecksignale des Vordermannes hin. Entscheidend für eine adäquate Wahrnehmung der Signale, ist neben einem ausreichenden Sehvermögen, die richtige Aufmerksamkeitsverteilung und die damit

einhergehende Fokussierung der Informationsquelle in Form der Heckleuchte des Vordermannes.

3.2.2.2 Verkehrsaufkommen

Durch die besseren Witterungsbedingungen in den Sommermonaten ist, vor allem innerorts, mit mehr Fußgängern, Radfahrern und Motorrädern zu rechnen. Diese zusätzlichen Verkehrsteilnehmer erhöhen die Verkehrsdichte und fordern dadurch mehr Aufmerksamkeit vom Fahrer und führen zu einer höheren kognitiven Belastung. Außerdem können sie zu plötzlichen Bremsmanövern bei Autofahrern führen, indem sie Straßen (unbefugt) überqueren oder spät gesehen werden. Ein potenzieller Einfluss auf Auffahrunfälle wird dadurch denkbar.

Auffahrunfälle geschehen deutlich häufiger unter der Woche als am Wochenende. Im Mittel liegt das Unfallrisiko für Auffahrunfälle an einem Wochentag bei 16,40 % und an einem Wochenendtag bei 9.01 %. Dabei tritt dichter und zähflüssiger Verkehr am Wochenende deutlich seltener auf als an Werktagen. Für den Einfluss der Verkehrsdichte auf das Unfallrisiko spricht auch, dass die meisten Auffahrunfälle tagsüber geschehen (79.12 %). In der Nacht ereignen sich 13.78 % der Auffahrunfälle; in der Dämmerung sind es 7.06 % (0.03 % zu unbekannter Tageszeit). Dreiviertel der Auffahrunfälle geschehen innerorts (73.76 %) und ein Viertel außerhalb von Ortschaften (26.24 %). Die erhöhte Unfallrate für Auffahrunfälle im Stadtgebiet findet sich auch in der Literatur (Baldock et al., 2005). Mit der Anzahl der Verkehrsteilnehmer erhöht sich die theoretische Chance, dass sich zwei Fahrzeuge begegnen. Durch die erhöhte Verkehrsdichte und die geringeren Durchschnittsgeschwindigkeiten im Stadtverkehr, ergeben sich außerdem kürzere Abständen zwischen den Fahrzeugen. Nach der der 1.5 s-Faustregel ergibt sich bei 50 km/h ein Sicherheitsabstand von 20.83 m (bzw. bei 1.8 s 25.00 m), was bei einer durchschnittlichen Fahrzeuglänge von viereinhalb bis fünf Meter etwa vier (bzw. fünf) Fahrzeuglängen entspricht. Dieser Sicherheitsabstand kann bei hohem Verkehrsaufkommen im Stadtverkehr nicht immer eingehalten werden. Auf der Autobahn ergibt sich bei einer Geschwindigkeit von 130 km/h ein Sicherheitsabstand von 54.17 m (bzw. 65.00 m), was in etwa dem Abstand zwischen zwei Leitpfosten entspricht.

3.2.2.3 Psychologische und physiologische Einflussfaktoren

Bei der Betrachtung der genauen Unfalluhrzeit lassen sich ein deutlicher Anstieg der Unfallrate ab ca. 06 Uhr, ein Peak gegen 14 Uhr und ein Abstieg der Unfallhäufigkeit ab ca. 19 Uhr feststellen. Dabei können die Zeiten des deutlichen An- und Abstiegs mit dem einsetzenden und endenden Berufsverkehr erklärt werden. Über den Tag verteilt kommen Einkaufs-, Erledigungs- sowie Wirtschaftsverkehr hinzu (Kirchhoff, 2002). Der Peak um 14 Uhr mit 9.03 % der Auffahrunfälle fällt zusammen mit einem typischen Leistungstief nach der Mittagspause.

Tagsüber findet hauptsächlich der Berufs-, und Einkaufsverkehr statt, abends und am Wochenende eher der Freizeitverkehr (Kirchhoff, 2002). Das Wochenende dient den Erwerbstätigen zur Erholung, was zu einem niedrigeren Stressniveau führen sollte. So stellte der Deutsche Verkehrssicherheitsrat unlängst fest, dass Stress einen negativen Einfluss auf die Verkehrsteilnehmer ausübt (Vollrath, 2013). Unfalldaten zeigen, dass Stress unter anderem zu Geschwindigkeitsüberschreitungen und Abstandsverstößen führen kann sowie mit einer höheren Ablenkbarkeit und Unaufmerksamkeit einhergehen kann (Vollrath, 2013). Unaufmerksamkeit, Ablenkung und eine nicht angepasste Geschwindigkeit sowie zu dichtes Auffahren zählen zu den Hauptursachen für Auffahrunfälle (Lee et al., 2002; Nekovee & Bie, 2013).

Das Unfallrisiko für Auffahrunfälle nimmt für beide Geschlechter mit dem Alter ab. Dabei wird ungefähr ein Viertel aller Unfälle (24.24 %) durch die Altersgruppe 17 bis 25 Jahre verursacht. Auch in der Literatur (Baldock et al., 2005) findet sich das sinkende Risiko für Auffahrunfälle mit zunehmendem Alter. Dabei werden ungefähr die Hälfte alle Unfälle durch unter 35-Jährige verursacht (Baldock et al., 2005). Im hohen Alter ist jedoch von einer geringeren jährlichen Fahrleistung auszugehen.

In einer Untersuchung zur Prävalenz starker Belastungen durch chronischen Stress mit insgesamt 5793 Befragten (Hapke et al., 2013) zeigte sich häufiger eine starke Stressbelastung für die Altersgruppe 18 bis 29 Jahre (12.9 %) als für die Altersgruppen 30 bis 44 Jahre (10.5 %) und 45 bis 64 Jahre (10.3 %). Neben dem allgemeinen Stressgefühl ist es zusätzlich wichtig, das Stressempfinden während der Autofahrt in Betracht zu ziehen. Dieses sollte gerade bei unerfahrenen Fahrern höher ausgeprägt sein als bei erfahrenen Fahrern. Fahrerfahrung weisen vor allem ältere Verkehrsteilnehmer und Fahrer mit hoher Fahrleistung (mittlere Altersgruppe) auf. In einer Untersuchung (Staubach, 2010) „zeigte sich mangelnde Fahrpraxis als bedeutender Risikofaktor für die Verursachung von Verkehrsunfällen“ (S. 128).

Mangelnde Fahrerfahrung wird als wesentliche Unfallursache angesehen (Bartl & Hager, 2006). So lernen Autofahrer sich selbst und ihre Fähigkeiten sowie die Verkehrssituationen mit der Zeit besser einzuschätzen und entwickeln eine Routine bei ihrer Fahraufgabe. Diese Vertrautheit mit den äußerlichen Umständen ergibt sich auch durch bekannte Straßen. In Untersuchungen zu Auffahrunfällen wurde festgestellt, dass 30 % der auffahrenden Fahrer mit der Straße sehr gut vertraut waren im Vergleich zu 48 % der Fahrer, denen aufgefahren wurde (Baldock et al., 2005).

In den Unfalldaten zeigt sich ein klarer Trend für männliche Unfallverursacher (68.30 %). Dieses Ergebnis steht auch im Einklang mit der Literatur (Baldock et al., 2005). Für dieses unausgeglichene Geschlechterverhältnis können mehrere Ursachen in Frage kommen. Das Verhältnis beim Führerscheinbesitz zwischen den Geschlechtern zeigt eine leicht höhere Rate für Männer (30,8 Mio.) im Vergleich zu Frauen (29,2 Mio.) im Jahr 2008 in Deutschland (ADAC e.V., 2010). Betrachtet man die tatsächliche Fahrleistung, so ist davon auszugehen, dass Männer ihren Führerschein deutlich mehr nutzen als Frauen. Der ADAC berichtet von 1.199,0 Mio. Pkw-km pro Tag für Männer im Vergleich zu 562,0 Mio. Pkw-km für Frauen (ADAC e.V., 2010). Im gesamten Jahr fahren laut dem Kfz-Versicherungsvermittler CHECK24 Männer (12.324 km) durchschnittlich ca. 1000 km mehr als Frauen (11.347 km) (CHECK24, 2013).

Die höchste Fahrleistung findet sich in der Altersgruppe 40 bis 49 Jahre (ADAC e.V., 2010; CHECK24, 2013); die meisten Auffahrunfälle werden jedoch durch die jüngeren Verkehrsteilnehmer verursacht. So erhöhen Vielfahrer zwar durch ihre zurückgelegten Kilometer ihre theoretische Chance, an einem Unfall beteiligt zu sein, jedoch scheinen andere Faktoren, wie beispielsweise Fahrerfahrung, diesen Effekt auszugleichen.

Neben der Fahrleistung ist das Fahrverhalten der Geschlechter von erheblichem Interesse für die Unfallforschung. Ein Blick in das Flensburger Verkehrsregister zeigt, dass es beispielsweise deutliche Unterschiede für Geschwindigkeitsverstöße gibt (1,11 Mio. Frauen vs. 3,87 Mio. Männer am 1. Januar 2014) (Statista, 2015). Eine nicht angepasste Geschwindigkeit gilt nach Nekovee & Bie (2013) als eine der Hauptursachen für Auffahrunfälle.

Aufgrund schlechterer Witterungsverhältnisse wäre eine erhöhte Unfallgefahr für die Wintermonate anzunehmen. Jedoch könnte die jeweilige individuelle Geschwindigkeitswahl über die verschiedenen Monate variieren und dadurch auf die

Rate der Auffahrunfälle einwirken. Der Einfluss der Jahreszeit auf die Geschwindigkeitswahl ist nicht bekannt (Schüller, 2010). Jedoch liegt aufgrund der schlechteren Witterungsbedingungen und kürzeren Tageslichtzeiten die Vermutung nahe, dass in den Wintermonaten die durchschnittlich gewählte Geschwindigkeit etwas niedriger liegen könnte als in den Sommermonaten.

Geht man von personengebundenen Faktoren aus, welche zur Unfallverursachung beitragen, müssten Personen mit Auffahrunfällen in der Vergangenheit ein größeres Risiko für Unfälle in der Zukunft aufweisen (Baldock et al., 2005). In der Literatur wurde kaum ein Unterschied zwischen Fahrern der auffahrenden und aufgefahrenen Fahrzeuge in Unfällen festgestellt (Baldock et al., 2005). Jedoch bleibt zu berücksichtigen, dass die jüngeren Fahrer mit weniger Gesamtfahrleistung und damit einer geringeren theoretischen Chance für eine Beteiligung an Unfällen, in der Gruppe der Unfallverursacher stärker vertreten sind (Baldock et al., 2005).

Um den Unfallverursacher präzise charakterisieren zu können, ist es wichtig, die Krankengeschichte der Person zu betrachten. Bei 14.99 % der Fahrer ist eine Vorerkrankung bekannt. Im Falle des Unfalltyps „Stauende“ ist die Quote etwas erhöht (19.23 %). Kreislauferkrankungen machen 30.97 % der Vorerkrankungen aus. Bei 16.48 % der Personen mit Vorerkrankungen, sind Augenleiden bekannt. Bei 13.92 % der Fahrer wurde eine Stoffwechselerkrankung festgestellt. Kreislauf- und Stoffwechselerkrankungen sind häufig Folgen chronischen Stress (Kaluza, 2011). Medizinische Untersuchungen zeigen, dass Stoffwechselerkrankungen wie Diabetes mellitus mit kognitiven Beeinträchtigungen, wie beispielsweise einer mangelnden Konzentrationsfähigkeit, einhergehen können (Göhringer, 2005). Da der Großteil der Informationen beim Autofahren visuell aufgenommen wird, können auch Augenerkrankungen zu einem erhöhten Unfallrisiko beitragen. Wäre dieser Faktor allerdings als Hauptrisikofaktoren anzusehen, müsste die Unfallrate mit dem Alter ansteigen.

Bei Unfällen im Kreuzungsbereich (35.66 % der Fälle) ist es von Interesse, ob der Verkehr mittels einer Signalanlage gesteuert wurde. An Knotenpunkten ohne Ampel muss der Fahrer sich sowohl auf den Kreuzungsverkehr als auch auf den Vorausfahrenden konzentrieren. Dies geht mit vermehrten Kopf- und Blickbewegungen sowie einer erhöhten kognitiven Belastung einher. Wird der Verkehr durch eine Signalanlage geregelt, so hat der Fahrer mehr Kapazitäten für die Konzentration auf den

Vordermann frei. In ungefähr der Hälfte der Fälle (51.39 %) gab es keine Ampel an den Unfallkreuzungen. Lichtsignalanlagen dienen der Sicherheit und Leistungsfähigkeit des Verkehrs und werden vor allem in Gebieten mit erhöhten Verkehrsaufkommen eingesetzt (Ianigro, 1995). Unfälle sollten an Ampeln überrepräsentiert sein, weil dort mit einem höheren Verkehrsaufkommen zu rechnen ist (Baldock et al., 2005).

Im Rahmen der Unfallrekonstruktion wird untersucht, ob der Unfall vermeidbar gewesen wäre, wenn eine zulässige Höchstgeschwindigkeit eingehalten worden wäre. Bei ca. einem Viertel der Fälle, in denen die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschritten wurde, wäre der Unfall nach Einschätzung des Rekonstrukteurs nicht zu vermeiden gewesen. Ungefähr die Hälfte der Unfälle wäre durch eine rechtzeitige Reaktion (räumlich bzw. zeitlich) vermeidbar gewesen. Ca. 7 % der Fälle wären räumlich bzw. zeitlich vermeidbar gewesen, wenn die Geschwindigkeit angemessen gewesen wäre. Es zeigt sich, dass trotz überhöhter Geschwindigkeit mehr als die Hälfte der Unfälle durch eine rechtzeitige Reaktion zu verhindern gewesen wäre. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund zu bewerten, dass bei ca. 16.16 % der Unfälle ein Geschwindigkeitsvergehen als Hauptursache genannt wurde.

3.3 Verkehrssicherheit durch Heckleuchten

In der Analyse findet sich kein Hinweis auf eine notwendige Verbesserung der generellen Erkennbarkeit von Heckleuchtensignalen. Jedoch sind indirekte Einflüsse der Erkennbarkeit von Heckleuchten auf die Entfernungs- und Geschwindigkeitsschätzung denkbar. Es ist bekannt, dass sowohl die Anbauhöhe als auch die Distanz zwischen Leuchten einen Einfluss auf die wahrgenommene Distanz eines Fahrzeugs haben (Buchner et al., 2006; Cavallo et al., 2001). Der Einfluss der Leuchtdichte und der Größe der leuchtenden Fläche wurde bisher nicht ausreichend analysiert (Castro, Matínez, Tornay, Fernández, & Martos, 2005).

Eine mögliche Beeinflussung der Heckleuchten über eine Blendung des Hinterherfahrenden kann über diese Unfallanalyse nicht erörtert werden. Die Blendung durch Heckleuchten könnte durch das Bremslicht erzeugt werden. In diesem Fall ist jedoch eine schnelle Reaktion notwendig. Ein Einfluss auf das Unfallrisiko ist nicht plausibel.

Um Auffahrunfälle zu vermeiden, muss der Fahrer des hinteren Fahrzeugs seine Geschwindigkeit angemessen verringern bzw. sein Fahrzeug rechtzeitig zum Stillstand bringen. Ein ausreichender Sicherheitsabstand erleichtert dabei diese notwendige

Reaktion. Um diese Handlung zur Unfallvermeidung ausführen zu können, muss eine Fokussierung der Aufmerksamkeit auf die unfallrelevanten Fahrzeuge vorliegen. Die Rolle der Konzentrationsfähigkeit und Aufmerksamkeitsverteilung zur Unfallvermeidung sollte hervorgehoben werden. So wurde bei einer Analyse von Unfallursachen (Bartl & Hager, 2006) festgestellt, dass „42 % der Unfälle […] primär durch emotionale Zustände bedingt [waren], in denen man sich nicht in der Balance befand. Dies war primär Stress, Sorgen etc. also Emotionen, die von der Fahraufgabe ablenkten und sich nicht primär auf Auslebenstendenzen beim Fahrverhalten auswirkten […]“ (S. 41). Es wird eine Gestaltung des Verkehrsraumes gefordert, welche die Aufmerksamkeit erhöht um so die Konzentration auf die Fahraufgabe gewährleisten zu können (Bartl & Hager, 2006) „Statt des Slogans auf Autobahnplakaten „geh vom Gas, bleib am Leben!“ wäre der Slogan „Fahr konzentriert, bleib am Leben!“ punktgenauer“ (Bartl & Hager, 2006, S. 40).

Da Heckleuchten als Kommunikationsmittel zwischen zwei Fahrzeugen dienen, ergibt sich die Idee, neue Funktionen in Heckleuchten von Fahrzeugen zu integrieren, um die Kommunikationsmöglichkeiten zu verbessern. Dabei ergeben sich zahlreiche Möglichkeiten für Innovationen, wie beispielsweise eine Bremsleuchte, welche dem Hintermann anzeigt, wie stark das vorausfahrende Fahrzeug bremst. Dadurch könnte die aktuelle Geschwindigkeit des Vordermannes besser eingeschätzt werden. Ein Laser-Schlusslicht, welches eine Linie hinter das eigene Fahrzeug auf die Straße projiziert, könnte das Abstandsverhalten des Hinterherfahrenden positiv beeinflussen. Ein intelligentes Schlusslicht könnte auf den Abstand zwischen den Fahrzeugen und die gefahrenen Geschwindigkeiten reagieren und dem Hinterherfahrenden dadurch bei der Einschätzung dieser relevanten Größen helfen. Die erfolgreiche Einführung eines dynamischen Fahrtrichtungsanzeigers (Hamm, 2013) lässt das Potenzial weiterer dynamischer Lichtfunktionen in Heckleuchten erahnen, um die periphere Aufmerksamkeit des Hintermannes zu erregen und so gezielt die Konzentration auf das vorausfahrende Fahrzeug lenken zu können.

3.4 Zusammenfassung

Im Rahmen der Analyse wurden zahlreiche Risiko- und Schutzfaktoren betrachtet und auf ihren potenziellen Einfluss hinsichtlich Verursachungen und Vermeidung von Auffahrunfällen untersucht. Die Unfallanalyse mittels GIDAS-Datenbank und Literaturrecherche zeigt, dass die Hauptunfallursachen von Auffahrunfällen eine nicht angepasste Geschwindigkeit, ein zu geringer Abstand und eine mangelnde Aufmerksamkeit des Hinterherfahrenden sind.

Heckleuchten haben durch ihre kommunikative Funktion das Potenzial mit der Implementierung neuer Funktionen die Geschwindigkeits- und Abstandsschätzung zu verbessern, das Abstandsverhalten positiv zu beeinflussen und die Aufmerksamkeit eines potenziellen Unfallverursachers rechtzeitig auf das vorausfahrende Fahrzeug zu lenken. Nach der erfolgreichen Einführung zahlreicher Sicherheitsfunktionen in neuartigen Scheinwerfersystemen ist nun die Zeit für intelligente Heckleuchten gekommen.

In diesem Kapitel wurden auf Basis einer Literaturrecherche und der Analyse von Unfällen einer deutschen Unfalldatenbank zwei Potenzialfelder für Heckleuchten zur Verbesserung der Verkehrssicherheit aufgedeckt. In den folgenden Kapiteln werden verschiedene Attribute einer Heckleuchte auf ihre Möglichkeit zur Beeinflussung des Abstandsverhaltens und zur gezielten Steuerung von Aufmerksamkeit untersucht. Zunächst wird der Frage nachgegangen, inwiefern die Schlusslichthelligkeit und die Gestaltung des Schlusslichts die Wahrnehmung von Distanzen beeinflussen können.

4 Beeinflussung des Abstandsverhaltens durch Heckleuchten

Auffahrunfälle machen insgesamt etwa ein Viertel bis ein Drittel aller polizeilich erfassten Unfälle aus (Baldock et al., 2005; Lee et al., 2002; Nekovee & Bie, 2013). Die Reduzierung von Auffahrunfällen weist somit ein großes Potenzial auf, die Verkehrssicherheit zu erhöhen, Unfallkosten zu senken und Verkehrsbehinderungen zu verringern (siehe Kapitel 3.2). Um Auffahrunfälle zu vermeiden, ist es die Aufgabe des Fahrers den Abstand zwischen dem eigenen und einem vorausfahrenden Fahrzeug zu schätzen und einen angemessenen Sicherheitsabstand einzuhalten. Diese Entfernungsschätzung muss kontinuierlich und mit hoher Güte erfolgen. Sie findet in dynamischen (beide Fahrzeuge fahren), teildynamischen (ein Fahrzeug steht) und statischen (beide Fahrzeuge stehen) Situationen statt.

4.1 Helligkeitsadaption im Schlusslicht und ihr Einfluss auf Distanzschätzungen von Fahrzeuglenkern

Um die notwendigen kognitiven Prozesse für die Entfernungsschätzung im Straßenverkehr verstehen zu können, müssen verschiedene Aspekte der Tiefenwahrnehmung, der Entfernungs- und Zeitabstandsschätzung betrachtet werden. Wir bewegen uns in einer dreidimensionalen Welt. Um Entfernungen schätzen zu können, ist es notwendig aus den zweidimensionalen Abbildern auf der Retina einen dreidimensionalen Raum zu rekonstruieren (Hagendorf et al., 2011). Dabei helfen uns sogenannte Tiefenkriterien. Durch die Verwendung binokularer Tiefenkriterien (oder auch Nonpictorial-Cues) werden Informationen aus der Umwelt mithilfe beider Augen aufgenommen und verarbeitet (Flannagan, Sivak, & Simpson, 2001; Hagendorf et al., 2011). Informationen, die über ein Auge aufgenommen werden, können mithilfe monokularer Tiefenkriterien (oder auch Pictorial-Cues) zur Entfernungsschätzung verwendet werden. Die Wirksamkeit der Tiefeninformationen ist außerdem von der Entfernung abhängig (Hagendorf et al., 2011). Zu den wichtigsten binokularen Tiefenkriterien zählen die Disparation, die Vergenz, die Akkommodation und die Bewegungsparallaxe (siehe Cavallo et al., 2001; Flannagan et al., 2001; Hagendorf et al., 2011; Witting, 2014). Der Mensch erhält dabei wichtige Informationen zur Tiefenschätzung über die Unterschiedlichkeit der Abbilder im rechten und linken Auge (Disparation), über die Spannung der Augenmuskulatur und die Position der Augen

(Akkommodation und Vergenz) sowie über die Bewegungsmuster der Objekte (Bewegungsparallaxe) (Hagendorf et al., 2011). Disparation und Bewegung wirken dabei auch bei Entfernungen von mehr als zwei Metern. Zu den monokularen Tiefenkriterien zählen unter anderen die Größe des Objekts, die lineare und Detailperspektive, die atmosphärische Farbverschiebung, die Verdeckung von weiter entfernten Objekten durch näherliegende Objekte, Helligkeitsverläufe und Schatten, Textur- bzw. Strukturgradienten und die Erfahrung bzw. das Vorwissen über Größen bestimmter Objekte (Flannagan et al., 2001; Hagendorf et al., 2011; Witting, 2014). Bei diesen Tiefenkriterien erhalten wir auch bei Entfernungen von mehr als 30 Metern Informationen über die räumliche Tiefe (Hagendorf et al., 2011). In einer Fahrsituation sind diese Pictorial-Cues entscheidend für eine adäquate Entfernungsschätzung (Flannagan et al., 2001). In der Regel liegen jeweils verschiedene Tiefenkriterien simultan vor (Cavallo et al., 2001). Für die Tiefenschätzung werden die Informationen aus unterschiedlichen Quellen gewichtet, kombiniert und integriert (Cavallo et al., 2001; Hagendorf et al., 2011).

Für eine Entfernungsschätzung in einer dynamischen oder teildynamischen Situation muss außerdem der Zeitabstand (Time Headway) berücksichtigt werden (Broughton, Switzer, & Scott, 2007; Siebert, Oehl, & Pfister, 2015). Dabei wird der Abstand mit der Geschwindigkeit ins Verhältnis gesetzt (Siebert et al., 2015). Eine Fehlleistung, in Form eines zu geringen Sicherheitsabstands wird im deutschen Straßenverkehr mit einem Eintrag im Register für Verkehrsverstöße in Flensburg und einer Geldstrafe geahndet. Da es während der Fahrt nicht möglich wäre, kontinuierlich schnell und zuverlässig Weg und Geschwindigkeit in das richtige Verhältnis zu setzen, werden Kollisionszeitpunkte über „das Verhältnis der Größenänderung des retinalen Bildes zur Veränderungszeit“ (Hagendorf et al., 2011, S. 93) geschätzt. Die Geschwindigkeitsschätzung während der Fahrt scheint von einer Reihe von Faktoren abzuhängen. So weisen die Untersuchungen von Snowden, Stimpson und Ruddle (1998) darauf hin, dass die wahrgenommene Geschwindigkeit vom Bildkontrast abhängen kann. Die Autoren Pretto, Vidal und Chatziastros (2008) diskutieren außerdem die Rolle von Winkelgeschwindigkeiten im fokalen und peripheren Sichtfeld. Bei der Schätzung des Sicherheitsabstands zu einem anderen Fahrzeug spielen zusätzlich bestimmte Attribute des Fahrzeugs eine Rolle. So sind die Größe, die Position und die Helligkeit von Leuchten den meisten Menschen gut vertraut und werden zur Entfernungsschätzung automatisch herangezogen (Castro et al., 2005; Cavallo et al., 2001). Bei einer Folgefahrt nimmt der

Fahrer das Heck (tagsüber) bzw. die Heckleuchte (nachts) des vorausfahrenden Fahrzeugs wahr (Mortimer, 1990). Mit dem sich verändernden Abstand nimmt die wahrgenommene Breite des Hecks bzw. der Heckleuchten zu (wahrgenommener Abstand zwischen den Leuchten wird größer) oder ab (Abstand wird kleiner) (Mortimer, 1990). Die Größe des Sehwinkels variiert also mit der Distanz (Cavallo et al., 2001). Außerdem wird angenommen, dass sich mit dem Abstand die wahrgenommene Helligkeit des Schlusslichts verändert (Cavallo et al., 2001). Eine Beeinflussung der wahrgenommenen Distanz durch den horizontalen Abstand zwischen den beiden Scheinwerfern eines entgegenkommenden Fahrzeugs (Castro et al., 2005) bzw. zwischen den beiden Heckleuchten eines vorausfahrenden Fahrzeugs (Buchner et al., 2006; Cavallo et al., 2001) wurde bereits nachgewiesen. So fallen die Entfernungsschätzungen für Fahrzeuge mit kleineren Abständen zwischen den Scheinwerfer bzw. Heckleuchten größer aus, als für weiter auseinanderliegende Leuchten (Buchner et al., 2006; Castro et al., 2005; Cavallo et al., 2001). Auch der vertikale Abstand zwischen Heckleuchten und Straße kann die Entfernungsschätzung signifikant beeinflussen (Buchner et al., 2006). Die geschätzten Distanzen fallen für höher angebrachte Heckleuchten größer aus, als für niedriger angebrachte Leuchten (Buchner et al., 2006). Cavallo et al. (2001) konnten diesen Effekt allerdings nicht nachweisen. Durch eine Variation des Lichtstroms des Scheinwerfers konnte ebenfalls keine Beeinflussung festgestellt werden (Castro et al., 2005). Allerdings wird ein Einfluss der wahrgenommenen relativen Helligkeit auf die Entfernungsschätzung vermutet, die sich mit dem Abstand automatisch und kontinuierlich verändert (Castro et al., 2005).

Der berichtete Forschungsstand bezieht sich auf eine teildynamische Realstudie bei Nacht mit Entfernungen zwischen 60 m und 870 m (Castro et al., 2005), eine statische Realstudie mit künstlichem Nebel bei Nacht mit Entfernungen zwischen 8 m und 28 m (Cavallo et al., 2001) und eine statische sowie dynamische, computersimulierte Studie mit Nebel bei Nacht mit Entfernungen zwischen 40 m und 60 m (Buchner et al., 2006).

4.1.1 Forschungsfrage

Da es aufgrund der zu geringen Helligkeitsdynamik von Computerbildschirmen aktuell noch nicht möglich ist, die Lichtstärke einer Heckleuchte adäquat zu simulieren (vgl. Castro et al., 2005), wurde die vorliegende Untersuchung in einer Realstudie mit einem prototypischen OLED-Display durchgeführt. Die zu schätzenden Entfernungen umfassten gängige Sicherheitsabstände für verschiedene Geschwindigkeiten im Bereich von 15 m bis 75 m.

Sowohl der horizontale Abstand zwischen den Heckleuchten als auch der vertikale Abstand zwischen den Heckleuchten und der Fahrbahn haben einen Einfluss auf die Entfernungsschätzung bei Nacht (Buchner et al., 2006; Cavallo et al., 2001). Ungeklärt bleibt hingegen, welche Rolle die wahrgenommene Helligkeit eines Schlusslichts bei der Entfernungsschätzung spielt. Die Beleuchtungsstärke, „als Maß für das auf eine Fläche auftretende Licht“ (Witting, 2014, S. 73), „nimmt mit dem Quadrat der Entfernung zur Lichtquelle ab“ (Witting, 2014, S. 78). Zusätzlich blockieren Partikel in der Luft mit zunehmender Distanz das beim Betrachter ankommende Licht (Castro et al., 2005). Eine weiter entfernte Heckleuchte sollte für den Betrachter damit dunkler erscheinen, als eine Näherliegende. Die relative Helligkeit fungiert als Pictorial Distance-Cue und liefert somit wichtige Tiefeninformationen (Flannagan et al., 2001). Castro et al. (2005) variierten in ihrer Studie den Lichtstrom des Scheinwerfers in zwei diskreten Stufen und konnten keinen Einfluss auf die Entfernungsschätzung feststellen. Allerdings vermuteten sie einen Effekt der wahrgenommenen kontinuierlichen Helligkeitsveränderung, während sich das Fahrzeug auf den Betrachter zubewegte. Durch neue Lichttechnologien und Lichtelektronik wäre es nun theoretisch möglich, in einem gesetzlich vorgegebenen Intervall, die Lichtstärke einer Heckleuchte während der Fahrt kontinuierlich anzupassen. So könnte durch eine abstandsabhängige Variabilität der Lichtstärke zu jedem Zeitpunkt eine optimale Helligkeit gewährleistet werden. Damit wäre die Heckleuchte auch bei großen Abständen immer gut sichtbar, ohne dabei im Nahbereich zu blenden. Indem die Lichtstärke kontinuierlich an den Abstand angepasst werden würde, könnte die durch den Betrachter wahrgenommene Helligkeit somit subjektiv konstant gehalten werden. Dabei stellt sich jedoch die Frage, inwiefern die kontinuierliche Anpassung der Helligkeit an den Abstand zum Hinterherfahrenden dessen Fähigkeit zur Distanzschätzung einschränken könnte. Es ist davon auszugehen, dass eine adaptive Variation der Schlusslichthelligkeit während der Fahrt, im Vergleich zu einer konstanten Helligkeit des Schlusslichts, mit einer geringeren Güte der Entfernungsschätzung einhergeht (Hypothese 1). Des

Weiteren kann von einem positiven Einfluss der Verfügbarkeit von Tiefenkriterien auf die Güte der Entfernungsschätzung ausgegangen werden (Hypothese 2). Zudem wird angenommen, dass die Entfernungsschätzungen für die verschiedenen Distanzen unterschiedlich gut ausfallen (Hypothese 3). Im zweiten Teil des Versuchs sollte außerdem untersucht werden, inwiefern eine entfernungsabhängige Helligkeitsanpassung zu einem optimalen Helligkeitsempfinden des Schlusslichts beitragen kann.

4.1.2 Methode

Die Untersuchung fand vom 02.02.2016 bis zum 04.03.2016 im Lichtassistenzzentrum der AUDI AG am Standort Ingolstadt statt. Der unterirdische Lichtkanal mit einer Gesamtlänge von 120 m, einer Breite von 12 m und einer Höhe von 5 m ist mattschwarz lackiert und mit einem befahrbaren, straßenähnlichen Bodenbelag ausgestattet (Strohbach & Floss, 2015).

4.1.2.1 Stichprobe

Am Experiment nahmen insgesamt 32 Personen teil. Da der Versuch mit einer Dauer von insgesamt etwa zwei Stunden auf zwei Messzeitpunkten aufgeteilt werden musste, gingen insgesamt nur 25 vollständige Datensätze in die Auswertung ein, da nicht alle Probanden an beiden Versuchszeitpunkten teilnehmen konnten. Die Teilnehmer waren zwischen 19 und 53 Jahre alt (M = 29.32; SD = 8.23). Sieben Personen waren weiblich (28.00 %). Alle Teilnehmer hatten eine normale (60.00 %) oder korrigierte Sehstärke (40.00 %). Die Teilnehmer waren alle Mitarbeiter der AUDI AG und in der Lichtentwicklung tätig.

4.1.2.2 Versuchsaufbau

Zwei Displays, bestehend aus jeweils 65 einzeln ansteuerbaren OLED-Kacheln (siehe Bachmaier, 2016), wurden jeweils so programmiert, dass sie näherungsweise der Fläche und Form des Schlusslichts gegenwärtiger Audi A4-Modelle (2015) entsprachen. Eine OLED-Kachel hatte eine Gesamtfläche von 20.71 cm² (4.74 cm x 4.37 cm) und eine Leuchtfläche von 11.51 cm² (3.80 cm x 3.03 cm). Die leuchtenden Flächen bestanden jeweils aus 9 Segmenten und ergaben damit eine Leuchtfläche von 103.63 cm² pro Display. Beide Leuchtflächen wurden ca. 0.70 m voneinander entfernt und auf einer Höhe von ca. 0.85 m angebracht (siehe Abbildung 4.1-1). Die einzelnen OLED-Segmente wurden

über die Software e:cue lighting control angesteuert und mittels Pulsweitenmodulation im Laufe des Versuchs auf verschiedene Stufen gedimmt.

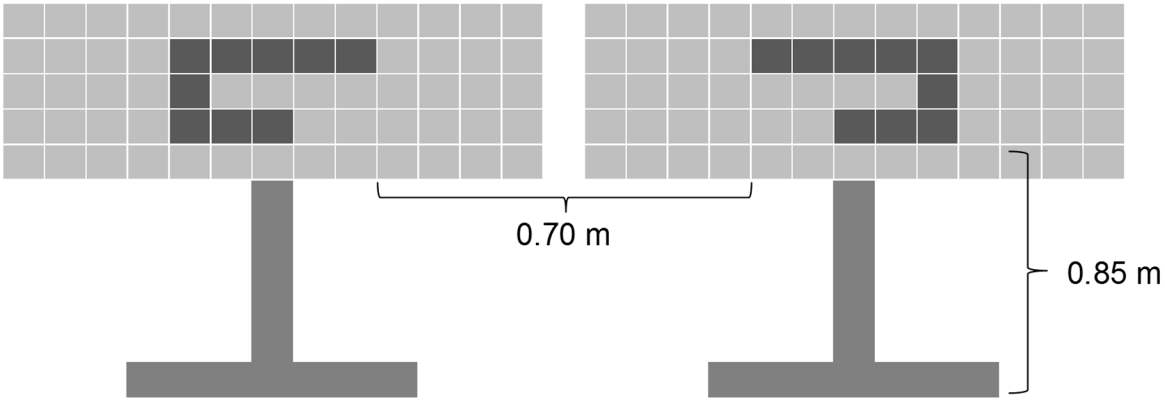

Abbildung 4.1-1. Schematische Darstellung der beiden OLED-Displays mit dunkel eingezeichneter Leuchtfläche.

Die Probanden saßen auf dem Fahrersitz eines Audi Q5 (2016), dessen Fahrzeugspitze zu Beginn jeder Erhebung 90.0 m von den Leuchtflächen des Displays entfernt stand (siehe Abbildung 4.1-2). Die hinteren Seitenscheiben sowie der aus Fahrersicht rechte Teil der Windschutzscheibe wurden abgedunkelt, um die Orientierung anhand von Anhaltspunkten an den Seitenwänden zu erschweren. Die vorderen Seitenscheiben wurden nicht abgedeckt, um die Sicht in die Seitenspiegel zu ermöglichen. Im Fahrzeuginneren wurden sämtliche Anzeigen und Lichtquellen abgeschaltet bzw. abgedeckt. Die Versuchspersonen wurden kontrolliert, aufrecht zu sitzen und ihre Augen auf einer Höhe von ca. 1.30 m–1.40 m zu halten.

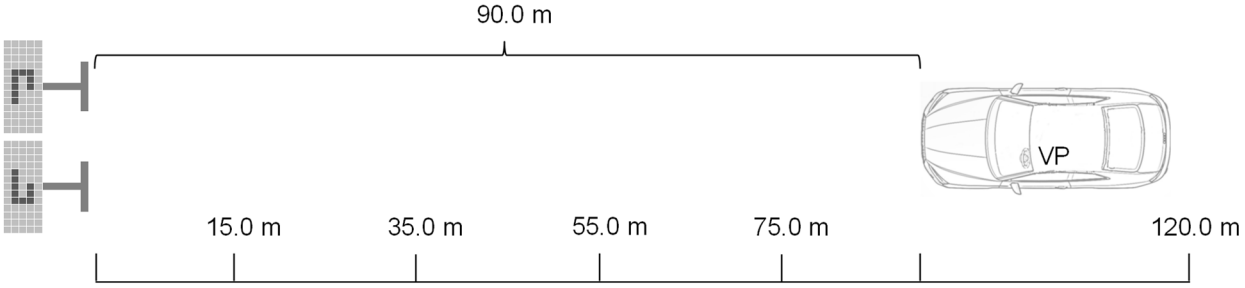

Abbildung 4.1-2. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit VP = Versuchsperson.

In der vorliegenden Untersuchung wurden die Probanden aufgefordert, mit ihrem Fahrzeug einen bestimmten Abstand zu einem anderen Fahrzeug einzustellen. Das Zielfahrzeug wurde dabei durch zwei leuchtende Schlusslichter (Leuchtflächen der beiden OLED-Displays) simuliert. Für eine korrekte Entfernungsschätzung standen den

Probanden verschiedene Tiefenkriterien (siehe Tabelle 4.1-1), im Folgenden Distance-Cues genannt, zur Verfügung.

Tabelle 4.1-1. Überblick über die wichtigsten Tiefenkriterien der vorliegenden Studie.

Versuchsumgebung	**Distance-Cue**
Lichtkanal (Tunnelsituation)	Lineare Perspektive
Spurmarkierungen	Lineare Perspektive
Anordnung der Deckenbeleuchtung	Lineare Perspektive
Umgebungshelligkeit	Helligkeitsverläufe und Schatten
Straßenbelag	Strukturgradient
Heckleuchte	Sehwinkel
	Retinales Abbild
	Gewohnte Größe
	Detailperspektive

4.1.2.3 Studiendesign

Die Forschungsfrage wurde in einem dreifaktoriellen Versuchsdesign mit Messwiederholung untersucht. Als unabhängige Variablen gingen dabei die Lichtstärke der OLED-Displays (adaptiv, konstant), die Distance-Cue-Dichte der Umgebung (maximal reduziert, leicht reduziert) sowie die einzustellende Distanz zur Heckleuchte (15.0 m, 35.0 m, 55.0 m, 75.0 m) in die Untersuchung ein. Die einzelnen Bedingungen werden im Folgenden beschrieben.

In der Bedingung „adaptive Lichtstärke“ wurde die Helligkeit der Displays mit abnehmender Distanz der Probanden linear heruntergedimmt. So hatten die Displays bei einer maximalen Distanz von 90.0 m eine Lichtstärke von 21.8 cd, die mit abnehmender Entfernung linear bis auf 0.6 cd bei 15.0 m heruntergedimmt wurde. Diese Werte wurden in einer internen Voruntersuchung auf Höhe der jeweiligen Distanz mit einer vergleichbaren Helligkeit wahrgenommen. Da sich die Versuchspersonen in der Studie mit einer konstanten Geschwindigkeit von 3.0 km/h (Standgas des Automatikgetriebes) auf die Displays zubewegten, reduzierte sich die Helligkeit jede Sekunde um 0.83 %. In der Bedingung „konstante Lichtstärke“ wurde die Helligkeit stets konstant bei 1.6 cd gehalten. Bei ausreichender Sicht und Helligkeit wird die Silhouette des Fahrzeugs als Informationsquelle zur Entfernungsschätzung herangezogen (Buchner et al., 2006; Cavallo et al., 2001). Bei schlechten bzw. dunklen Sichtverhältnissen muss die Entfernung mithilfe der Heckleuchten geschätzt werden. Um den Effekt der Manipulation einzelner Attribute an der Heckleuchte zu messen, sollte die Silhouette des Fahrzeugs

bzw. in diesem Fall des OLED-Displays daher nicht sichtbar sein. Cavallo et al. (2001) wählten ein reales Szenario, in dem ein künstlicher Nebel so dicht war, dass nur noch die Leuchten sichtbar waren. Das Problem dabei ist, dass wichtige andere Tiefenkriterien der Umgebung, wie der Texturgradient oder die lineare Perspektive verloren gehen (Buchner et al., 2006). Buchner et al. (2006) wählten ein computersimuliertes Szenario. Mit einer Simulation lassen sich allerdings keine realistischen Lichtwerte abbilden. Um in einer realen Umgebung ohne Nebel auch bei einer geringen Distanz die Umrisse des OLED-Displays zu verbergen, wurde für die konstante Bedingung eine geringe Lichtstärke verwendet.

In der Bedingung „maximal reduzierte Distance-Cue-Dichte“ wurde die Umgebung innerhalb des Lichtassistenzzentrums komplett abgedunkelt. Lediglich die schwache Beleuchtung von vier Notausgangsleuchten sowie das simulierte Schlusslicht führten zu einer Umgebungshelligkeit sowohl innerhalb als auch außerhalb des Fahrzeugs von ca. 0.1 lx am Versuchsstartpunkt. Die Abmessungen des Schlusslichts, die Detailperspektive der OLED-Kacheln, das durch das Schlusslicht erzeugte Licht und der Schatten, die lineare Perspektive der Testumgebung und die Bewegungsparallaxe durch die Fahrbewegung, konnten somit als Distance-Cues vom Probanden herangezogen werden, um die Entfernung zur Heckleuchte zu schätzen. In der Bedingung „leicht reduzierte Distance-Cue-Dichte“ wurde die Umgebungshelligkeit auf ca. 8.8 lx erhöht. Dies führte zu einer Lichtstärke von ca. 1.0 lx im Fahrzeuginnenraum. Zusätzlich wurden reflektierende Fahrbahnmarkierungen auf dem Boden aufgebracht. Die Fahrbahnmarkierungen wurden beidseitig vom Fahrzeug angebracht und hatten jeweils eine Länge von 6.0 m mit einem Abstand zwischen den Markierungen von jeweils 12.0 m. Dies entspricht den Strich- und Lückenlängen von Längsmarkierungen auf deutschen Autobahnen (Deutscher Verkehrssicherheitsrat, 2014). Die Fahrbahnbreite betrug 3.75 m, was einer mittleren Fahrspur auf einer deutschen Autobahn entspricht. Damit standen den Probanden weitere Distance-Cues in Form von zusätzlichem Licht und Schatten, einer verbesserten linearen Perspektive auf Boden und Decke und dem Texturgradienten des Straßenbelags, zur Verfügung.

Die Variable „Distanz zur Heckleuchte“ wurde in vier Stufen variiert: 15.0 m, 35.0 m, 55.0 m und 75.0 m. Entfernungen in Metern zu schätzen, ist eine nicht alltägliche Aufgabe und kann deshalb schwerfallen (Buchner et al., 2006). Beim Autofahren sind wir es lediglich gewohnt, bestimmte Sicherheitsabstände zum Vordermann einzustellen (Cavallo et al., 2001). Die Probanden wurden daher instruiert, sich mit ihrem

Fahrzeug dem simulierten Schlusslicht bis zu einer vorgegebenen Entfernung (15.0 m, 35.0 m, 55.0 m, 75.0 m) zu nähern (Beispielinstruktion: „Stellen Sie bitte einen Abstand von 15.0 Meter zur Leuchte her. Dies entspricht dem Sicherheitsabstand bei 30 km/h.“). Um eine realitätsnahe Fahrsituation abbilden zu können, wurde eine teildynamische Situation hergestellt. Dabei blieben die Displays über den gesamten Versuch an einem festen Ort installiert, während sich die Teilnehmer mit dem Fahrzeug darauf zu bewegten. Die Probanden sollten ausschließlich im Standgas des Automatikgetriebes (ca. 3.0 km/h) fahren und anhalten, wenn nach ihrer Einschätzung die entsprechende Distanz erreicht wurde. Dadurch wurde unter standardisierten Experimentallbedingungen eine möglichst realitätsnahe Situation hergestellt. Um extreme Ausreißer bei der Entfernungsschätzung, wie beispielsweise bei Cavallo et al. (2001) zu verhindern, wurden die Probanden darüber informiert, dass die gesamte Distanz zwischen Startpunkt und OLED-Displays 90.0 m betrug.

Als Abhängige Variable wurde die Güte der Entfernungsschätzung erhoben. Dazu wurde die Entfernung mithilfe eines Lasermessgeräts in Metern [m] aufgezeichnet und für eine bessere Vergleichbarkeit anschließend in einen prozentualen Wert [%] umgewandelt.

4.1.2.4 Versuchsablauf

Der Proband fuhr beim auditiven Startsignal des Versuchsleiters los. Sobald die Person zum Stillstand kam, notierte der Versuchsleiter mithilfe eines Lasermessgeräts die tatsächliche Entfernung zwischen Display-Leuchtflächen und Fahrzeug. Daraufhin fuhren die Probanden rückwärts zurück auf den Startpunkt und der nächste Durchgang startete. Um die korrekte Startposition einfacher auffindbar zu machen, sollte der Proband so weit zurückfahren, bis sich seine Kopfposition auf einer Linie mit zwei Orientierungsstreifen links und rechts auf dem Boden befand. War dies der Fall, befand sich die Fahrzeugspitze 90.0 m vom Schlusslicht entfernt. Nach einem Übungsdurchgang absolvierte jede Versuchsperson je zwei Schätzungen bezüglich der vier Distanzen in jeder Bedingung, also acht Entfernungsschätzungen in der adaptiven und acht Schätzungen in der konstanten Lichtstärkebedingung. Die Bedingungen wurden blockweise gefahren, die Abfolge wurde randomisiert. Innerhalb einer jeden Bedingung wurden ebenso die zu schätzenden Entfernungen randomisiert. Zum ersten Versuchszeitpunkt wurde der gesamte Versuch in der Bedingung mit maximal reduzierten Distance-Cues durchgeführt. In einem Abstand von etwa einer Woche wurde der Versuch in der Bedingung mit leicht reduzierten Distance-Cues wiederholt.

Nach insgesamt 16 Distanzschätzungen pro Versuchszeitpunkt wurden die Probanden gebeten, Urteile bezüglich ihres subjektiven Helligkeitsempfindens zu geben. Dabei wurde für verschiedene Entfernungen die optimale Helligkeit für ein Schlusslicht erfragt (siehe Rabenau, Patzig, & Khanh, in press). Dafür positionierten sich die Teilnehmer mithilfe des Versuchsleiters in gleichbleibender Reihenfolge bei den Distanzen 75.0 m, 55.0 m, 35.0 m und 15.0 m. Der Versuchsleiter dimmte die Lichtstärke des Schlusslichts innerhalb von 60.0 s kontinuierlich von dunkel (0.3 cd) auf hell (27.1 cd). Der Proband gab ein Zeichen, wenn die Helligkeit des Schlusslichts subjektiv als „zu hell und unangenehm blendend“ wahrgenommen wurde. Daraufhin dimmte der Versuchsleiter die Lichtstärke des Schlusslichts innerhalb von 60.0 s kontinuierlich von hell (27.1 cd) auf dunkel (0.3 cd). Der Proband wurde gebeten, ein Zeichen zu geben, wenn die Helligkeit des Schlusslichts subjektiv als „zu dunkel für ein Schlusslicht“ wahrgenommen wurde. Diese beiden Werte wurden notiert, ehe dasselbe Prozedere für die nächst nähere Distanz vorgenommen wurde.

Nach der abschließenden Nachbefragung und der Aufklärung über die Studienziele, wurde die jeweilige Versuchssitzung mit einer Dauer von insgesamt etwa einer Stunde beendet.

4.1.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Auswertung der Entfernungsschätzungen, des subjektiven Helligkeitsempfindens und der Nachbefragung dargestellt.

4.1.3.1 Ergebnisse der Entfernungsschätzungen

Die Messung wurde in jeder der 16 Bedingungen zweimal wiederholt. Der Versuch bestand somit pro Versuchsperson aus insgesamt 32 Durchgängen. Über alle Versuchspersonen hinweg gingen insgesamt 800 Entfernungsschätzungen in die Auswertung ein.

Um zu überprüfen, ob aus den beiden Messwerten pro Bedingung ein Mittelwert gebildet werden durfte, wurde die Retest-Reliabilität der Rohwerte für die beiden Messzeitpunkte ermittelt. Dazu wurde der Korrelationskoeffizient nach Pearson berechnet. Tabelle 4.1-2 zeigt die Ergebnisse dieser Reliabilitätsanalyse. Dabei ergaben sich Korrelationen, die zwischen .70 und .96 liegen. Die Analyse mittels *t*-Test ergab keine signifikanten Korrelationen zwischen den beiden Messzeitpunkten. Für die beiden Messzeitpunkte ergab sich ein Cronbachs Alpha von .96. Auch die Richtung des Fehlers (Unterschätzung vs. Überschätzung der Entfernung) war in 90.75 % der Fälle identisch.

Ein Lerneffekt war nicht festzustellen. So wurde in 48.03 % der Fälle die erste Messung besser absolviert (geringere Abweichung zur einzustellenden Distanz), als die zweite Messung. Nach dieser Überprüfung wurde jeweils ein Mittelwert aus den Entfernungsschätzungen beider Messzeitpunkte berechnet, welcher in die folgenden Berechnungen einging.

Tabelle 4.1-2. Ergebnisse der Reliabilitätsanalyse. *N* = 25.

Distance-Cue-Dichte	**Schlusslicht-funktion**	**Entfernung**	**Pearson-Korrelation**
maximal reduziert	adaptiv	15.0 m	.86 **
maximal reduziert	konstant	15.0 m	.85 **
leicht reduziert	adaptiv	15.0 m	.90 **
leicht reduziert	konstant	15.0 m	.83 **
maximal reduziert	adaptiv	35.0 m	.95 **
maximal reduziert	konstant	35.0 m	.91 **
leicht reduziert	adaptiv	35.0 m	.70 **
leicht reduziert	konstant	35.0 m	.89 **
maximal reduziert	adaptiv	55.0 m	.76 **
maximal reduziert	konstant	55.0 m	.84 **
leicht reduziert	adaptiv	55.0 m	.82 **
leicht reduziert	konstant	55.0 m	.73 **
maximal reduziert	adaptiv	75.0 m	.93 **
maximal reduziert	konstant	75.0 m	.96 **
leicht reduziert	adaptiv	75.0 m	.78 **
leicht reduziert	konstant	75.0 m	.71 **

Anmerkung: ** Korrelation ist bei Niveau 0.01 signifikant (einseitig).

Zunächst erfolgte die deskriptive Betrachtung der Ergebnisse (siehe Tabelle 4.1-3). Die Streuung um den Mittelwert der Entfernungsschätzungen fiel für die Distance-Cue-Bedingung „maximal reduziert“ höher aus, als für die Bedingung „leicht reduziert“. Für die Distanzen 15.0 m, 35.0 m und 55.0 m wurde die Entfernung tendenziell eher überschätzt, das heißt die Probanden kamen bei einer größeren, als der einzustellenden Distanz zum Stehen. Die Distanz von 75.0 m hingegen wurde tendenziell eher etwas unterschätzt. Die Tendenz zur Unterschätzung war in der Distance-Cue-Bedingung „leicht reduziert“ stärker ausgeprägt, als in der Bedingung „maximal reduziert“.

Tabelle 4.1-3. Deskriptive Betrachtung der Entfernungsschätzungen. *N* = 25.

Distance-Cue-Dichte	Schlusslicht-funktion	Entfernung	Mittelwert	Standard-abweichung
maximal reduziert	adaptiv	15.0 m	23.23 m	6.07 m
maximal reduziert	konstant	15.0 m	22.87 m	6.07 m
leicht reduziert	adaptiv	15.0 m	23.23 m	3.89 m
leicht reduziert	konstant	15.0 m	23.15 m	3.67 m
maximal reduziert	adaptiv	35.0 m	44.49 m	9.20 m
maximal reduziert	konstant	35.0 m	45.45 m	9.33 m
leicht reduziert	adaptiv	35.0 m	41.40 m	5.26 m
leicht reduziert	konstant	35.0 m	41.94 m	5.49 m
maximal reduziert	adaptiv	55.0 m	59.13 m	6.58 m
maximal reduziert	konstant	55.0 m	58.99 m	7.39 m
leicht reduziert	adaptiv	55.0 m	57.07 m	4.92 m
leicht reduziert	konstant	55.0 m	57.02 m	4.87 m
maximal reduziert	adaptiv	75.0 m	73.20 m	5.57 m
maximal reduziert	konstant	75.0 m	72.32 m	8.09 m
leicht reduziert	adaptiv	75.0 m	71.97 m	4.35 m
leicht reduziert	konstant	75.0 m	71.96 m	3.65 m

Um das Verhältnis zwischen den tatsächlichen und den zu schätzenden Distanzen zu untersuchen, wurde über alle Bedingungen eine Regressionsanalyse durchgeführt: $R^2 = .89$, $F(1, 45) = 3825.53$, $p = .000$. Abbildung 4.1-3 zeigt die Mittelwerte über alle Bedingungen für die geschätzten Distanzen im Vergleich zu den realen Distanzen.

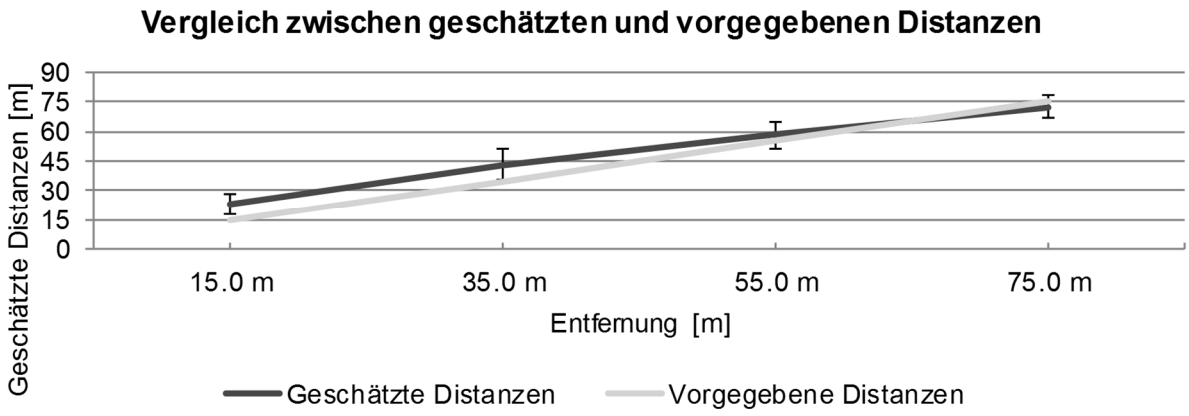

Abbildung 4.1-3. Vergleich zwischen geschätzten und vorgegebenen Distanzen. *N* = 25.

Um die Güte der Entfernungsschätzung bestimmen zu können, wurde die Größe der Verschätzung als prozentualer Fehler im Betrag berechnet:

$$\frac{|(geschätzte\ Distanz - vorgegebene\ Distanz)|}{vorgegebene\ Distanz} \times 100\%$$

Damit ließen sich die verschiedenen Distanzen miteinander vergleichen (siehe Abbildung 4.1-4). Über alle Entfernungen hinweg wurde die Entfernung bei nur leicht reduzierten Distance-Cues etwas besser geschätzt, als in der Bedingung mit maximal reduzierten Distance-Cues.

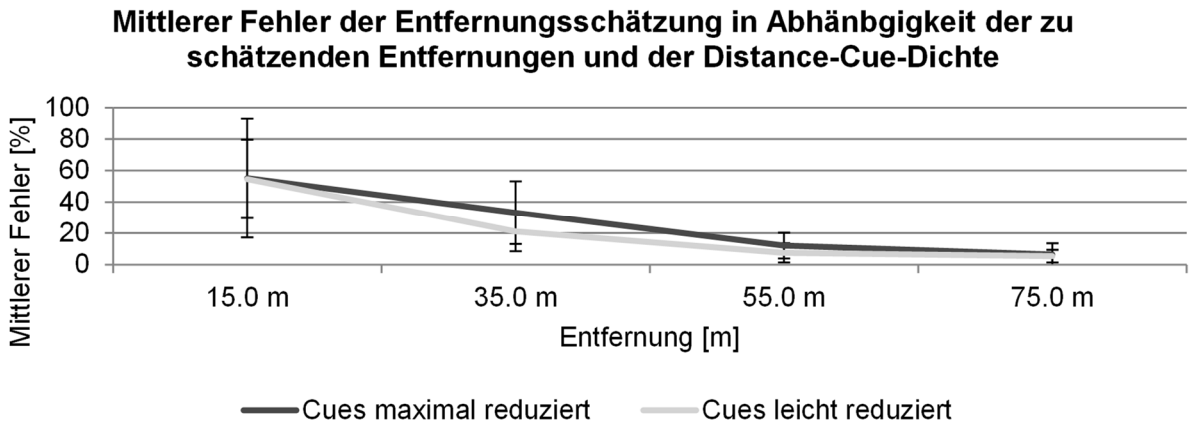

Abbildung 4.1-4. Mittlerer Fehler [%] der Entfernungsschätzung in Abhängigkeit der zu schätzenden Entfernungen und der Distance-Cue-Dichte. *N* = 25.

Die Schlusslichtfunktion schien keinen Einfluss auf die Güte der Entfernungsschätzung zu haben (siehe Abbildung 4.1-5).

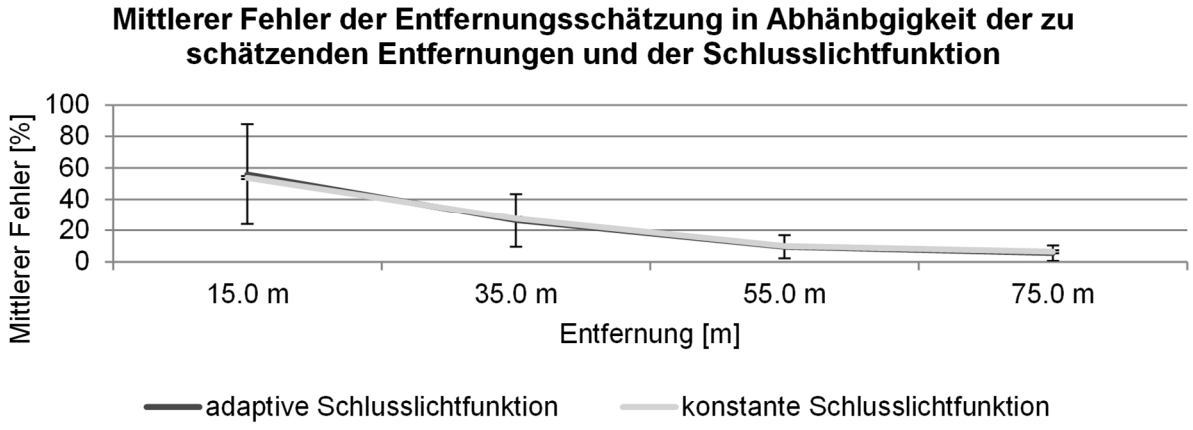

Abbildung 4.1-5. Mittlerer Fehler [%] der Entfernungsschätzung in Abhängigkeit der zu schätzenden Entfernungen und der Schlusslichtfunktion. *N* = 25.

Zur Überprüfung der Hypothesen wurde eine mehrfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung berechnet. Es gab insgesamt drei Faktoren: Schlusslichtfunktion (zwei Stufen: adaptiv, konstant), Distance-Cue-Dichte (zwei Stufen: maximal reduziert, leicht reduziert) und Entfernung (vier Stufen: 15.0 m, 35.0 m, 55.0 m, 75.0 m). Jeder Proband durchlief jede Bedingung (within-subjects Design). Es ergab sich ein signifikanter Einfluss der Distance-Cue-Dichte auf die

Entfernungsschätzung ($F(1, 24) = 4.86$, $p = .037$, $\eta_p^2 = .17$). Die Verfügbarkeit von Distance-Cues nahm signifikant Einfluss auf die Entfernungsschätzung. Dabei wurde der Unterschied zwischen den Bedingungen insbesondere bei den Entfernungen 35.0 m und 55.0 m deutlich. Es wurde 17 % der Variation der Entfernungsschätzung durch die Distance-Cue-Dichte aufgeklärt. Durch die Schlusslichtfunktion konnte jedoch kein signifikanter Haupteffekt festgestellt werden ($F(1, 24) = 0.02$, $p = .903$, $\eta_p^2 = .00$). Es ergab sich ein Haupteffekt der Entfernung ($F(1.28, 30.64) = 71.71$, $p = .000$, $\eta_p^2 = .75$). Die Entfernung nahm somit signifikant Einfluss auf die Entfernungsschätzung. Es wurde 75 % der Variation der Entfernungsschätzung durch die Entfernung aufgeklärt. Für die Variable Entfernung ergaben sich zwischen allen Entfernungen signifikante Post-Hoc-Tests. In der Analyse zeigten sich keine signifikanten Interaktionseffekte zwischen den Variablen Distance-Cue-Dichte und Schlusslichtfunktion ($F(1, 24) = 0.00$, $p = .961$, $\eta_p^2 = .00$), zwischen den Variablen Distance-Cue-Dichte und Entfernung ($F(1.55, 37.07) = 2.10$, $p = .099$, $\eta_p^2 = .08$), zwischen den Variablen Schlusslichtfunktion und Entfernung ($F(1.72, 41.38) = 0.62$, $p = .560$, $\eta_p^2 = .03$) und zwischen den Variablen Distance-Cue-Dichte, Schlusslichtfunktion und Entfernung ($F(1.85, 44.47) = 0.47$, $p = .707$, $\eta_p^2 = .02$).

4.1.3.2 Ergebnisse des subjektiven Helligkeitsempfindens

Die Urteile der Probanden bezüglich der wahrgenommenen Helligkeit („zu hell“, „zu dunkel“) sind Abbildung 4.1-6 zu entnehmen. Unter den gegebenen Umgebungsbedingungen wurden bei allen Distanzen Lichtstärken als zu dunkel empfunden, die noch unter dem gesetzlichen Minimum von 4.0 cd liegen. Die Schwelle zu einem als zu dunkel empfundenen Schlusslicht schien nicht von der Verfügbarkeit der Distance-Cues abzuhängen. Die gewählten Lichtstärken lagen für die Entfernungen 35.0 m, 55.0 m und 75.0 m sehr nahe beieinander. Für die geringste Distanz von 15.0 m wurden im Durchschnitt die geringsten Lichtstärken angegeben. Das Schlusslicht wurde bereits deutlich unter dem gesetzlichen Maximum von 17.0 cd als zu hell wahrgenommen. Dabei lag die subjektive Blendungsschwelle bei einer helleren Umgebungshelligkeit (Distance-Cues leicht reduziert) höher, im Vergleich zu einer dunklen Umgebung (Distance-Cues maximal reduziert). Die Bewertungen für die Distanzen 35.0 m, 55.0 m und 75.0 m fielen sehr ähnlich aus. Für die geringste Distanz von 15.0 m wurden die niedrigsten Lichtstärkewerte angegeben.

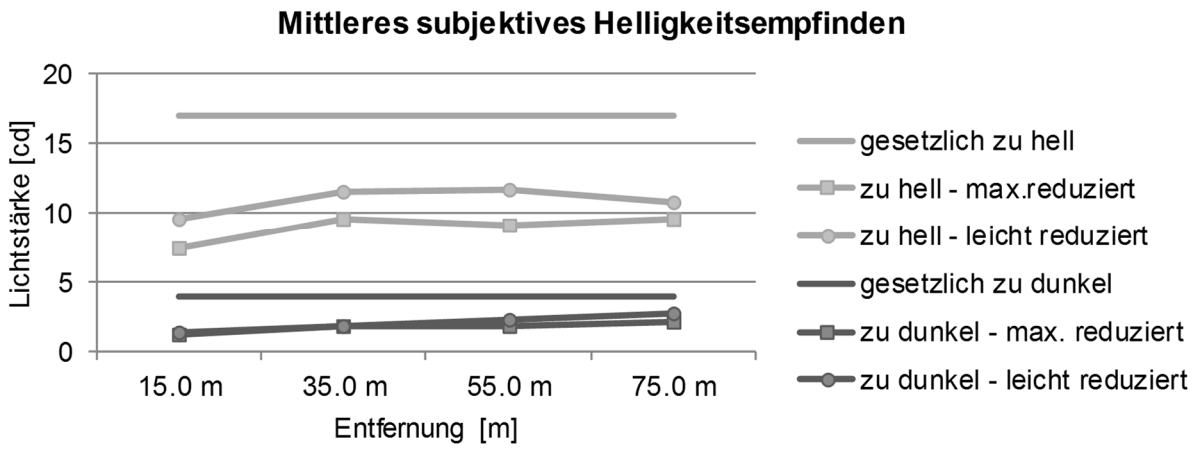

Abbildung 4.1-6. Gemittelte Lichtstärken [cd], die in Abhängigkeit der Distanz (15.0 m, 35.0 m, 55.0 m, 75.0 m) und der Distance-Cue-Dichte (maximal reduziert, leicht reduziert) als zu hell und zu dunkel beurteilt wurden. *N* = 25.

4.1.3.3 Ergebnisse der Nachbefragung

In den Nachbefragungen wurden die Strategien der Probanden erhoben, mithilfe derer die Distanzschätzungen vollzogen wurden. Dabei konnten die Personen zu beiden Versuchszeitpunkten jeweils mehrere Strategien in einem offenen Antwortformat nennen. Insgesamt wurden 57 Angaben zur Strategie gemacht. In ca. der Hälfte aller Nennungen (47.37 %) wurde angegeben, dass die zu schätzende Entfernung gedanklich mit einer bekannten Größe in Relation gesetzt wurde. Als Beispiele hierfür wurden Fahrzeuglängen, Sicherheitsabstände, der Abstand zwischen Leitpfosten oder die Länge von Bahnen in Schwimmbädern genannt. In 15.79 % der Nennungen wurde der Ausgangspunkt bei 90.0 m als Anker für die Entfernungsschätzung angegeben. 10.53 % der Nennungen beschreiben, dass Merkmale der Untersuchungsumgebung zur Entfernungsschätzung halfen. In etwa einem Drittel der Nennungen (28.07 %) wurde angegeben, dass die Schätzung ohne eine konkrete Strategie vorgenommen wurde, sondern über ein nicht näher zu beschreibendes „Bauchgefühl“ geschätzt wurde. 17.54 % der Nennungen gaben außerdem das Fahrgefühl als Hilfe für die Entfernungsschätzung an. In weiteren 10.53 % half das Zeitgefühl, das sich aus der Relation von zurückgelegtem Weg in einer bestimmten Zeit ergab. Das Vorhandensein bestimmter Distance-Cues wurde von einigen Probanden bewusst zur Entfernungsschätzung genutzt: 10.53 % der Angaben beschreiben die Nutzung der Detailperspektive (z.B. das Erkennen der einzelnen OLED-Segmente oder der Struktur des Bodens) und in 12.28 % der Fälle wurde angeben, dass die Probanden die Distanzen mithilfe der Linearperspektive (z.B. durch die Spurmarkierungen) schätzen konnten.

4.1.4 Diskussion

Das Schlusslicht spielt eine elementare Rolle im Straßenverkehr, indem es einen Vorausfahrenden bei Dunkelheit und schlechter Sicht besser erkennbar werden lässt und Tiefeninformationen zur Distanzschätzung liefert. Aufgrund dieser sicherheitsrelevanten Eigenschaften eines Schlusslichts bedarf die Manipulation bestimmter Attribute einer Heckleuchte somit sorgfältiger Untersuchung.

4.1.4.1 Einfluss einer adaptiven Heckleuchte auf die Entfernungsschätzung

In der vorliegenden Studie wurden die Probanden aufgefordert, eine bestimmte Distanz zwischen ihrem Fahrzeug und einem vorausfahrenden Fahrzeug einzustellen. Das vorausfahrende Fahrzeug wurde durch eine statische Heckleuchte präsentiert, die mittels zweier OLED-Displays realisiert wurde. Während des Versuchs wurde die Verfügbarkeit der Distance-Cues (maximal reduziert, leicht reduziert) sowie die Modalität der Schlusslichthelligkeit (adaptiv, konstant) variiert. Ein Effekt auf die Entfernungsschätzung durch die Anpassung der Helligkeit des Schlusslichts konnte nicht nachgewiesen werden (Hypothese 1). Die Entfernungsschätzungen fielen bei einer konstanten Helligkeit des Schlusslichts genauso gut aus, wie bei einer adaptiven Anpassung des Schlusslichts an die aktuelle Distanz. Es zeigte sich jedoch, dass sich die Entfernungsschätzung verbesserte, wenn dem Probanden mehr Distance-Cues zur Verfügung standen (Hypothese 2). Die verschiedenen Distanzen wurden unterschiedlich gut geschätzt (Hypothese 3).

4.1.4.2 Einfluss der Distanz auf das Helligkeitsempfinden

Die Probanden wurden zum Ende des Versuchs aufgefordert in Abhängigkeit der Distanz und Umgebungsbedingungen (Verfügbarkeit von Distance-Cues) ihre optimale Helligkeit eines Schlusslichts anzugeben. Dazu wurde jeweils ein Korridor ermittelt, in dem das Schlusslicht der OLED-Displays weder als „zu hell“ noch als „zu dunkel“ wahrgenommen wurde. Dabei lagen die maximalen und minimalen Lichtstärken jeweils unter den gesetzlichen Grenzen. Es bleibt zu berücksichtigen, dass die Umgebungshelligkeit in diesem Versuch auf einem niedrigen Niveau gehalten wurde, was eine gute Sichtbarkeit des Schlusslichts in allen Untersuchungsbedingungen gewährleistete. Die Umgebungshelligkeiten in der realen Außenwelt decken dabei ein deutlich breiteres Spektrum ab. Die Verfügbarkeit von zusätzlichen Distance-Cues (Licht und Schatten durch die gedimmte Deckenbeleuchtung und eine verbesserte lineare Perspektive durch

Spurmarkierungen und die Anordnung der Deckenlampen) wirkte sich lediglich leicht auf die Bewertung der maximalen Lichtstärke („zu hell“) aus. In dunklerer Umgebung wurden dabei schon niedrigere Lichtstärkewerte als zu hell empfunden, im Vergleich zu einer etwas helleren Umgebung. Es zeigte sich, dass es für die Bewertung des optimalen Helligkeitsempfindens kaum Unterschiede für die Distanzen im Fernfeld gab. Der Korridor für eine optimale Schlusslichthelligkeit lag für die Distanzen 35.0 m, 55.0 m und 75.0 m in einem ähnlichen Bereich. Lediglich für die kleinste Distanz von 15.0 m ergab sich eine durchschnittlich niedrigere optimale Helligkeit für das Schlusslicht.

4.1.4.3 Schlussfolgerungen

In der Studie wurde im ersten Versuchsabschnitt untersucht, inwiefern sich ein adaptives Schlusslicht auf die Entfernungsschätzung auswirken kann. Dabei ließ sich kein Effekt einer adaptiven Helligkeitsanpassung auf die Güte der Distanzschätzung feststellen. Die Entfernung zwischen Fahrzeug und Prototypen-Heckleuchte wurde unabhängig von der Schlusslichtfunktion gleich gut wahrgenommen. Das Ergebnis der anschließenden Befragung zum Helligkeitsempfinden weist darauf hin, dass eine Anpassung des Schlusslichts im Bereich des Nahfelds einen Komfortgewinn für einen Hinterherfahrenden mit sich bringen könnte. Eine Adaption des Schlusslichts an die Distanz zwischen zwei Fahrzeugen wurde von den Probanden im Bereich des Fernfelds nicht gewünscht.

Die Studie wurde bei klarer Sicht mit maximal 75.0 m Entfernung zwischen den Fahrzeugen durchgeführt. Für schlechtere Sichtverhältnisse (wie z.B. bei Nebel) könnte eine Anpassung der Helligkeit und einer damit einhergehenden Verbesserung der Sichtbarkeit sicherheitsfördernd wirken. „Da die Sichtbehinderungen insbesondere bei Nebel stark variieren, sind Systeme mit einer adaptiven Lichtsteuerung vielversprechend“ (Schlag et al., 2009, S. 22). Von einer damit einhergehenden Verschlechterung der Güte der Entfernungsschätzung ist aufgrund der Ergebnisse nicht auszugehen. Hierfür scheinen vielmehr andere Attribute der Heckleuchte bedeutsamer zu sein, wie zum Beispiel der horizontale Abstand zwischen den Leuchten und der vertikale Abstand zwischen der Leuchte und der Fahrbahn (siehe Buchner et al., 2006; Castro et al., 2005).

4.1.4.4 Einschränkungen und Ausblick

Die Methodik der vorliegenden Studie beschreibt einen Kompromiss zwischen einer realitätsnahen, aber auch standardisierten und reproduzierbaren Versuchsumgebung. So wurde eine dynamische Versuchssituation mit einem fahrenden Auto angestrebt, um ein Fahrgefühl beim Probanden zu erzeugen. Da der Versuch jedoch in einem 120.0 m langen Lichtkanal durchgeführt wurde, konnte nur eine teildynamische Situation hergestellt werden. Die Fahrgeschwindigkeit betrug lediglich 3.0 km/h. Die zu bewertende Heckleuchte veränderte während des Versuchs ihre Position nicht. In einem nächsten Schritt sollte der Versuch in einer dynamischen Folgefahrt mit verkehrsähnlichen Geschwindigkeiten wiederholt werden, um den Probanden das Einstellen von echten Sicherheitsabständen zu erleichtern. Ohne eine konstante Variable, in Form der statischen Prototypen-Leuchte, könnte ein fester Ausgangpunkt bei 90.0 m den Probanden auch nicht mehr als Anker für die Entfernungsschätzung dienen. So ist in der vorliegenden Versuchsbedingung nicht auszuschließen, dass anstelle eines einzustellenden Abstandes von 75.0 m zur Heckleuchte, ein Abstand von 15.0 m vom Ausgangspunkt (90.0 m – 75.0 m = 15.0 m) eingestellt wurde. Eine Wiederholung in einer Folgefahrt mit einem echten Fahrzeug anstelle einer durch zwei OLED-Displays simulierten Heckleuchte könnte außerdem die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben bezüglich der Lichtstärke eines Schlusslichts berücksichtigen. Der Lichtkanal als Raum mit Seitenwänden und Decke lässt sich gut mit einer Tunnelsituation vergleichen. Eine Wiederholung auf einer Straße ohne Seitenbegrenzungen und Decke wäre allerdings notwendig, um die vorliegenden Ergebnisse auf weitere Verkehrssituationen übertragen zu können. Auf einer realen Fahrbahn würden den Probanden damit auch weitere Distance-Cues, wie eine vorbeiziehende Landschaft mit Bäumen oder Häusern, zur Entfernungsschätzung zur Verfügung stehen.

In diesem Kapitel wurde der Frage nachgegangen, inwiefern eine Helligkeitsadaption im Schlusslicht die Entfernungsschätzung während der Fahrt bei Dunkelheit beeinflussen kann. Dabei konnte kein Effekt eines adaptiven Schlusslichts auf die Güte der Schätzung nachgewiesen werden.
Die Literatur weist darauf hin, dass bestimmte Attribute einer Heckleuchte Einfluss auf die wahrgenommene Distanz nehmen können. Das nächste Kapitel beschäftigt sich daher mit Aspekten der Heckleuchtengestaltung und deren Rolle auf die Distanzwahrnehmung.

4.2 Einfluss der Heckleuchtengestaltung auf die Distanzwahrnehmung

Neben der Anbauhöhe, der Position der Heckleuchten sowie der Helligkeit des Schlusslichts unterscheiden sich Heckleuchten in ihrer Form und Größe. Dabei unterliegen Heckleuchten strengen gesetzlichen Regularien, um die Sicherheit im Straßenverkehr zu gewährleisten. So sind beispielsweise die Anzahl der Schlussleuchten an einem Fahrzeug, die Farbe des Schlusslichts, die geometrische Sichtbarkeit, spezielle Anbauvorschriften sowie Minimal- und Maximalwerte für die Lichtintensität in den ECE-Regelungen vorgegeben (United Nations, 2012, 2013a). Doch die Vielfalt an verschiedenen Heckleuchtendesigns verrät, dass den Automobilherstellern in der Gestaltung der Leuchten eine gewisse Freiheit gewährt wird. So ist es beispielsweise möglich, die beiden Rückleuchten auf der rechten und linken Seite des Fahrzeughecks mit einem durchgehenden Leuchtenband zu verbinden.

Heckleuchten dienen dazu, bei Dunkelheit und schlechter Sicht die Distanz zu einem vorausfahrenden Fahrzeug zu schätzen. Mit einem sich verändernden Abstand zu diesem Fahrzeug nimmt die wahrgenommene Breite des Hecks zu oder ab und der wahrgenommene Abstand zwischen den Heckleuchten variiert entsprechend (Mortimer, 1990). Untersuchungen haben gezeigt, dass Entfernungsschätzungen für Fahrzeuge mit kleineren horizontalen Abständen zwischen den beiden Heckleuchten größer ausfallen, als für weiter auseinanderliegende Leuchten (Buchner et al., 2006; Cavallo et al., 2001). Die Heckleuchte spielt somit eine entscheidende Rolle für die Verkehrssicherheit. Die Gestaltungsmöglichkeiten müssen auf eine mögliche Beeinflussung der Fähigkeit Entfernungen zwischen Fahrzeugen adäquat schätzen zu können, untersucht werden. Diese potenziell sicherheitsrelevante Wirkung der Heckleuchtengestaltung auf die wahrgenommene Breite des Fahrzeugs wurde in der vorliegenden Studie analysiert.

4.2.1 Klassische Methoden der Psychophysik

Um die menschliche Wahrnehmung messbar zu machen, bedient man sich klassischer psychophysikalischer Methoden (Goldstein, 2015; Proctor & Proctor, 2012). In der Psychophysik wird die Beziehung zwischen der physikalischen Stimulation mit einem Reiz und dem psychischen Empfinden wissenschaftlich erforscht (Gescheider, 1997). Als Begründer und bedeutendster Vertreter der Psychophysik gilt Gustav Theodor Fechner (Gescheider, 1997). Fechner führte Methoden ein, mit denen mentale

Ereignisse gemessen werden sollten (Gescheider, 1997). Noch heute ist die Psychophysik ein zentraler Bestandteil der experimentellen Psychologie, die sich mit Wilhelm Wundt 1879 begründet (Gescheider, 1997). Die Psychophysik lässt sich auf alle Sinnessysteme und somit auf die visuelle, auditive, taktile, gustatorische und olfaktorische Wahrnehmung anwenden (Kingdom & Prins, 2016). Psychophysikalische Experimente weisen dabei eine große Bandbreite an Verfahren und Techniken auf (siehe Kingdom & Prins, 2016). Das Ziel der klassischen Methoden der Psychophysik ist die Einsicht in die menschliche Sensitivität, die es ermöglicht einen Reiz zu entdecken bzw. Unterschiede zwischen Reizen zu detektieren (Proctor & Proctor, 2012). Die Grundidee beruht dabei auf der Ermittlung von Schwellen (Proctor & Proctor, 2012).

Die klassischen Methoden der Psychophysik sind das Konstanzverfahren (method of constant stimuli), das Grenzverfahren (method of limits) und das Herstellungsverfahren (method of adjustment) (Gescheider, 1985, 1997; Goldstein, 2015). Dabei werden jeweils Absolut- oder Unterschiedsschwellen gemessen (Gescheider, 1985, 1997). Die Absolutschwelle beschreibt die kleinste Menge an Reizintensität, die eine Empfindung hervorrufen kann (Gescheider, 1985, 1997; Goldstein, 2015; Proctor & Proctor, 2012). Damit wird gemessen, wie viel physikalische Reizung notwendig ist, um bemerkt zu werden (Gescheider, 1985, 1997; Proctor & Proctor, 2012). Die Unterschiedsschwelle beschreibt die kleinste Differenz zwischen zwei Reizen (Gescheider, 1985, 1997). Damit kann ermittelt werden, um wie viel sich ein Stimulus verändern muss, um eine gerade noch wahrnehmbare Empfindung (just noticeable difference) hervorzurufen (Gescheider, 1985, 1997; Proctor & Proctor, 2012).

Um die Absolutschwelle mithilfe des Konstanzverfahrens zu bestimmen, werden verschiedene Reizintensitäten in einer zufälligen Reihenfolge mehrfach präsentiert (Gescheider, 1985, 1997; Goldstein, 2015; Proctor & Proctor, 2012). Die Absolutschwelle beschreibt die Stimulusintensität, die in 50 % der Fälle bemerkt wird (Gescheider, 1985, 1997; Goldstein, 2015; Proctor & Proctor, 2012). Die Unterschiedsschwelle wird bestimmt, indem in zufälliger Reihenfolge jeweils ein Stimuluspaar präsentiert wird (Gescheider, 1985, 1997). Dabei muss der Proband jeweils entscheiden, welcher Reiz eine größere Empfindung hervorruft (Gescheider, 1985, 1997). Der Standardstimulus wird in seiner Reizintensität konstant gehalten, während der Vergleichsstimulus von Durchgang zu Durchgang variiert wird (Gescheider, 1985, 1997).

Beim Grenzverfahren wird die Absolutschwelle bestimmt, indem der Reiz in einer auf- oder absteigenden Reihenfolge dem Probanden präsentiert wird (Gescheider, 1985, 1997; Proctor & Proctor, 2012). Dabei wird mit einer Reizintensität gestartet, die entweder deutlich unter oder über der Wahrnehmungsschwelle liegt (Gescheider, 1985, 1997). Die Intensität des Reizes wird in gleich großen Abständen variiert (Proctor & Proctor, 2012). Man erhält pro Durchgang damit einen Wendepunkt, ab dem der Reiz zum ersten Mal wahrgenommen (aufsteigende Ordnung) bzw. nicht mehr wahrgenommen (absteigende Ordnung) wird (Gescheider, 1985, 1997). Aus dem Durchschnitt dieser Werte wird die Absolutschwelle bestimmt (Gescheider, 1985, 1997). Um die Unterschiedsschwelle mit dem Grenzverfahren zu ermitteln, werden zwei Reize präsentiert, die miteinander verglichen werden sollen (Gescheider, 1985, 1997). Der Vergleichsstimulus wird dabei als kleiner, gleich oder größer als der Standardstimulus wahrgenommen (Gescheider, 1985, 1997; Proctor & Proctor, 2012). Bei jeder aufsteigenden (bzw. absteigenden) Reihenfolge gibt es somit zwei Wendepunkte: Der Übergang von kleiner zu gleich (bzw. von größer zu gleich) und den Übergang von gleich zu größer (bzw. von gleich zu kleiner) (Gescheider, 1985, 1997). Die Grenzmethode ist im Vergleich zum Konstanzverfahren zwar weniger präzise, aber auch weniger zeitaufwändig und damit die wohl am häufigsten verwendete Methode, um die sensorischen Grenzwerte zu berechnen (Gescheider, 1985, 1997).

Um die Absolutschwelle mit der Herstellungsmethode zu ermitteln, wird der Stimulus in seiner Intensität zu Beginn entweder weit unter (bzw. über) der Wahrnehmungsschwelle präsentiert (Gescheider, 1985, 1997). Der Proband wird gebeten, die Intensität des Reizes selbst soweit nach oben (bzw. nach unten) zu regeln, bis der Stimulus gerade so wahrnehmbar wird (bzw. nicht mehr wahrzunehmen ist) (Gescheider, 1985, 1997, Goldstein, 2015). Die Unterschiedsschwelle wird bestimmt, indem der Proband einen Vergleichsreiz soweit reguliert, bis er subjektiv in seiner Intensität dem Standardreiz entspricht (Gescheider, 1985, 1997). Es empfiehlt sich die Herstellungsmethode nur bei kontinuierlich variierbaren Reizen anzuwenden, um nicht an Präzision bei der Ermittlung der Schwellenwerte einzubüßen.

4.2.2 Anwendung der psychophysikalischen Methoden auf die Forschungsfrage

Mit der vorliegenden Studie sollte untersucht werden, ob die die Gestaltung der Heckleuchten in Fahrzeugen einen Einfluss auf die wahrgenommene Fahrzeugbreite und damit indirekt auf die Entfernungsschätzung hat. Um dieser Forschungsfrage zu

begegnen, wurde mithilfe von psychophysikalischen Experimenten analysiert, ob es Unterschiede in der Wahrnehmung von Abständen zwischen verbundenen (entsprechend einer durchgehende Heckleuchte) und unverbundenen Elementen (für eine konventionelle, getrennte Heckleuchte) gibt. Dazu mussten die Längen der verschiedenen Distanzen zwischen den Elementen geschätzt werden.

Das Verhältnis zwischen der wahrgenommenen Größe und der tatsächlichen Stimulusintensität muss nicht immer linear verlaufen (Goldstein, 2015). So wird eine doppelt so helle Lichtquelle nicht als doppelt so hell wahrgenommen (Goldstein, 2015). Die Schätzung der Länge einer Linie verläuft allerdings nahezu konstant (Goldstein, 2015). Dabei entspricht die Größenordnung der Antwort dem Zuwachs an der Reizintensität (Goldstein, 2015).

Die Schätzung der Länge einer Linie kann mit dem Grenzverfahren (Unterschiedsschwellen) vorgenommen werden (Gescheider, 1997). Dabei wird die Länge verschiedener Vergleichslinien mit der Länge einer Standardlinie verglichen (Gescheider, 1997). Auch die Herstellungsmethode eignet sich, um die Wahrnehmung der Länge verschiedener Linien zu untersuchen. Bei diesem Verfahren hat der Proband die Möglichkeit, die Veränderungen in der Stimulusintensität selbst zu kontrollieren (Gescheider, 1997).

4.2.3 Methode

Die Untersuchung fand vom 21.07.2016 bis zum 28.07.2016 in den Büroräumen der Technischen Entwicklung der AUDI AG am Standort Ingolstadt statt.

4.2.3.1 Stichprobe

Am Experiment nahmen insgesamt 34 Personen teil. Die Teilnehmer waren zwischen 16 und 54 Jahre alt (M = 31.44; SD = 9.13). Sieben Personen waren weiblich (20.59 %). Die Hälfte der Teilnehmer hatte eine normale Sehstärke (47.06 %), die nicht durch eine Sehhilfe korrigiert werden musste. Zwölf Personen (35.29 %) gaben eine Kurzsichtigkeit an, jeweils zwei Personen (5.88 %) eine Weitsichtigkeit und Farbfehlsichtigkeit und drei Personen (8.82 %) eine Stabsichtigkeit (Astigmatismus). Die Teilnehmer waren alle Mitarbeiter der AUDI AG und in der Lichtentwicklung tätig.

4.2.3.2 Versuchsaufbau

Der Raum wurde mithilfe von Jalousien abgedunkelt, um eine standardisierte Umgebungshelligkeit (ca. 800 lx) über den gesamten Versuchszeitraum zu

gewährleisten. Der Versuch wurde am Computer durchgeführt. Dabei wurden die Stimuli auf einem Bildschirm präsentiert (MultiSync EA 244WMi; Maß: 24“; Auflösung: 1920*1200; Kontrast: 1000:1; Pixelgröße: 0.27 mm; Leuchtstärke: 350 cd/m²). Der Proband saß in einem Abstand von 0.80 m zum Bildschirm. Zu Beginn des Versuchs fixierten die Personen ein Fixationskreuz am Bildschirm. Dabei trugen sie eine Brille, an der ein Laserpointer befestigt war. Somit konnte die genaue Position der Augen (Augenhöhe) über die verschieden großen Probanden standardisiert werden. Der Kopf wurde auf eine Vorrichtung abgelegt und über die gesamte Versuchsdauer fest im Raum fixiert. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.2-1 schematisch dargestellt.

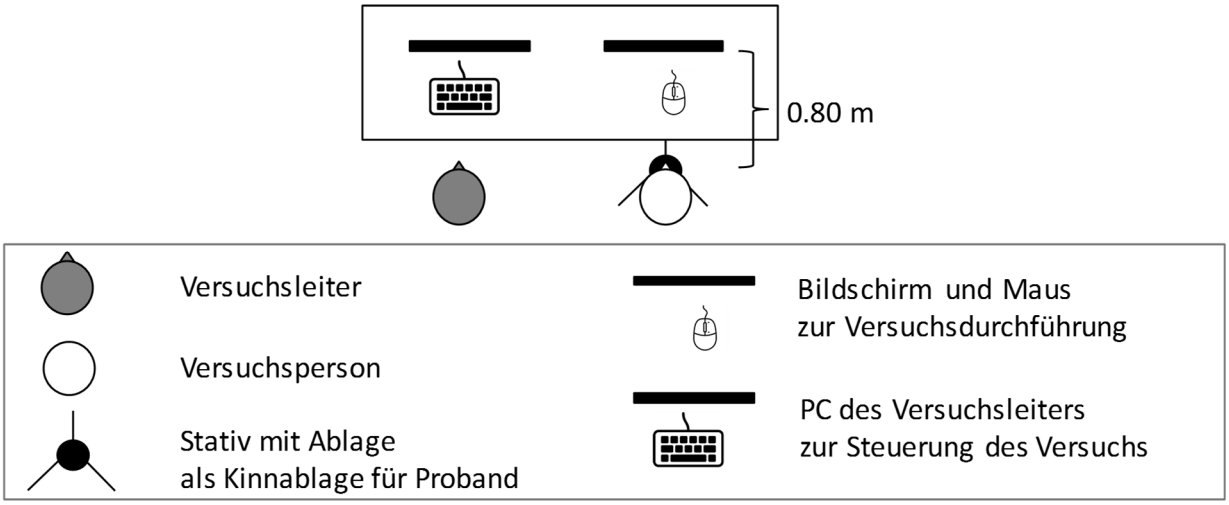

Abbildung 4.2-1. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

4.2.3.3 Aufgabenstellung und Versuchsablauf

Der Versuch bestand aus zwei Teilen: einem Verschiebexperiment und einer Entscheidungsaufgabe.

4.2.3.3.1 Verschiebeexperiment (Herstellungsmethode)

In dem Verschiebexperiment wurden den Probanden jeweils drei rote Punkte präsentiert (jeweils 29 px Durchmesser), die auf einer horizontalen Ebene angeordnet waren. Aufgabe war es, den mittleren Punkt mithilfe der Computermaus genau in die Mitte zwischen den beiden äußeren Punkten zu verschieben. Der Abstand zwischen dem linken und dem mittleren Punkt sollte exakt dem Abstand zwischen dem mittleren und dem rechten Punkt entsprechen (jeweils 315 px Länge). Es gab insgesamt acht verschiedene Versionen (siehe Tabelle 4.2-1). Alle Personen durchliefen alle acht

Versionen in randomisierter Reihenfolge. Der Sehwinkel betrug für den gesamten Reiz (Abstand zwischen den Punkten plus Durchmesser der Punkte) ca. 13°.

Tabelle 4.2-1. Acht verschiedene Versionen des Verschiebeexperiments.

Version	Ausgangszustand	Zielzustand
1		
	Alle drei Punkte wurden durch eine schwarze Linie miteinander verbunden. Der mittlere Punkt war zu Beginn rechts von der Mitte platziert.	
2		
	Alle drei Punkte wurden durch eine schwarze Linie miteinander verbunden. Der mittlere Punkt war zu Beginn links von der Mitte platziert.	
3		
	Keiner der Punkte wurde durch eine schwarze Linie verbunden. Der mittlere Punkt war zu Beginn rechts von der Mitte platziert.	
4		
	Keiner der Punkte wurde durch eine schwarze Linie verbunden. Der mittlere Punkt war zu Beginn links von der Mitte platziert.	
5		
	Der linke und mittlere Punkt wurden durch eine schwarze Linie verbunden. Der mittlere Punkt war zu Beginn rechts von der Mitte platziert	
6		
	Der linke und mittlere Punkt wurden durch eine schwarze Linie verbunden. Der mittlere Punkt war zu Beginn links von der Mitte platziert.	
7		
	Der mittlere und rechte Punkt wurden durch eine schwarze Linie verbunden. Der mittlere Punkt war zu Beginn rechts von der Mitte platziert.	
8		
	Der mittlere und rechte Punkt wurden durch eine schwarze Linie verbunden. Der mittlere Punkt war zu Beginn links von der Mitte platziert.	

4.2.3.3.2 Entscheidungsaufgabe (Grenzwertmethode)

Im zweiten Teil des Versuchs sollten die Probanden entscheiden, ob ihnen ein Vergleichsreiz in der Gegenüberstellung zu einem Standardreiz kleiner, gleich oder größer erschien. Die Probanden durchliefen vier Versionen in randomisierter Reihenfolge. Bei jeweils der Hälfte der Probanden war der Vergleichsreiz rechts bzw. links vom Standardreiz angeordnet. Tabelle 4.2-2 gibt einen Überblick über die Entscheidungsaufgaben.

Tabelle 4.2-2. Acht verschiedene Versionen der Entscheidungsaufgabe.

Version	Vergleichsreiz (VR)	Standardreiz (SR)
1, 2	VR: Zwei rote Punkte wurden durch eine schwarze Linie verbunden. SR: Zwei rote Punkte wurden durch eine schwarze Linie verbunden. Version 1: VR links, SR rechts. Version 2: VR rechts, SR links.	
3, 4	VR: Zwei rote Punkte wurden nicht durch eine schwarze Linie verbunden. SR: Zwei rote Punkte wurden nicht durch eine schwarze Linie verbunden. Version 3: VR links, SR rechts. Version 4: VR rechts, SR links.	
5,6	VR: Zwei rote Punkte wurden durch eine schwarze Linie verbunden. SR: Zwei rote Punkte wurden nicht durch eine schwarze Linie verbunden. Version 5: VR links, SR rechts. Version 6: VR rechts, SR links.	
7,8	VR: Zwei rote Punkte wurden nicht durch eine schwarze Linie verbunden. SR: Zwei rote Punkte wurden durch eine schwarze Linie verbunden. Version 7: VR links, SR rechts. Version 8: VR rechts, SR links.	

Anmerkung: Die Hälfte der Probanden durchliefen die Versionen 1, 3, 5 und 7 in randomisierter Reihenfolge. Die andere Hälfte durchliefen die Versionen 2, 4, 6 und 8 in randomisierter Reihenfolge.

.

Der Standardreiz blieb über den gesamten Versuch konstant (315 px Länge). Der Vergleichsreiz war zu Beginn des Versuchs kleiner bzw. größer als der Standardreiz und wurde in jedem Schritt um ca. 6,4 px vergrößert bzw. verkleinert. Pro Reizpaar gab es 21 verschiedene Variationen: Der Vergleichsreiz war kleiner als der Standardreiz (zehnmal); der Vergleichsreiz und der Standardreiz waren gleich groß (einmal); der Vergleichsreiz

war größer als der Standardreiz (zehnmal). Pro Reizpaar gab es zwei Reihenfolgen: Die Vergleichsreize wurden jeweils sowohl in aufsteigender als auch absteigender Ordnung präsentiert. Die Anfangsintensität des Vergleichsreizes wurde von Durchgang zu Durchgang leicht variiert. Der Proband beurteilte jede Präsentation des Reizpaares, indem er angab, ob ihm der Vergleichsreiz kleiner, gleich oder größer als der Standardreiz erschien. Pro Durchlauf ergab sich damit jeweils ein Antwortwechsel, der den Übergang von kleiner zu gleich (bzw. größer zu gleich) und von gleich zu größer (bzw. gleich zu kleiner) markierte (vgl. Kühner, Bubb, Bengler, & Wild, 2012). Der Ablauf wird in Tabelle 4.2-3 dargestellt.

Tabelle 4.2-3. Beispielhafter Ablauf und Ergebnisse einer Versuchsperson für das Entscheidungsexperiment.

Version		**1**		**3**		**5**		**7**	
Stimulusintensität		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
−10	251 px					<			
−9	257 px	<				<			
−8	264 px	<				<			
−7	270 px	<		<		<		<	
−6	277 px	<		<		<		<	
−5	283 px	<	<	<		<		<	
−4	289 px	<	**=**	<	<	<		**=**	
−3	296 px	**=**	**=**	<	**=**	<		**=**	<
−2	302 px	**=**	**=**	<	**=**	<		**=**	**=**
−1	309 px	**=**	>	**=**	**=**	<		>	**=**
0	**315 px**	>	>	**=**	**=**	**=**			**=**
+1	321 px		>	**=**	**=**	**=**	<		**=**
+2	328 px		>	**=**	>	**=**	**=**		>
+3	334 px		>	>	>	>	**=**		>
+4	340 px		>		>		>		>
+5	347 px		>		>		>		>
+6	353 px		>		>		>		>
+7	359 px		>		>		>		>
+8	366 px				>		>		
+9	372 px						>		
+10	379 px						>		

Anmerkung: „↑“ aufsteigende Ordnung; „↓“ absteigende Ordnung; „**<**“ Vergleichsreiz wirkt kleiner als Standardreiz; „**=**“ Vergleichsreiz wirkt gleich groß wie Standardreiz; „**>**“ Vergleichsreiz wirkt größer als Standardreiz.

Der Sehwinkel betrug für den gesamten Reiz (Abstand zwischen den Punkten des Vergleichsreizes plus Abstand zwischen Vergleichsreiz und Standardreiz plus Abstand

zwischen den Punkten des Standardreizes plus Durchmesser der Punkte) für die Bedingung mit dem kleinsten Vergleichsreiz ca. 18° und für die Bedingung mit dem größten Vergleichsreiz ca. 21°.

Zum Abschluss des Versuchs wurden die soziodemographischen Daten erhoben. Die Versuchsdauer betrug insgesamt ca. 20–30 min.

4.2.4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Auswertung der objektiven Daten beider Experimente dargestellt.

4.2.4.1 Ergebnisse des Verschiebeexperiments (Herstellungsmethode)

Aufgrund technischer Probleme wurden die Daten der acht Versionen zweier Versuchspersonen und jeweils die Daten einer Version zweier Versuchspersonen für das Verschiebeexperiment nicht erfasst. Insgesamt gingen damit 254 Messdaten in die Auswertung ein.

Es wurde ein Mittelwert für die Versionen 1 und 2 gebildet. Ziel der Aufgabe war es, dass der Abstand zwischen dem linken und dem mittleren Punkt, dem Abstand zwischen dem mittleren und dem rechten Punkt entsprechen sollte. Zwischen den beiden eingestellten Abständen ergab sich eine durchschnittliche Differenz von 0.81 %. Der Abstand zwischen dem linken und dem mittleren Punkt wurde etwas kleiner gewählt, als der Abstand zwischen dem mittleren und dem rechten Punkt. Die mittlere Differenz zwischen den beiden Abständen für die Versionen 3 und 4 betrug 0.46 %. Auch hier wurde der Abstand zwischen dem linken und dem mittleren Punkt minimal kleiner eingestellt, als der Abstand zwischen dem mittleren und dem rechten Punkt. Aus den Versionen 5 bis 8 wurde ebenso ein Mittelwert gebildet. Dabei wurde die Seite mit den verbundenen Punkten im Durschnitt auf eine prozentuale Größe von 49.62 % eingestellt, im Vergleich zu der Seite mit den unverbundenen Punkten mit 50.38 %. Es ergab sich eine durchschnittliche Differenz von ca. 0.77 %. Im Durschnitt wurde die Seite mit den beiden verbundenen Punkten im Vergleich zu der Seite mit zwei unverbundenen Punkten somit leicht überschätzt, das heißt etwas kleiner eingestellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.2-4 dargestellt.

Tabelle 4.2-4. Ergebnisse des Verschiebeexperiments. *N* = 34.

Versionen	Ergebnisse	Endzustand		Differenz
1 und 2	*M* in px: *SD* in px:	312.44 px 6.80 px	317.56 px 6.80 px	5.12 px
	M in %: *SD* in %:	49.59 % 2.17 %	50.41 % 2.14 %	**0.81 %**
3 und 4	*M* in px: *SD* in px:	313.55 px 6.95 px	316.45 px 6.95 px	2.91 px
	M in %: *SD* in %:	49.77 % 2.22 %	50.23 % 2.20 %	**0.46 %**
5, 6, 7 und 8	*M* in px: *SD* in px:	312.59 px 9.52 px	317.41 px 9.52 px	4.83 px
	M in %: *SD* in %:	49.62 % 3.05 %	50.38 % 3.00 %	**0.77 %**

Anmerkung: Zielzustand: jeweils 315.00 px bzw. 50.00 %.

4.2.4.2 Ergebnisse der Entscheidungsaufgabe (Grenzwertmethode)

Für den zweiten Versuchsteil gingen aufgrund eines fehlenden Wertes insgesamt 543 Messdaten in die Auswertung ein. Die Messwerte aus Version 1 und 2, 3 und 4, 5 und 6 sowie 7 und 8 wurden jeweils gemeinsam ausgewertet. Es wurde für jede Versionsgruppierung pro Durchgang jeweils der Mittelwert der Reizintensitäten am Punkt des Antwort-Wechsels berechnet. Anschließend wurde ein Mittelwert der oberen ($\overline{L}_u$ = Upper Limen) und unteren ($\overline{L}_l$ = Lower Limen) Unterschiedsschwellen für die absteigende und aufsteigende Ordnung für jede Version pro Durchgang berechnet. Die Differenz der mittleren Unterschiedsschwellen für die auf- und absteigende Ordnungen ergab das Unsicherheitsintervall (Intervall of Uncertainty: IU = $\overline{L}_u - \overline{L}_l$). Der Punkt subjektiver Gleichheit (Point of Subjective Equality) berechnete sich, indem die Summe der oberen und unteren Schwellen durch zwei geteilt wurde (PSE = ½ ($\overline{L}_u + \overline{L}_l$)). Zog man vom PSE die Größe des Standardreizes ab, erhielt man den konstanten Fehler (Constant Error: CE = PSE − Standardreiz). Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.2-5 dargestellt.

Tabelle 4.2-5. Ergebnisse Entscheidungsaufgabe. *N* = 34.

Versionen	**1** und **2**	**3** und **4**	**5** und **6**	**7** und **8**
Vergleichsreiz				
Standardreiz				
$\overline{L}_l$ in px	309.16 px	303.88 px	301.29 px	310.09 px
$\overline{L}_u$ in px	330.56 px	326.86 px	325.75 px	332.24 px
IU in px	21.40 px	22.98 px	24.46 px	22.15 px
DL in px	10.70 px	11.49 px	12.23 px	11.07 px
PSE in px	319.86 px	315.37 px	313.52 px	321.16 px
CE in px	4.86 px	0.37 px	−1.48 px	6.16 px
CE in %	**1.54 %**	**0.12 %**	**−0.47 %**	**1.96 %**

Anmerkung: $\overline{L}_l$ = Lower Limen; $\overline{L}_u$ = Upper Limen; IU = Intervall of Uncertainty; DL = Difference Limen; PSE = Point of Subjective Equality; CE = Constant Error; Standardreiz: 315 px.

Für Version 1 und 2 (die Punkte des Vergleichsreizes und des Standardreizes wurde jeweils durch eine schwarze Linie verbunden) ergab sich ein prozentualer CE von ca. 1.54 %. In Version 3 und 4 (die Punkte des Vergleichsreizes und des Standardreizes wurden durch keine schwarzen Linien verbunden) wurde ein prozentualer CE von ca. 0.12 % ermittelt. In beiden Versionen wurde jeweils der Vergleichsreiz in der Gegenüberstellung zum Standardreiz leicht unterschätzt, das heißt das Vergleichsintervall erschien subjektiv etwas kürzer als das Standardintervall. Für Version 5 und 6 (die Punkte des Vergleichsreizes wurden durch eine schwarze Linie verbunden) ergab sich ein prozentualer CE von ca. −0.47 %. In diesem Fall wurde der Vergleichsreiz leicht überschätzt, das heißt der Vergleichsreiz in Form der verbundenen Elemente erschien im Durchschnitt etwas länger als der Standardreiz in Form der unverbundenen Elemente. Der konstante Fehler für Version 7 und 8 (die Punkte des Vergleichsreizes wurden nicht durch eine Linie verbunden, die Punkte des Standardreizes wurden verbunden) fiel am größten aus (CE = ca. 1.96 %). Hier wurde der Vergleichsreiz wiederum etwas unterschätzt. Die Verteilungen der Ergebnisse der einzelnen Versionen sind in Abbildung 4.2-2 einzusehen.

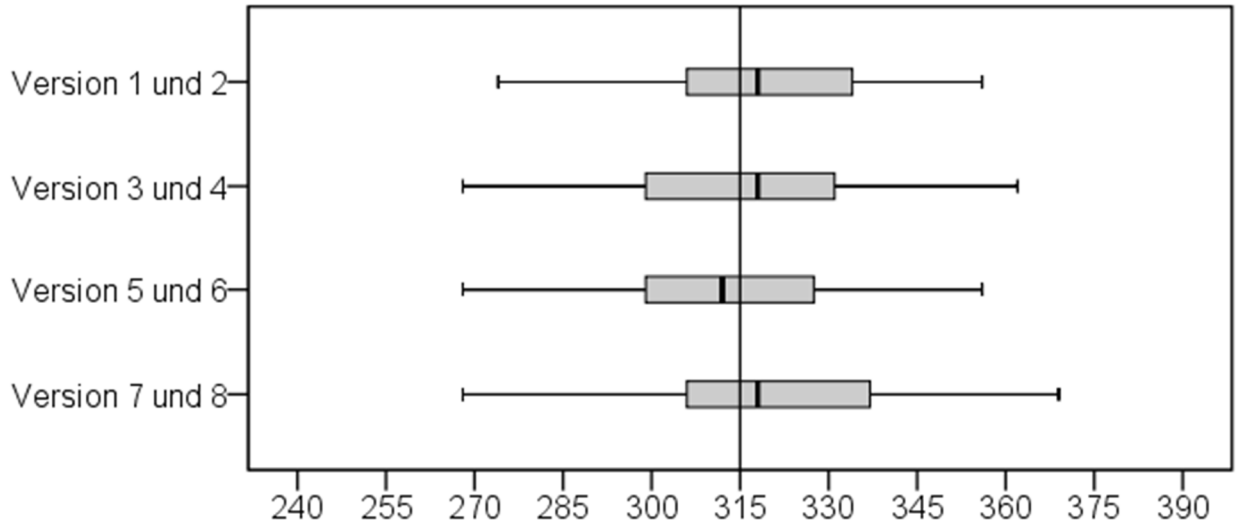

Abbildung 4.2-2. Boxplots der Entscheidungsaufgabe. Die eingezeichnete Linie entspricht der Größe des Standardreizes von 315 px. *N* = 34.

4.2.5 Diskussion

Die vorliegenden Experimente beschäftigten sich mit der Frage, inwiefern die Gestaltung eines Abstands durch eine sichtbare Verbindungslinie die Wahrnehmung dieses Abstands beeinflussen kann. Im Anschluss wird eine mögliche Übertragung der Ergebnisse auf die verschiedenen Gestaltungsformen von Heckleuchten im Hinblick auf die Verkehrssicherheit diskutiert.

4.2.5.1 Diskussion der Ergebnisse des Verschiebeexperiments

Die Probanden hatten im ersten Teil des Versuchs die Aufgabe zwei gleich große Abstände zwischen zwei Punkten einzustellen. Dabei mussten sie den mittleren von drei roten Punkten exakt in die Mitte verschieben, um eine gleiche Entfernung zwischen dem rechten und dem mittleren und dem mittleren und dem linken Punkt herzustellen. Es gab insgesamt acht verschiedene Versionen, die sich wiederum zu drei Gruppen zusammenfassen ließen: Alle Punkte wurden durch eine schwarze Linie miteinander verbunden (Version 1 und 2); keiner der Punkte wurde durch eine Linie verbunden (Version 3 und 4); nur zwei Punkte wurden durch eine schwarze Linie verbunden (Version 5, 6, 7 und 8). Es zeigte sich, dass die Probanden die Abstände sehr gut abschätzen konnten und die eingestellten Distanzen im Durschnitt nur geringe Abweichungen von der Zieldistanz aufwiesen. Der Unterschied zwischen den verschiedenen Gruppen war dabei minimal. Die Differenz zwischen den beiden Abständen betrug im Mittel für Version 1 und 2 lediglich 0.81 %. Die Aufgabe wurde bei Version 3 und 4 mit einer Differenz zwischen den beiden Abständen von 0.46 % am

besten gelöst. In Versionen 5, 6, 7 und 8 betrug der Unterschied 0.77 %. Dabei wurde der Abstand ohne Verbindungslinie zwischen dem mittleren und dem äußeren Punkt im Durchschnitt minimal länger eingestellt, als der Abstand mit Verbindungslinie zwischen dem mittleren und dem äußeren Punkt. Dies spricht für eine leichte Überschätzung des Abstands bei zwei verbundenen Punkten im Vergleich zu dem Abstand bei unverbundenen Punkten. Im direkten Vergleich für verbundene (Version 1 und 2) und unverbundene Distanzen (3 und 4) wurde die Distanz zwischen zwei unverbundenen Punkten etwas besser geschätzt. Die leichte Überschätzung einer Distanz mit Verbindungslinie könnte der Grund dafür sein.

4.2.5.2 Diskussion der Ergebnisse der Entscheidungsaufgabe

In einer zweiten Aufgabe sollten die Probanden in einer auf- und absteigenden Reihenfolge die Größe eines variierenden Vergleichsreizes im Vergleich zu einem konstanten Standardreiz beurteilen. Auch hier zeigte sich, dass die Schätzungen der Probanden eine hohe Güte aufwiesen. Für die Versionen 1 und 2 (die Punkte des Standard- und Vergleichsreizes wurden jeweils durch eine schwarze Linie verbunden) ergab sich ein konstanter Fehler von 1.54 %. Dieses Ergebnis war etwas schlechter, als das Ergebnis für Versionen 3 und 4 (die Punkte des Standard- und Vergleichsreizes waren jeweils unverbunden) mit einem konstanten Fehler von nur 0.12 %. Das Ergebnis gleicht somit dem Resultat des Verschiebexperiments: Der Abstand zwischen zwei unverbundenen Elementen wurde etwas besser geschätzt, als der Abstand zwischen zwei verbundenen Punkten. Versionen 5 und 6 (die Punkte des Vergleichsreizes waren verbunden, die Punkte des Standardreizes unverbunden) zeigten einen negativen konstanten Fehler von −0.47 %. Der Fehler für Versionen 7 und 8 lag im positiven Bereich bei 1.96 %. Auch dieses Ergebnis spricht für eine leichte Überschätzung des Abstands zwischen zwei verbundenen Elementen und einer leichten Unterschätzung des Abstands zwischen zwei unverbundenen Elementen und steht mit den Schlussfolgerungen aus dem Verschiebeexperiment im Einklang.

4.2.5.3 Übertragung der Ergebnisse auf Heckleuchten

Insgesamt lässt sich für beide Experimente festhalten, dass die Schätzungen für die Distanz zwischen zwei Elementen (rote Punkte) sehr gut ausfielen. Die Fehlschätzungen der Länge der Distanzen bewegten sich jeweils unter 2 % der Gesamtlänge. Die Schätzung für unverbundene Elemente fiel dabei jeweils etwas besser aus, als für verbundene Elemente. Im direkten Vergleich zwischen zwei verbundenen und zwei

unverbundenen Elementen fiel auf, dass die Strecke der verbundenen Elemente in ihrer Länge tendenziell etwas überschätzt wurde. Dies spricht dafür, dass die Distanz zwischen zwei verbundenen Elementen als etwas länger wahrgenommen wurde, als die Strecke zwischen zwei unverbundenen Elementen. Dies kann auch die etwas schlechtere Schätzleistung für die Linienlänge zwischen verbundene Elemente erklären.

Möchte man die Ergebnisse auf Heckleuchten übertragen, lassen sich die beiden einzelnen Punkte als zwei Heckleuchten betrachten. In der Regel sind dabei die rechte und linke Leuchte nicht über eine leuchtende Fläche miteinander verbunden. Demgegenüber steht das Konzept, in dem sich eine Heckleuchte über das gesamte Heck eines Fahrzeugs erstreckt. Bei einer Folgefahrt nimmt der Fahrer tagsüber das Heck und nachts die Heckleuchte des vorausfahrenden Fahrzeugs wahr (Mortimer, 1990). Dabei sind die Größe, die Position und die Helligkeit von Leuchten den meisten Menschen gut vertraut und werden zur Entfernungsschätzung automatisch herangezogen (Castro et al., 2005; Cavallo et al., 2001). Es stellt sich die Frage inwiefern die Gestaltungsform der Heckleuchte auf diese Schätzung Einfluss nehmen kann.

Die hier vorliegenden Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Distanz zwischen zwei Heckleuchten in beiden Gestaltungsformen gut geschätzt werden kann. Tendenziell lassen die Befunde vermuten, dass eine Heckleuchte mit einem durchgehenden Leuchtenband das Fahrzeug etwas breiter erscheinen lassen könnte, als es tatsächlich ist. Im Vergleich zu einem Fahrzeug mit zwei einzelnen Heckleuchten würde die Schätzung voraussichtlich gleich oder minimal schlechter ausfallen. Dies könnte zur Folge haben, dass ein Fahrzeug als etwas näher wahrgenommen werden würde, als es tatsächlich ist bzw. als ein anderes Fahrzeug mit einer konventionellen Heckleuchtengestaltung. Der Abstand zwischen dem eigenen und einem vorausfahrenden Fahrzeug wird aufgrund dieser wahrgenommenen Entfernung geschätzt und eingestellt. Würde diese Distanz aufgrund der Heckleuchtengestaltung leicht unterschätzt, könnten verbundene Heckleuchten im Straßenverkehr womöglich bedeuten, dass es etwas mehr Abstand zu diesem Fahrzeug gehalten werden würde. Diese Hypothesen müssten jedoch mit weiteren Studien überprüft werden. Dabei sollte zunächst die schematische Darstellung mit verbundenen und unverbundenen Punkten durch eine Simulation mit realen Heckleuchten ersetzt werden. Damit könnten der Einfluss und mögliche Wechselwirkungen der tatsächlichen Größe einer Heckleuchte sowie der wahrgenommenen Helligkeit einer Leuchte untersucht werden. In Abhängigkeit

der Heckleuchtengestaltung sollte zusätzlich, neben der wahrgenommenen Distanz zwischen den Leuchten, auch die wahrgenommene Distanz zwischen Fahrzeug und Beobachter analysiert werden. In einem nächsten Schritt könnte damit auch das Abstandsverhalten in einer Folgefahrt mit beiden Heckleuchtenkonzepten für verschiedene Abstands- und Geschwindigkeitsbereiche untersucht werden.

In diesem Kapitel wurden die Möglichkeiten einer Beeinflussung des Abstandsverhaltens im Straßenverkehr durch Heckleuchten mithilfe von verkehrspsychologischen und psychophysikalischen Experimenten untersucht und mit Blick auf die aktuelle Forschungsliteratur diskutiert. In vorherigen Kapitel wurde, neben dem Risiko durch unangepasstes Abstandsverhalten, zusätzlich eine falsche Aufmerksamkeitsverteilung im Straßenverkehr als häufige Unfallursache von Auffahrunfällen herausgestellt. Im Folgenden soll das Potenzial von neuartigen, aufmerksamkeitssteuernden Lichtfunktionen für die Verbesserung der Verkehrssicherheit untersucht werden.

5 Aufmerksamkeitssteuerung durch Heckleuchten

Heckleuchten dienen – neben der Erhöhung der Sichtbarkeit eines Fahrzeugs im Straßenverkehr – auch der Kommunikation mit dem rückwärtigen Verkehr. Durch saliente Lichtsignale der Brems- und Blinkleuchte wird die Aufmerksamkeit eines Hinterherfahrenden gezielt auf das vordere Fahrzeug gelenkt. Dabei werden wichtige Informationen über eine Verzögerung in Längsrichtung, einen anstehenden Fahrtrichtungswechsel oder der Hinweis auf eine drohende Gefahr an den rückwärtigen Verkehr übertragen. Diese Information und Interaktion mittels Lichtsignalen ist dabei von entscheidender Bedeutung für die Verkehrssicherheit.

5.1 Potenzial innovativer Heckleuchten zur Unfallvermeidung[2]

Die Entwicklung innovativer Scheinwerfer und Heckleuchten wird durch neue Lichttechnologien ermöglicht. So entstehen beispielsweise mit einer OLED-Lichtquelle völlig neue Raum- und Gestaltungsdimensionen. Gleichzeitig geben auch die Nutzer neue Wege vor. Die Wünsche des Kunden beziehen sich dabei unter anderem auf den Preis, das Design, die Sicherheit und den Komfort. Bei der Entwicklung neuer Produkte in der Automobilindustrie müssen außerdem die gesetzlichen Bestimmungen und Regelungen berücksichtigt werden. Nur durch eine umfassende Anforderungsanalyse sämtlicher Nutzerbedürfnisse lassen sich alle notwendigen Aspekte bei der Entwicklung technischer Produkte einbeziehen. Auch wenn sich das Design und die Lichttechnologien in Heckleuchten fortlaufend verändern, so sind die Funktionen einer Heckleuchte seit vielen Jahren auf einem ähnlichen Stand. In Scheinwerfern hingegen werden in den letzten Jahren vermehrt adaptive Lichtfunktionen eingesetzt, um die Sicht für den Fahrer zu verbessern. Es stellt sich die Frage, ob intelligente Funktionen auch in Heckleuchten einen Sicherheits- oder Komfortgewinn für den Kunden bringen können. Dazu muss die Rolle von Heckleuchten im Straßenverkehr analysiert werden. Eine Möglichkeit dazu bietet die Unfallanalyse. Da Heckleuchten als Kommunikationsmittel zwischen zwei hintereinanderfahrenden Fahrzeugen dienen, bietet vor allem die Untersuchung von Auffahrunfällen großes Potenzial zur Ermittlung von Nutzeranforderungen an eine rückwärtige Signalgebung.

---

[2] Dieses Kapitel basiert auf einer vorherigen Publikation: Mennig, I., Rosenhammer, S., & Krems, J. F. (2016). Potenzial innovativer Heckleuchten zur Unfallvermeidung. In VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.), *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* (S. 147–158). Düsseldorf, Deutschland: VDI Verlag GmbH.

5.1.1 Analyse von Auffahrunfällen

Die Untersuchung zur Entstehung von Auffahrunfällen mittels Unfalldatenbank und Literaturrecherche (Mennig, 2016) zeigte, dass die Hauptunfallursachen unangepasste Geschwindigkeit, zu geringer Abstand und mangelnde Aufmerksamkeit des Hinterherfahrenden sind. Als potenzielle Risiko- und Schutzfaktoren kommen die Sichtbarkeit des Unfallbeteiligten, das Verkehrsaufkommen sowie psychologische und physiologische Faktoren in Frage. Die Ergebnisse der Analyse geben keine Hinweise auf Sichtbehinderungen oder mangelnde Erkennbarkeit der Heckleuchte als relevante Unfallursachen (Mennig, 2016). Ein erhöhtes Verkehrsaufkommen kann das Unfallrisiko beeinflussen, indem das Einhalten von Sicherheitsabständen erschwert wird und sich die Chance erhöht, dass sich zwei Fahrzeuge in einer Konfliktsituation begegnen. Zusätzlich erfordern viele Verkehrsteilnehmer eine erhöhte Aufmerksamkeit vom Fahrer. Die meisten Auffahrunfälle finden innerorts, tagsüber und an Werktagen statt, was mit einer hohen Verkehrsdichte und dadurch mit einer hohen kognitiven Belastung und einem erhöhten Stressniveau einhergehen kann (Mennig, 2016). In einer Analyse schwerer Verkehrsunfälle zeigte sich, dass Personen mit einem emotional belastenden Lebensereignis in der Vergangenheit ein erhöhtes Unfallrisiko aufwiesen (Lagarde et al., 2004). Auch beruflicher und verkehrsbezogener Stress kann sich negativ auf das Fahrverhalten auswirken, was sich beispielsweise in einer erhöhten Geschwindigkeit zeigt (Rowden, Matthews, Watson, & Biggs, 2011). Es findet sich je nach Altersklasse und Geschlecht ein unterschiedliches Unfallrisiko, was unter anderem durch die Fahrerfahrung moderiert zu sein scheint (Mennig, 2016). Auch die Autoren Baldock et al. (2005), Staubach (2010) und Bartl und Hager (2006) beschreiben mangelnde Fahrpraxis und geringe Vertrautheit mit der Fahrsituation als Risikofaktoren für Verkehrsunfälle. Bei der Betrachtung der physiologischen Faktoren wurden die Vorerkrankungen der Unfallverursacher berücksichtigt. Hierbei zeigte sich neben Augenleiden, ein hoher Anteil von Erkrankungen, die mit einer mangelnden Konzentrationsfähigkeit einhergehen können (Göhringer, 2005; Mennig, 2016). Mehr als die Hälfte der Unfälle mit einer Geschwindigkeitsübertretung hätte durch eine rechtzeitige Reaktion verhindert werden können (Mennig, 2016).

Es stellt sich die Frage, welche Rolle Heckleuchten bei der Verursachung und Vermeidung von Auffahrunfällen spielen können. Mithilfe des Schlusslichts wird die Erkennbarkeit eines vorausfahrenden Fahrzeugs erhöht. Heckleuchten haben damit indirekt Einfluss auf die Geschwindigkeits- und

Abstandsschätzung (Buchner et al., 2006). Diese Schätzergebnisse könnten mittels adaptiver Funktionen verbessert werden, indem sich die rückwärtige Signalgebung an die gefahrene Geschwindigkeit und den Abstand anpasst. Außerdem übt die Heckleuchte eine kommunikative Funktion im Straßenverkehr aus. Mittels Blink- und Bremslicht können Signale an den Hinterherfahrenden übertragen werden. Neue Lichttechnologien bieten die Möglichkeit, den Informationsgehalt zu erhöhen. So ergibt sich die Idee, mittels dynamischer Lichtfunktionen im Heck gezielt die Aufmerksamkeit anderer Verkehrsteilnehmer zu beeinflussen.

Um Anforderungen an neue Funktionen in der Heckleuchte stellen zu können, soll das Potenzial zur Verbesserung der Aufmerksamkeitsverteilung durch dynamische Lichtfunktionen in einer Reihe von Experimenten untersucht werden.

5.1.2 Teildynamische Deaktivierung des Bremslichts

Die Untersuchung der teildynamischen Deaktivierung des Bremslichts wurde mit einer Prototypen-Heckleuchte durchgeführt. In weiteren Experimenten zur Aufmerksamkeitssteuerung werden die dynamischen Heckleuchten durch zwei grobpixelige Displays dargestellt. Diese Displays bestehen aus jeweils 65 einzeln ansteuerbaren, homogen leuchtenden OLED-Segmenten, welche in x-, y- und z-Richtung translatorisch und um die jeweiligen Achsen rotatorisch beweglich sind (siehe Abbildung 5.1-1).

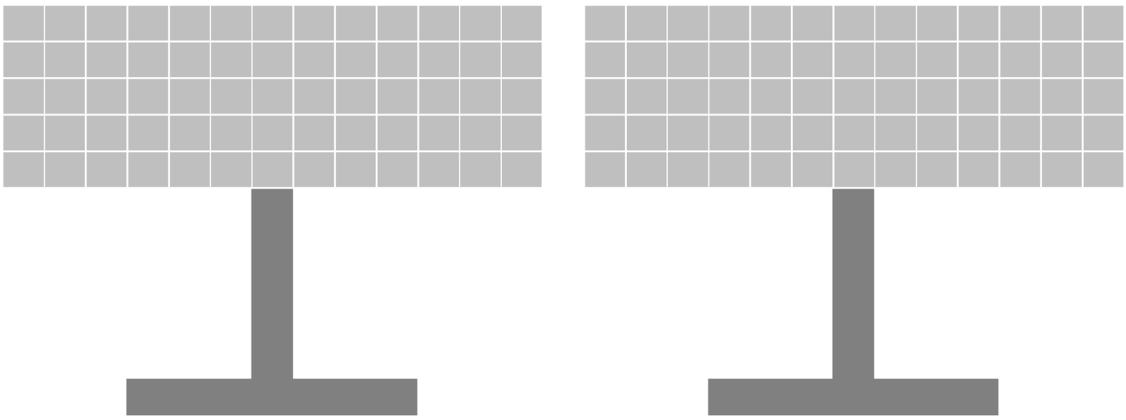

Abbildung 5.1-1. Schematische Darstellung der beiden OLED-Displays.

5.1.2.1 Forschungsfrage

Animierbare OLED-Segmente können potenziell die visuelle Salienz von Signalen erhöhen. Da bewegte Stimuli sogenannte Pop-Out-Effekte auf einer präattentiven Ebene fördern und somit die menschliche Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit verbessern

können (vgl. Merkmalsintegrationstheorie von Treisman & Gelade, 1980), sollten Animation zu einer kürzeren visuellen Suche führen. Die vorliegende Studie untersuchte daher, ob die Integration einer 200 ms andauernden Animation von OLED-Segmenten während der Deaktivierung eines LED-Bremslichts, im Vergleich zum statischen, parallelen Deaktivieren aller Segmente, die Wahrnehmbarkeit von Bremssignalen verändert (Hypothese 1). Des Weiteren wird angenommen, dass ein peripherer Blickwinkel, im Vergleich zu einem fokalen Blickwinkel, zu einer verzögerten Reaktion auf die Deaktivierung des Bremssignals führt (Hypothese 2).

5.1.2.2 Methode

Der Untersuchungsort war das Audi Lichtassistenzzentrum. Der befahrbare Lichtkanal ist 120 m lang, mattschwarz lackiert und mit einem straßenähnlichen Bodenbelag ausgestattet (Strohbach & Floss, 2015).

5.1.2.2.1 Stichprobe

Am Versuch nahmen 32 Mitarbeiter der AUDI AG teil. Darunter befanden sich 7 weibliche Probandinnen (21.88 %). Das Alter reichte von 20 bis 52 Jahre (M = 30.34; SD = 9.05). Insgesamt gaben 13 Teilnehmer eine korrigierte Sehschwäche an (40.63 %).

5.1.2.2.2 Studiendesign

Diese Forschungsfrage wurde anhand eines 2 (Deaktivierungsart: teildynamisch; statisch) × 2 (Blickwinkel: fokal; peripher) within-subjects Designs überprüft. Die statische Deaktivierung wurde über gleichzeitige Deaktivierung aller vier Segmente des OLED-Bremslichts operationalisiert. Die teildynamische Deaktivierung beschreibt das serielle Abblenden der einzelnen Segmente von außen nach innen innerhalb von 200 ms mit einer linearen Dimmrate. Das LED-Bremslicht wurde in beiden Bedingungen statisch abgeschaltet. Bei fokalem Blickwinkel wurde der Proband instruiert, das Bremslicht der Heckleuchte zu fokussieren. Unter peripherem Blickwinkel sollte die Versuchsperson Verkehrsmeldungen lesen und auf die Heckleuchte in der Peripherie reagieren. Die Heckleuchte wurde in einer Höhe von 0.95 m und einem Abstand von 2.50 m zum Fahrzeug positioniert. Die Teilnehmer saßen während der Erhebung auf dem Fahrersitz und wurden instruiert, die Heckleuchte zu fokussieren und so schnell wie möglich auf das Ausgehen des Bremslichts per Tastendruck zu reagieren. Nach dem Ausgehen des Bremslichts hatten die Probanden 5 s Zeit um zu reagieren. Erfolgte in diesem Intervall keine Reaktion, wurde der Durchgang als Verpasser gezählt. Die Dauer der aktiven

Bremsleuchte variierte dabei zwischen 5 s und 25 s und wurde randomisiert dargeboten. Ebenso wurde die Reihenfolge der teildynamischen und der statischen Deaktivierungsart randomisiert. Insgesamt wurden somit die Reaktionszeiten von 10 Durchgängen (jeweils 5 teildynamisch und 5 statisch) aufgezeichnet. Als Variation der unabhängigen Variable „Blickwinkel“ wurde ein Tabletcomputer im Winkel von 45° im Fahrzeuginnenraum justiert, über welchen die Teilnehmer Verkehrsmeldungen über ein Teleprompter-Programm laut vorlesen und aus der Peripherie auf das Ausgehen des Bremslichts per Tastendruck reagieren sollten. Der Versuchsleiter kontrollierte dabei das korrekte Ablesen um eine fortwährende visuelle Fokussierung des Tabletcomputers sicherzustellen. Diese Operationalisierung gewährleistete eine dauerhaft gleichbleibende Kopf- und Sitzposition, ohne zusätzliche auditive oder motorische Anforderungen. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist Abbildung 5.1-2 zu entnehmen.

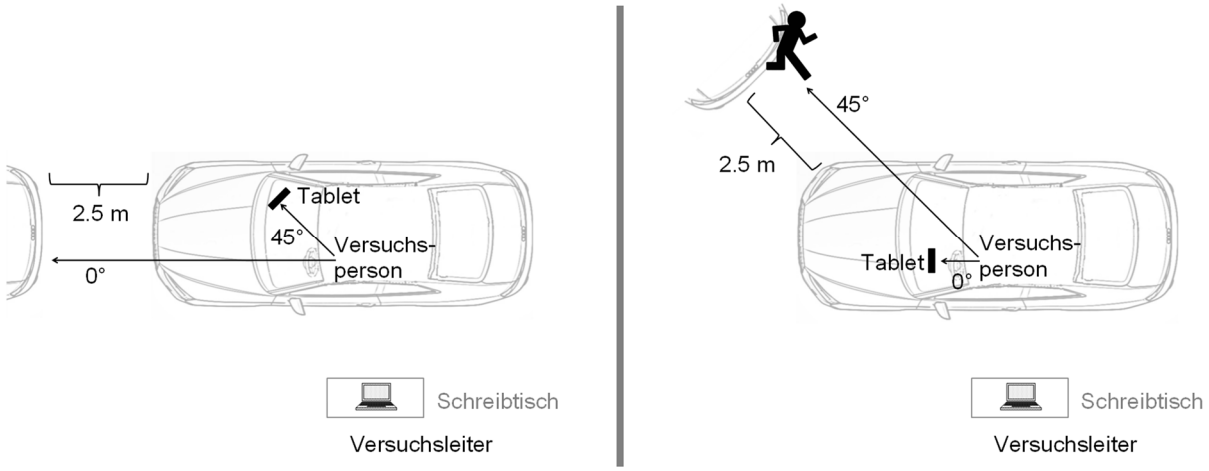

Abbildung 5.1-2. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für Studie 1 (links) und 2 (rechts).

In Studie 1 betrachteten Probanden eine 2.50 m entfernte Heckleuchte entweder fokal (0°) oder aus der Peripherie (45°; während des Lesens von Verkehrsmeldungen aus dem Tabletcomputer) und reagierten dabei per Tastendruck auf das Ausgehen des Bremslichts. In Studie 2 betrachteten Probanden eine 2.50 m entfernte, halbseitig durch einen Dummy verdeckte Heckleuchte entweder fokal (0°) oder aus der Peripherie (45°; während des Lesens von Verkehrsmeldungen aus dem Tabletcomputer) und reagierten dabei per Tastendruck auf das Ausgehen des Bremslichts.

5.1.2.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse beider Studien dargestellt und anschließend im Hinblick auf die Forschungsfrage diskutiert.

5.1.2.3.1 Ergebnisse aus Studie 1

In einem, der über alle Versuchspersonen hinweg 640 Durchgänge wurde das Signal innerhalb von 5 s nicht erkannt (0.16 %). Dieser Verpasser ereignete sich in der Bedingung mit statischer Deaktivierung unter peripherer Betrachtung der Leuchte und ging mit dem Maximalwert dieser Studie von 2.80 s in die Analyse der Reaktionszeiten ein. Über alle Durchgänge, in denen die Heckleuchte fokal betrachtet wurde, zeigte sich zunächst deskriptiv eine mittlere Reaktionszeit von 455.56 ms (*SD* = 76.28). Unter peripherem Blickwinkel verlängerte sich diese mittlere Reaktionszeit um 78.01 ms auf 533.57 ms (*SD* = 93.38). Die mittlere Reaktionszeit betrug bei statischem Deaktivieren des Bremslichts über alle Durchgänge 490.47 ms (*SD* = 92.24) und bei teildynamischem Deaktivieren 498.66 ms (*SD* = 77.44). Die mittleren Reaktionszeiten in Abhängigkeit der Deaktivierungsart und des Blickwinkels lassen sich Abbildung 5.1-3 entnehmen.

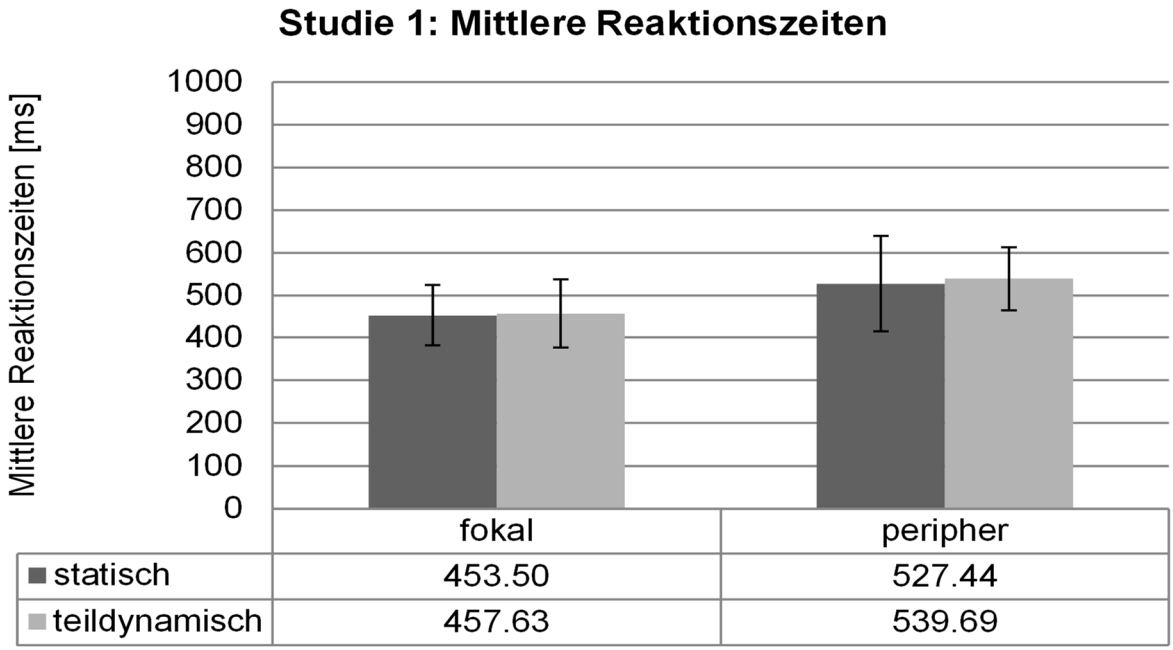

Abbildung 5.1-3. Mittlere Reaktionszeiten [ms] in Abhängigkeit von Deaktivierungsart (statisch; teildynamisch) und Blickwinkel (fokal; peripher) in Studie 1. *N* = 32.

Die Analyse der Mittelwertsunterschiede wurde mithilfe einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung durchgeführt. Dabei gingen die unabhängigen Variablen Deaktivierungsart (statisch; teildynamisch) und Blickwinkel (fokal; peripher) als zweigestufte Faktoren und die gemessenen Reaktionszeiten als abhängige Variable in die Analyse ein. Die jeweils 5 Mehrfachmessungen pro Proband und Bedingung wurden zu einem Wert gemittelt, welcher für die weiteren Analysen verwendet wurde. Die Ergebnisse lieferten einen signifikanten Haupteffekt für die Variable Blickwinkel

($F(1, 31) = 60.23$, $p = .000$, $\eta_p^2 = .66$), wonach unter fokalem Blickwinkel schneller auf das Ausgehen des Bremslichts reagiert wurde als unter peripherem Blickwinkel. Es wurde 66 % der Variation der Reaktionszeit durch den Blickwinkel aufgeklärt. Für die Variable Deaktivierungsart ergab sich kein signifikanter Haupteffekt ($F(1, 31) = 0.43$, $p = .515$, $\eta_p^2 = .01$) zwischen statischer und teildynamischer Deaktivierung. Ebenso ergab sich keine signifikante Interaktion beider Variablen ($F(1, 31) = 0.19$, $p = .668$, $\eta_p^2 = .01$).

5.1.2.3.2 Ergebnisse aus Studie 2

Um diese Befunde auf weitere Positionen der Heckleuchte erweitern zu können, wurde ein zweiter Aufbau umgesetzt, der eine Abbiegesituation mit teilweise verdeckter Heckleuchte durch einen Fußgänger nachstellen sollte (siehe Studie 2 in Abbildung 5.1-2). Dabei wurde die Heckleuchte rechtsseitig in einem Winkel von ca. 45° zum Fahrersitz positioniert und die rechte Hälfte der Heckleuchte durch einen Dummy komplett verdeckt. In der fokalen Bedingung wendeten sich die Teilnehmer im Fahrersitz der Heckleuchte zu, um diese zentral fokussieren zu können. Die Realisierung des peripheren Blickwinkels erfolgte über Ablesen von Verkehrsmeldungen aus einem Tabletcomputer, der zentral auf der Höhe des Kombiinstruments positioniert wurde. Es ergaben sich über alle Probanden hinweg insgesamt 7 Verpasser in 640 Durchgängen (1.09 %). Alle Verpasser ereigneten sich in der peripheren Bedingung, 4 davon während der teildynamischen Deaktivierung und 3 unter statischer Deaktivierung. Deskriptiv zeigte sich zunächst über alle Durchgänge, in denen die Heckleuchte fokal betrachtet wurde, eine mittlere Reaktionszeit von 472.31 ms ($SD = 83.32$). Unter peripherem Blickwinkel lag diese bei 639.38 ms ($SD = 200.75$). Über alle Durchgänge, in denen das Bremslicht statisch deaktiviert wurde, lag die mittlere Reaktionszeit bei 558.22 ms ($SD = 150.50$). Wurde das Bremslicht teildynamisch deaktiviert, lag diese bei 553.47 ms ($SD = 133.56$). Abbildung 5.1-4 zeigt die mittleren Reaktionszeiten als Funktion der unabhängigen Variablen Deaktivierungsart und Blickwinkel.

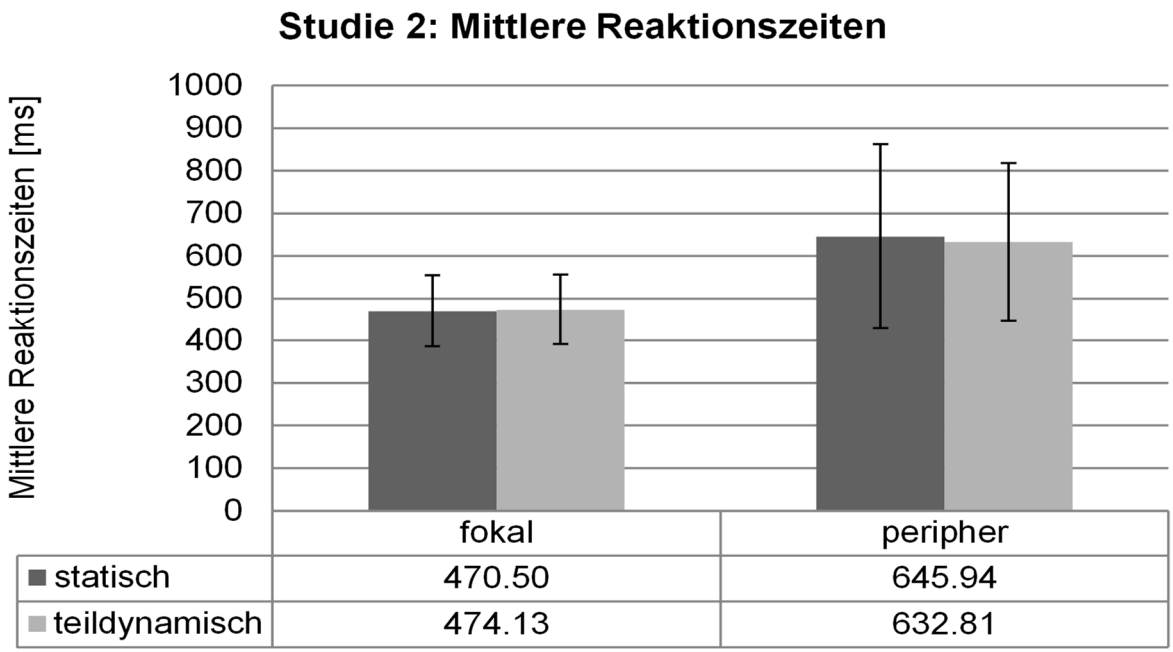

Abbildung 5.1-4. Mittlere Reaktionszeiten [ms] in Abhängigkeit von Deaktivierungsart (statisch; teildynamisch) und Blickwinkel (fokal; peripher) in Studie 2. *N* = 32.

Die analog zu Studie 1 berechnete zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung lieferte einen signifikanten Haupteffekt für die Variable Blickwinkel ($F(1, 31) = 52.67$, $p = .000$, $\eta_p^2 = .63$). Demnach wurde unter fokalem Blickwinkel schneller auf das Ausgehen des Bremslichts reagiert als unter peripherem Blickwinkel. Es wurde 63 % der Variation der Reaktionszeit durch den Blickwinkel aufgeklärt. Für die Variable Deaktivierungsart ergab sich kein signifikanter Haupteffekt ($F(1, 31) = 0.04$, $p = .850$, $\eta_p^2 = .63$) zwischen statischer und teildynamischer Deaktivierung. Ebenso ergab sich keine signifikante Interaktion beider Variablen ($F(1, 31) = 0.14$, $p = .710$, $\eta_p^2 = .01$).

5.1.2.4 Diskussion

Die vorliegende Studie untersuchte in zwei Experimenten, inwieweit die teildynamische Deaktivierung des Bremslichts die Wahrnehmung in Abhängigkeit des Blickwinkels und der Position der Heckleuchte verändert. Die Ergebnisse lieferten keinen signifikanten Haupteffekt der unabhängigen Variable „Deaktivierungsart“, wonach über die getesteten Blickwinkel und Heckleuchtenpositionen hinweg keine signifikant veränderten Reaktionszeiten auf das Signalende des Bremslichts durch unterschiedliche Deaktivierungsarten festzustellen waren (Hypothese 1). In der fokalen Bedingung konnten über alle Bedingungen hinweg schnellere Reaktionen hervorgerufen werden, als in der peripheren Bedingung (Hypothese 2). Darüber hinaus zeigten sich keine

signifikanten Interaktionen zwischen der Deaktivierungsart und dem Blickwinkel. Zusammengenommen sprechen diese Befunde dafür, dass die 200 ms andauernde, teildynamische Deaktivierung des Bremslichts zu keiner veränderten Wahrnehmbarkeit im Vergleich zur statischen Deaktivierung seitens des Nutzers führt. Dies zeigte sich unabhängig von der Heckleuchtenposition und vom Blickwinkel des Betrachters. Die Deaktivierung des LED-Schlusslichts konnte, unabhängig von einer zusätzlichen teildynamischen Deaktivierung der OLED-Schlusslichtsegmente, so schnell wahrgenommen werden, dass Reaktionszeiten von ca. 470–650 ms erreicht werden konnten. Durch die hohe Lichtstärke des Bremslichts und die geringe Distanz im Versuchsaufbau zwischen der Prototypen-Heckleuchte und der Versuchsperson scheint die aktuelle Bremslichtfunktion ausreichende Salienz aufzuweisen, um eine unmittelbare Reaktion auszulösen. Die folgende Untersuchung beschäftigt sich daher gezielt mit einer möglichen Umsetzung dynamischer Funktionen in einem weniger salienten Schlusslicht, unter Berücksichtigung zusätzlicher Umgebungsfaktoren.

5.1.3 Dynamisches Schlusslicht zur Aufmerksamkeitssteuerung

Die Unfallanalyse (Mennig, 2016) zeigte, dass ein Großteil der Auffahrunfälle durch eine falsche Aufmerksamkeitsverteilung im Straßenverkehr verursacht wird. Für den Verkehrsraum wird daher der Slogan „Fahr konzentriert, bleib am Leben!“ (Bartl & Hager, 2006, S. 40) gefordert und somit eine Verkehrsraumgestaltung welche die Aufmerksamkeit erhöht. Dazu gäbe es zahlreiche Möglichkeiten, wie die Umwandlung von Kreuzungen in Kreisverkehre, die Abschaffung von Fahrstreifenmarkierungen oder Einführung optischer Anhaltspunkte (Bartl & Hager, 2006). Der Fahrer wird im Straßenverkehr mit einer Flut an Reizen konfrontiert, die durch das Verarbeitungssystem sowie mittels Handlungszielen selektiert werden (Schade, 2014). Durch Unaufmerksamkeit des Fahrers kann es zu Fehlern bei der Auswahl der angemessenen Informationen kommen (Trick et al., 2004). Vor allem innerorts im dichten Stadtverkehr ist die Komplexität der Situationen deutlich erhöht. Die menschliche Wahrnehmung lässt sich hinsichtlich des fokalen und peripheren Sehens unterscheiden. Zur visuellen Suche, der Objekterkennung und für Aufgaben, die eine hohe visuelle Sehschärfe benötigen, ist das fokale visuelle System zuständig (Horrey et al., 2006). Mithilfe des peripheren visuellen Systems gelingt die räumliche Orientierung und die Haltungs- und Bewegungskontrolle (Horrey et al., 2006). Gefahren werden hauptsächlich fokal und

weniger schnell peripher wahrgenommen (Horrey et al., 2006). Es stellt sich die Frage, wie auf kritische Situationen hingewiesen werden kann, die nicht im gegenwärtigen Fokus des Fahrers liegen. Die Salienz eines Reizes fördert die Aufmerksamkeitszuwendung (Wickens, Helleberg, Goh, Xu, & Horrey, 2001). So lenkt der Reiz mit dem größten Merkmalskontrast die selektive Aufmerksamkeit automatisch auf sich (Schade, 2014). Dabei ist das menschliche Auge besonders sensibel für Helligkeitsveränderungen im peripheren Bereich (Gail et al., 2001). Dynamische Lichtfunktionen, wie das Blinken, sind auch außerhalb des zentralen Blickfelds besonders gut geeignet, um die Aufmerksamkeit auf sich zu lenken (Blom, Niederée, Hecker, & Vollrath, 2013; Gail et al., 2001; Trick et al., 2004).

Um den Blick des Fahrers auf ein vorausfahrendes Fahrzeug lenken zu können, soll mit weiteren Studien untersucht werden, ob sich mit dynamischen Funktionen im Schlusslicht gezielt die Aufmerksamkeit steuern lässt. Als unabhängige Variablen sollen folgende Attribute der Schlusslichtfunktion variiert werden: Art der Dynamik (z.B. Dimmen, Blinken, Wischen), Geschwindigkeit der Animation, Größe und Helligkeit der leuchtenden Fläche. Zusätzlich sollen die Umgebungsmerkmale Helligkeit, Entfernung und Blickwinkel variiert werden. Als abhängige Variable wird die Reaktionszeit erfasst.

5.1.4 Potenzial von Heckleuchten zur Vermeidung von Auffahrunfällen

Heckleuchten dienen der kontinuierlichen Kommunikation mit dem rückwärtigen Verkehr. Brems- und Blinklicht übermitteln dabei wichtige Signale an den Hinterherfahrenden und das Schlusslicht erhöht die generelle Sichtbarkeit eines Fahrzeugs. Eine Unfallanalyse ergab, dass Auffahrunfälle vor allem durch eine unangepasste Geschwindigkeit, einen zu geringen Abstand und mangelnde Aufmerksamkeit verursacht werden (Mennig, 2016). Durch intelligente Technologien ergibt sich die Möglichkeit, neue Funktionen in Heckleuchten zu integrieren. So könnte mittels Laser-Technologien eine Abstandsmarkierung in Form einer roten Linie auf die Straße projiziert werden. Mit organischen LEDs lassen sich klar definierte, homogen leuchtende Segmente einzeln ansteuern und variabel auf verschiedene Helligkeitsniveaus dimmen. Es ergibt sich dadurch das Potenzial durch neue Schlusslichtfunktionen die Aufmerksamkeit eines Hinterherfahrenden gezielt zu erregen sowie die Geschwindigkeits- und Entfernungsschätzung zu verbessern. Die Forschung zeigt, dass eine potenzielle Gefahr durch eine Fokussierung schneller wahrgenommen werden kann (Horrey et al., 2006). Um eine Aufmerksamkeitslenkung in der Peripherie einzuleiten, eignen sich vor allem

saliente Signale, beispielsweise durch eine blinkende Lichtquelle (Blom et al., 2013; Gail et al., 2001; Trick et al., 2004). Mit einer Reihe von wahrnehmungspsychologischen Experimenten wird untersucht, inwiefern sich mittels dynamischer Funktionen die Aufmerksamkeit gezielt steuern lässt. Mithilfe einer umfassenden Analyse der Nutzeranforderungen wird die Heckleuchte nicht das sprichwörtliche Schlusslicht in der Lichtentwicklung bilden.

In diesem Kapitel wurde einem möglichen Einfluss einer teildynamischen Deaktivierung des Bremslichts mithilfe von experimentellen Untersuchungen nachgegangen. Um das Potenzial zur Aufmerksamkeitssteuerung durch dynamische Funktionen in Heckleuchten vollends ausschöpfen zu können, werden im folgenden Abschnitt zwei Experimente dargelegt, die sich mit einer möglichen Umsetzung von Dynamiken im Schlusslicht beschäftigen.

5.2 Effekte dynamischer Schlusslichtfunktionen auf die Wahrnehmung

Wie schwer es ist, die Aufmerksamkeit im Straßenverkehr adäquat auf alle relevanten Reize zu verteilen, spiegelt sich in dem Titel des Papers von Götze, Bißbort, Petermann-Stock und Bengler (2014) wieder: „A careful driver is one who looks in both directions when he passes a red light". Der Fahrer hat durch die Anzahl und Vielfalt der Verkehrsteilnehmer im städtischen Gebiet mit einer hohen Komplexität der Verkehrssituation zu tun (Götze et al., 2014). So treten Auffahrunfälle vor allem innerorts und bei erhöhter Verkehrsdichte auf (siehe Kapitel 3.2). Konzentration und eine angemessene Aufmerksamkeitsverteilung sind dabei die Schlüsselfaktoren, um eine Fokussierung der Fahrzeuge gewährleisten zu können, die potenziell unfallrelevant sein können (siehe Kapitel 3.2).

Die Fülle der Reize aus der Umwelt kann aufgrund von Kapazitätsgrenzen des menschlichen Verarbeitungssystems nicht vollständig aufgenommen und verarbeitet werden (Wolfe & Horowitz, 2004). Dabei spielt vor allem die mentale Belastung (wie viel wird wahrgenommen) als auch das Situationsbewusstsein (welche Aspekte der Situation werden einem bewusst) eine entscheidende Rolle, um Aufmerksamkeit beschreiben zu können (Trick et al., 2004). Die Selektion der wahrgenommenen Reize kann sowohl bewusst als auch unbewusst geschehen (Trick et al., 2004). Das visuelle System besteht aus einem fokalen und einen peripheren (ambienten) Kanal. Damit wird sowohl die visuelle Suche und Objekterkennung als auch die räumliche Orientierung gewährleistet (Horrey et al., 2006). „Das periphere Sehen [zeichnet] sich durch eine schlechte Detailauflösung und geringe Kontrastempfindlichkeit aus […] und [kann] unbewegte Objekte schlecht wahrnehmen […]. Gleichzeitig benötigt die Verarbeitung von peripher wahrgenommenen Objekten mehr Zeit als die foveale Wahrnehmung" (Schlag et al., 2009, S. 26). Durch die visuelle Fokussierung einer plötzlich auftretenden Gefahr kann diese schneller erkannt werden (Horrey et al., 2006). Daher wird in diesem Kapitel diskutiert, inwiefern sich Aufmerksamkeit gezielt auf ein kritisches Objekt lenken lässt, wenn dieses im fokalen oder peripheren Sichtbereich des Probanden liegt. Die Salienz eines Reizes kann hierbei für die Aufmerksamkeitslenkung entscheidend sein. Es wird davon ausgegangen, dass der Reiz mit dem größten Merkmalskontrast die selektive Aufmerksamkeit automatisch lenkt (Schade, 2014). Dabei fungieren die sogenannten instationären Zellen, die vorwiegend in der Peripherie der Retina zu finden sind, „wie ein Warnsystem für […] visuelle Veränderungen, die mit

hoher Wahrscheinlichkeit noch nicht angeschaut wurden“ (Ansorge & Leder, 2011, S. 94). Das menschliche Auge ist auch im peripheren Bereich besonders sensibel für Helligkeitsveränderungen (Gail et al., 2001). Außerdem kann durch blinkende Objekte automatisch eine unwillentliche Aufmerksamkeitssteuerung ausgelöst werden (Trick et al., 2004). Im Folgenden wird diskutiert, inwiefern sich das Schlusslicht eines Fahrzeugs zur gezielten Blicklenkung eines Hinterherfahrenden eignen könnte. Ein Schlusslicht zeichnet sich traditionell durch die rote Farbe und eine konstante Helligkeit, in einem vorgegebenen gesetzlichen Bereich, aus. Das Schlusslicht dient als Hinweis für den Hinterherfahrenden und bietet Hinweisreize zur Orientierung bezüglich Abstand und Breite (Hagendorf et al., 2011). Das Fahrzeug wird durch die Heckleuchte für andere Verkehrsteilnehmer besser wahrnehmbar und Auffahrunfälle aufgrund von schlechter Sicht können vermieden werden. In dem man dem konstant leuchtenden Schlusslicht eine dynamische Funktion hinzufügt, wird die Bedeutung des Schlusslichts erweitert. Mit einer dynamischen Funktion ist eine wahrnehmbare Bewegung gemeint, die durch eine sequentielle Helligkeitsänderung im Schlusslicht erzeugt wird. Durch diese Animation lässt sich die inhaltliche Bedeutung des Schlusslichts ergänzen und die Möglichkeit besteht, auf konkrete Verkehrssituationen hinzuweisen.

5.2.1 Forschungsfrage

In zwei Probandenstudien sollen diejenigen Faktoren ermittelt werden, die einen Einfluss auf die subjektive Wirkung und Bedeutungsbewertung von Schlusslichtanimationen ausüben. Des Weiteren wird die objektive Reaktionsfähigkeit auf diese Dynamiken in Abhängigkeit der verschiedenen Faktoren analysiert. Dabei werden sowohl Umgebungsvariablen als auch Eigenschaften der Animation betrachtet. Es wird angenommen, dass die Wahrnehmung der Dynamik im Schlusslicht von der Entfernung zur Heckleuchte (Hypothese 1) und dem Blickwinkel (Hypothese 2) abhängt. Außerdem wird der Frage nachgegangen, inwiefern die Art der Bewegung von Animationen (Hypothese 3), die Darstellungsgeschwindigkeit (Hypothese 4) sowie die Umgebungshelligkeit (Hypothese 5) einen Einfluss auf die Wahrnehmung von Schlusslichtdynamiken ausüben.

5.2.2 Experiment 1

Um die Anzahl der Faktorstufen der unabhängigen Variablen zu reduzieren, wurde das Experiment in eine Vor- und eine Hauptstudie unterteilt.

5.2.2.1 Methode

Die Vorstudie fand vom 27.04.2016 bis zum 04.05.2016 im Lichtassistenzzentrum der AUDI AG am Standort Ingolstadt statt. Die Versuchsdauer pro Proband betrug dabei ca. 30–45 min.

5.2.2.1.1 Stichprobe

An dem Experiment nahmen insgesamt 31 Personen teil. Die Teilnehmer waren alle Mitarbeiter der AUDI AG und in der Lichtentwicklung tätig. Die Stichprobe setzte sich aus 27 Männern und 4 Frauen zusammen. Die Teilnehmer waren zwischen 20 und 54 Jahre alt (M = 33.10; SD = 8.76). Die Teilnehmer hatten eine normale (48.39%) oder korrigierte Sehstärke (51.61 %). Die jährliche Fahrleistung betrug im Durschnitt 19383.87 km (SD = 13574.34) und variierte zwischen 1500 km (3.23 %) und 50000 km (6.45 %). Die Probanden benutzten das Auto täglich (77.42%), mehrmals pro Woche (16.13 %) oder ca. einmal pro Woche (6.45 %).

5.2.2.1.2 Versuchsaufbau

Das Experiment fand in einem dunklen Raum ohne Fenster statt. Für die subjektiven Befragungen mittels Fragebogen wurde die Deckenbeleuchtung gedimmt eingeschaltet. Anschließend wurde das Licht wieder ausgeschaltet und es wurden jeweils ca. 30 s zur Dunkeladaption abgewartet. Der Proband saß zentral auf einem Stuhl in einem Abstand von 4 m vor zwei OLED-Displays. Die Displays bestanden aus jeweils 65 einzeln ansteuerbaren OLED-Kacheln (siehe Bachmaier, 2016). Eine OLED-Kachel hatte eine Gesamtfläche von 20.71 cm² (4.74 cm x 4.37 cm) und eine Leuchtfläche von 11.51 cm² (3.80 cm x 3.03 cm). Die beiden Displays wurden über die Software e:cue lighting control angesteuert. Die leuchtenden Flächen bestanden jeweils aus 3 x 3 Segmenten in der Mitte des jeweiligen Displays und ergaben damit eine Leuchtfläche von 103.63 cm² pro Display. Dies entspricht in etwa der Größenordnung eines Schlusslichts eines Audi A4-Modelles (2015). Die einzelnen OLED-Segmente wurden mittels Pulsweitenmodulation im Laufe des Versuchs auf verschiedene Stufen gedimmt. Dabei unterschritt die Lichtstärke niemals das nach den ECE-Regelungen (United Nations, 2012) festgelegte gesetzliche Minimum eines Schlusslichts

von 4.0 cd und überschritt in keinem Zustand das für ECE gesetzliche Maximum von 17.0 cd. Somit wurde gewährleistet, dass zu jedem Zeitpunkt des Versuchs eine gesetzlich geeignete Lichtstärke dargeboten wurde. Beide Leuchtflächen wurden ca. 0.80 m voneinander entfernt und auf einer Höhe von ca. 0.85 m angebracht (siehe Abbildung 5.2-1).

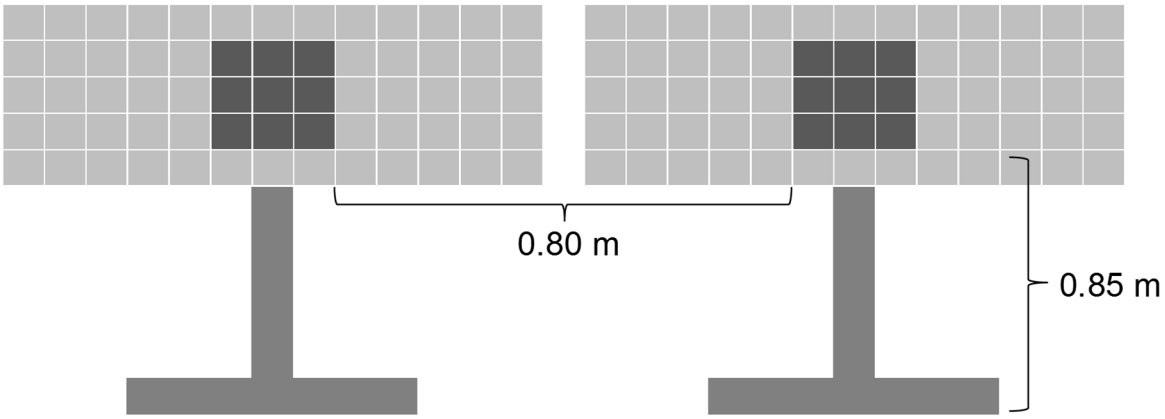

Abbildung 5.2-1. Schematische Darstellung der beiden OLED-Displays mit dunkel eingezeichneter Leuchtfläche.

Der Versuchsleiter saß an einem Schreibtisch neben dem Probanden, bediente von hier aus die Ansteuerung der beiden OLED-Displays und notierte die subjektive Bewertung des Probanden. Zusätzlich wurden die spontanen Assoziationen des Probanden mittels Mikrofon aufgezeichnet und anschließend transkribiert.

5.2.2.1.3 Aufgabenstellung

Es wurden insgesamt acht verschiedene Animationen auf den beiden Displays präsentiert. Die Animationen unterschieden sich dabei in ihrer Bewegungsart und -richtung und sind in Abbildung 5.2-2 abgebildet. Die Bewegung wurde auf dem rechten Display vertikal gespiegelt dargestellt.

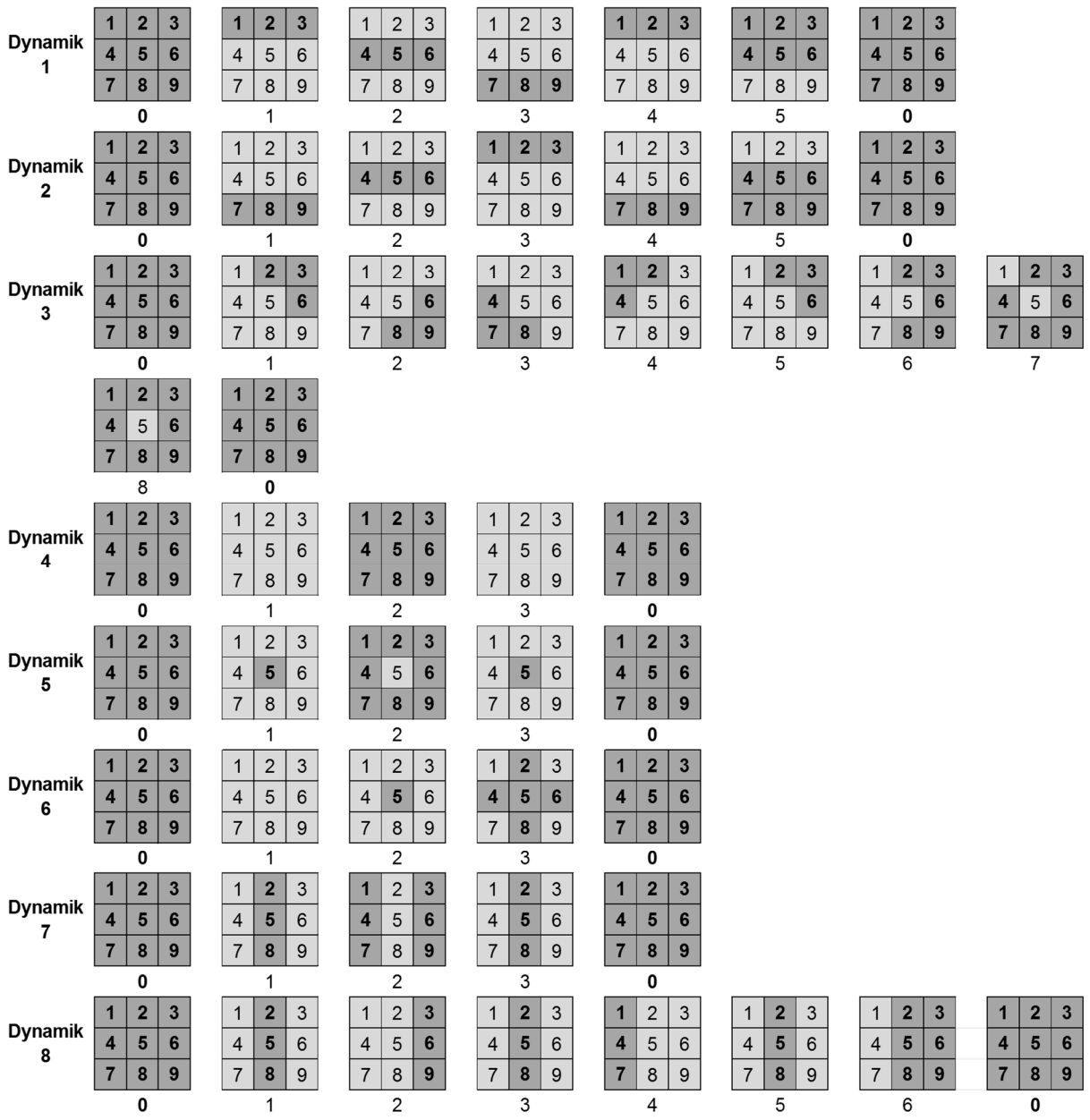

Abbildung 5.2-2. Schematische Darstellung der Dynamiken 1 bis 8 (linkes Display).

Die einzelnen OLED-Segmente wurden in zwei verschiedenen Dimmstufen betrieben, die im Folgenden mit „maximal“ und „minimal“ beschrieben werden. Im Ausgangszustand leuchteten alle neun OLED-Segmente auf maximaler Stufe. Dadurch ergab sich eine Gesamtlichtstärke von ca. 16.9 cd. In den folgenden Schritten wurden jeweils einzelne OLED-Segmente auf die zweite minimale Dimmstufe geschalten. Dabei bewegte sich die Gesamtlichtstärke des Schlusslichts zu jedem Zeitpunkt zwischen 4.0 cd und 16.9 cd. Nach 0.60 s wurde bei allen Animationen jeweils wieder der Ausgangszustand mit einer Gesamtlichtstärke von 16.9 cd erreicht. Aufgabe der Probanden war es, die Animationen mithilfe von Fragebögen subjektiv zu bewerten.

5.2.2.1.4 Versuchsablauf

Im ersten Teil des Versuchs wurde jede Dynamik einmal präsentiert. Dabei wurde der Proband aufgefordert, spontane Assoziationen zur Animation laut auszusprechen. Es wurde zusätzlich die spontane, freie Interpretation der Bedeutung der jeweiligen Dynamik erfasst. Anschließend wurde die subjektiv wahrgenommene Dringlichkeit der entsprechenden Dynamik bewertet. Auf diese Weise wurden alle acht Dynamiken von allen Probanden subjektiv bewertet. Die Reihenfolge der Präsentation der Dynamiken wurde über die Probanden randomisiert.

Im zweiten Teil des Versuchs wurden die Dynamiken noch einmal präsentiert und mehrfach abgespielt. Nach jeder Dynamik wurde ein Fragebogen zur Wirkung und Bedeutung der Dynamiken ausgefüllt. Dabei wurde nach der subjektiven Sichtbarkeit und der subjektiven Aufmerksamkeitsanziehung gefragt. Zusätzlich wurde ein Eigenschaftsfragebogen ausgefüllt, mithilfe dessen die Dynamiken hinsichtlich Neugier, Störung, oder wahrgenommener Hektik bewertet wurden. Es wurden der Informationsgehalt und gegebenenfalls eine inhaltliche Bedeutung der Dynamiken abgefragt. Die Bedeutung der Dynamik wurde hinsichtlich ihrer Verständlichkeit bewertet. Zum Abschluss füllte der Proband einen kurzen demographischen Fragebogen aus.

5.2.2.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Auswertung der subjektiven Daten dargestellt.

5.2.2.2.1 Spontane Assoziationen und freie Bedeutungsbewertung

Die spontanen Assoziationen der Probanden wurden zunächst transkribiert und anschließend 50 Bedeutungskategorien zugeordnet. Diese wiederum ließen sich in vier Cluster unterteilen: Verkehrszeichen, Wechselverkehrszeichen, Fahrsituation, Fahrzeugzustand. Der Kategorie Verkehrszeichen wurden Antworten zugeordnet, die den Dynamiken die Übermittlung von Informationen zusprachen, die im Allgemeinen auf Verkehrszeichen zu finden sind (Fahrbahnverengung, Tunneleinfahrt, Bahnübergang, Kreisverkehr, etc.). In der Kategorie Wechselverkehrszeichen wurden die Aussagen zusammengefasst, die auf dynamische Situationen wie einen Stau, oder bestimmte Witterungsbedingungen hinweisen. Daneben wurden in den Dynamiken häufig Hinweise in Bezug auf die aktuelle Fahrsituation gesehen, zum Beispiel eine Warnung, eine Verzögerung oder ein Flirtangebot des vorausfahrenden Fahrers. Zusätzlich wurden Informationen über den Fahrzeugzustand in den Dynamiken wahrgenommen, wie dem

Ladezustand eines Elektrofahrzeugs. In Tabelle 5.2-1 werden Nennungen innerhalb der Kategorie „Fahrsituation“ dargestellt, die von mindestens 10 % der Personen für mindestens eine der Dynamiken genannt wurden.

Tabelle 5.2-1. Relative Häufigkeiten [%] der frei assoziierten inhaltlichen Bedeutungen der acht verschiedenen Animationen. *N* = 31.

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Achtung/ Gefahr	≥ 10%	≥ 10%		≥ 25%	≥ 25%	≥ 10%	≥ 25%	≥ 25%
Bremsung	≥ 10%	≥ 10%		≥ 50%	≥ 25%	≥ 25%	≥ 10%	
Verzögerung	≥ 10%					≥ 10%		
Kritischer Abstand	≥ 10%			≥ 10%				
Beschleunigung		≥ 10%						
Richtungsänderung			≥ 10%		≥ 10%		≥ 10%	≥ 25%
Danke/ Hallo		≥ 10%	≥ 25%		≥ 10%	≥ 10%	≥ 10%	≥ 10%
Sonstiges		≥ 10%	≥ 10%					≥ 10%

Anmerkung: Mehrfachnennungen möglich.

Nach dem ersten Eindruck der Dynamiken wurde außerdem die wahrgenommene Dringlichkeit abgefragt (siehe Abbildung 5.2-3). Die Dringlichkeitsbewertung fiel stark differenziert aus. Dynamik 3 und 6 wurden als am wenigsten dringlich bewertet. Für Dynamik 4 wurde am häufigsten die höchste subjektive Dringlichkeitsstufe angegeben.

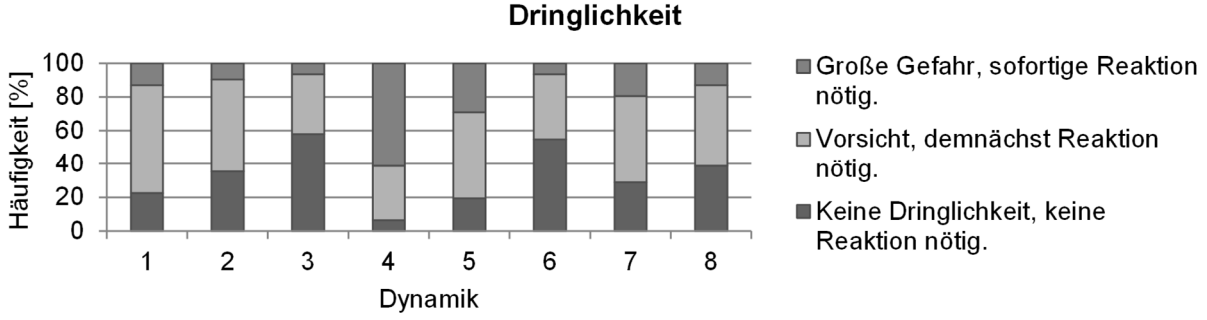

Abbildung 5.2-3. Relative Häufigkeiten [%] für die subjektive Bewertung der Dringlichkeit. *N* = 31.

Im zweiten Teil des Versuchs wurde ein Fragebogen zur Bedeutung und Wirkung der Dynamiken ausgefüllt.

5.2.2.2.2 Bedeutung und Wirkung der Dynamiken

Die Probanden hatten nun die Möglichkeit, die Animationen mehrfach hintereinander zu betrachten. Die Anzahl der Durchgänge konnten die Teilnehmer dabei selbst bestimmen. Im Durchschnitt betrachteten die Probanden dabei jede Dynamik 2.74 Mal (*SD* = 1.49). Am häufigsten wurde auf Wunsch der Probanden die Dynamik 2 wiederholt (*M* = 3.10; *SD* = 2.05) und am seltensten die Dynamik 4 (*M* = 2.26; *SD* = 1.16). Zunächst wurde die Sichtbarkeit der Dynamik subjektiv bewertet (siehe Abbildung 5.2-4). Im Durchschnitt wurden alle Dynamiken als sichtbar eingeschätzt, wobei Dynamik 6 als am schlechtesten erkennbar bewertet wurde.

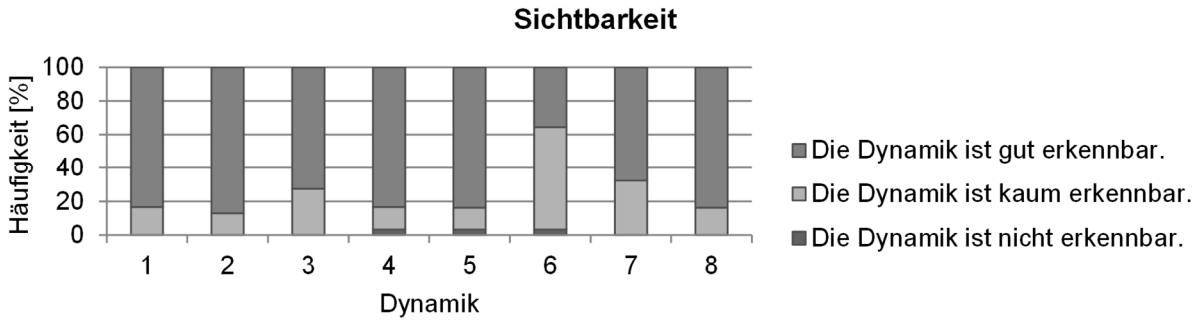

Abbildung 5.2-4. Relative Häufigkeiten [%] für die subjektive Bewertung der Sichtbarkeit. *N* = 31.

Im Anschluss wurden verschiedene Eigenschaften der Dynamiken auf einer 7-stufigen Skala von stimme absolut nicht zu (−3) bis stimme absolut zu (+3) abgefragt (siehe Tabelle 5.2-2). Die Dynamiken im Schlusslicht eines vorausfahrenden Fahrzeugs würden die Probanden im Durchschnitt nicht verärgern, nicht stören, eher nicht verwirren, eher nicht ablenken und nicht erfreuen. Im Mittel würden die Dynamiken die Probanden hingegen interessieren und neugierig machen. Die Dynamik wirkte im Durschnitt nicht als Defekt des Schlusslichts und wurde weder als angenehm noch als unangenehm wahrgenommen. Einige Dynamiken (Dynamik 3, 7 und 8) wirkten hektischer als andere (z.B. Dynamik 6).

Tabelle 5.2-2. Mittelwerte und Standardabweichungen für die Eigenschaftsbewertung der Dynamiken auf einer 7-stufigen Skala von stimme absolut nicht zu (−3) bis stimme absolut zu (+3). *N* = 31.

Dynamik		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Diese Schlusslicht-Dynamik würde mich bei einem vorausfahrenden Fahrzeug vermutlich …									
... verärgern.	***M***	−2.10	−1.83	−1.47	−2.17	−1.84	−1.70	−1.71	−1.58
	SD	1.19	1.57	1.67	1.24	1.50	1.46	1.63	1.45
… neugierig machen.	***M***	0.77	0.83	1.30	0.90	1.06	0.74	0.71	1.06
	SD	1.36	1.32	1.27	1.78	1.22	1.39	1.40	1.08
… erfreuen.	***M***	−0.30	−0.47	0.07	−1.13	−0.45	−0.19	−0.52	−0.45
	SD	1.16	1.26	1.57	1.31	1.50	1.57	1.41	1.43
… verwirren.	***M***	−0.57	−0.27	0.40	−1.23	−0.52	−0.10	0.06	0.03
	SD	1.73	1.77	1.74	1.52	1.88	1.77	1.74	1.66
… nicht interessieren.	***M***	−1.17	−1.13	−1.34	−1.80	−1.77	−1.03	−1.58	−1.61
	SD	1.37	1.56	1.62	1.42	1.24	1.49	1.19	1.16
… stören.	***M***	−1.40	−1.00	−0.67	−1.73	−1.58	−1.06	−1.06	−1.03
	SD	1.50	1.69	1.92	1.41	1.50	1.64	1.72	1.62
… ablenken.	***M***	−0.60	−0.37	0.10	−1.10	−0.48	−0.29	−0.10	−0.13
	SD	1.93	1.76	1.85	1.68	1.88	1.76	1.84	1.58
Die Dynamik wirkt …									
… wie ein Defekt des Schlusslichts.	***M***	−2.32	−2.16	−1.94	−1.97	−1.97	−1.84	−2.00	−2.13
	SD	1.09	1.53	1.76	1.69	1.66	1.67	1.39	1.26
…hektisch.	***M***	−0.23	−0.23	0.19	−0.16	0.13	−1.06	0.26	0.87
	SD	1.72	1.60	1.63	1.89	1.74	1.74	1.61	1.10
… angenehm.	***M***	0.10	−0.13	−0.23	−0.42	−0.03	0.42	−0.13	−0.35
	SD	1.35	1.10	1.60	1.39	1.66	1.41	1.18	1.21

Die Bewertungen der subjektiv wahrgenommenen Aufmerksamkeitsanziehung der verschiedenen Dynamiken ist in Abbildung 5.2-5 dargestellt. Allen Dynamiken wurde eine potenzielle Aufmerksamkeitslenkung zugeschrieben. Dynamik 6 wurde, wie auch bei der Einschätzung der Sichtbarkeit, am schlechtesten bewertet.

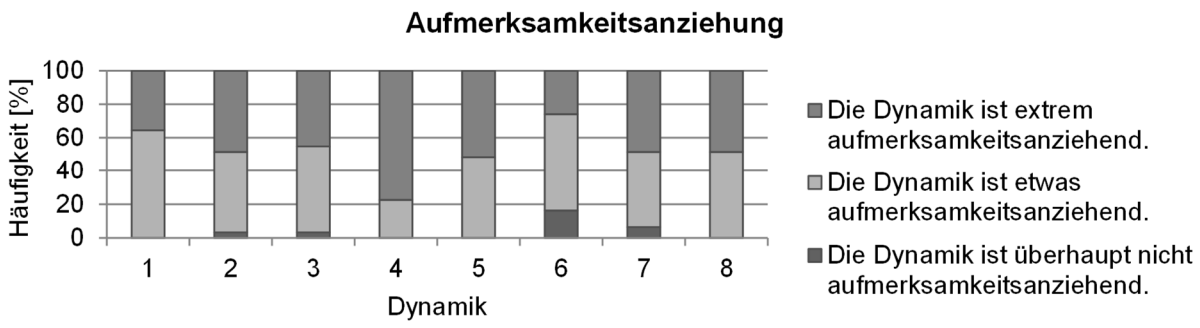

Abbildung 5.2-5. Relative Häufigkeiten [%] für die subjektive Bewertung der Aufmerksamkeitsanziehung. *N* = 31.

Zusätzlich wurde der Informationsgehalt der jeweiligen Dynamiken abgefragt (siehe Abbildung 5.2-6). Dabei wurde den Dynamiken mehrheitlich eine spezifische Information zugeschrieben.

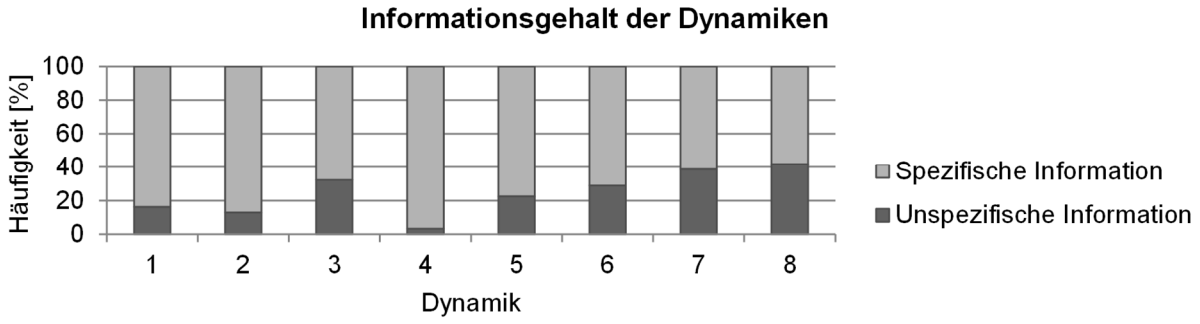

Abbildung 5.2-6. Relative Häufigkeiten [%] für die subjektive Bewertung des Informationsgehalts. *N* = 31.

Im Anschluss wurde die inhaltliche Bedeutung der Dynamik anhand einiger Beispiele abgefragt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.2-3 dargestellt.

Tabelle 5.2-3. Relative Häufigkeiten [%] der Bewertungen der inhaltlichen Bedeutung der acht verschiedenen Animationen. *N* = 31.

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Bremsung	≥ 25%			≥ 50%	≥ 25%	≥ 10%		
Verzögerung	≥ 25%			≥ 25%	≥ 10%	≥ 10%	≥ 10%	≥ 10%
Kritischer Abstand	≥ 25%	≥ 10%		≥ 50%	≥ 25%			≥ 10%
Stillstand				≥ 10%	≥ 10%	≥ 10%	≥ 10%	
Beschleunigung		≥ 50%	≥ 10%			≥ 10%		
Richtungsänderung							≥ 10%	≥ 25%
Danke		≥ 10%	≥ 10%			≥ 10%		≥ 10%
Hallo		≥ 10%	≥ 25%			≥ 25%	≥ 10%	≥ 10%
Sonstiges	≥ 10%	≥ 10%	≥ 10%	≥ 10%			≥ 10%	≥ 10%

Anmerkung: Mehrfachnennungen möglich.

Die Verständlichkeit der Dynamiken wurde auf einer 5-stufigen Skala von missverständlich (−2) bis unmissverständlich (+2) im Mittel mit $M = -0.18$ ($SD = 1.21$) bewertet. Lediglich Dynamik 4 wurde im positiven Bereich ($M = 1.10$; $SD = 0.99$) bewertet. Die restlichen Dynamiken bewegten sich im Mittel zwischen $M = -0.73$ ($SD = 1.06$; Dynamik 3) und $M = 0.00$ ($SD = 1.21$; Dynamik 1).

5.2.2.3 Diskussion

In der Vorstudie wurden acht verschiedene Animationen aus geringer Distanz fokal betrachtet und hinsichtlich bestimmter Eigenschaften subjektiv bewertet. Dabei wurden im Durchschnitt alle Animationen als sichtbar und wahrnehmbar beurteilt. Es wurde allen Animationen eine aufmerksamkeitsanziehende Wirkung zugesprochen. Trotz gleicher Animationsdauer wurden die Dynamiken jedoch als unterschiedlich dringlich wahrgenommen. Bei der Bedeutungsbewertung wurden insbesondere Dynamik 1, 4 und 5 mit den Kategorien „Bremsung“, „Verzögerung“ und „kritischer Abstand" in Verbindung gebracht. Dynamik 4 zeichnete sich außerdem durch eine hohe subjektiv wahrgenommene Dringlichkeit, eine hohe Aufmerksamkeitsanziehung und eine gute Sichtbarkeit aus. Für die Hauptstudie wurden zwei Animationen gesucht, die ohne Vorwissen bestehender Systeme von jedem Probanden intuitiv bewertet werden können. Da ein Blinken, wie es in Dynamik 4 dargestellt wurde, in ähnlicher Form in sogenannten Notbremsassistenzsystemen in Heckleuchten bereits eingesetzt wird, wurde für den weiteren Verlauf eine Mischform der Dynamik 1 und 4 gewählt, um bei ähnlicher

Bedeutungsbewertung hohe Dringlichkeitswerte erreichen zu können. Als zweite Dynamik wurde eine Animation gewählt, die sich von der ersten Dynamik in der subjektiven Bewertung möglichst stark unterschied. Dynamik 3 zeichnete sich durch relativ hohe Bewertungen für die Kategorien „Hallo“ und „Danke“ aus. Die subjektiv wahrgenommene Dringlichkeit wurde als sehr gering eingeschätzt. Dennoch wurde die Dynamik als gut sichtbar und aufmerksamkeitslenkend eingeschätzt, was für die weiteren Untersuchungen Voraussetzung war.

5.2.3 Experiment 2

In der Hauptuntersuchung wurden, neben der Art der Dynamik, außerdem die Geschwindigkeit der Dynamik, die Betrachtungsdistanz, der Betrachtungswinkel und die Umgebungshelligkeit variiert.

5.2.3.1 Methode

Die Hauptstudie fand vom 28.06.2016 bis zum 18.07.2016 im Lichtassistenzzentrum der AUDI AG am Standort Ingolstadt statt. Die Versuchsdauer pro Proband betrug ca. 35–45 min.

5.2.3.1.1 Stichprobe

An dem Experiment nahmen insgesamt 42 Personen teil. Die Teilnehmer waren alle Mitarbeiter der AUDI AG und mit einer Ausnahme in der Lichtentwicklung tätig. Die Stichprobe setzte sich aus 33 Männern und 9 Frauen zusammen. Die Teilnehmer waren zwischen 16 und 54 Jahre alt (M = 31.10; SD = 9.13). Die Teilnehmer hatten eine normale (45.23 %) oder korrigierte Sehstärke (54.76 %). Die jährliche Fahrleistung betrug im Durschnitt 16214.29 km (SD = 12470.99) und variierte zwischen 0 km (7.14 %) und 48000 km (4.76 %). Die Mehrheit der Probanden benutzte das Auto täglich (57.14%) oder mehrmals pro Woche (23.81 %).

5.2.3.1.2 Versuchsaufbau

Der unterirdische Lichtkanal mit einer Gesamtlänge von 120 m, einer Breite von 12 m und einer Höhe von 5 m ist mattschwarz lackiert und mit einem befahrbaren, straßenähnlichen Bodenbelag ausgestattet (Strohbach & Floss, 2015). Mittels der zwei OLED-Displays wurde das Schlusslicht eines vorausfahrenden Fahrzeugs simuliert. Die leuchtenden Flächen bestanden, wie in der Vorstudie, aus jeweils 3 x 3 Segmenten in der Mitte des jeweiligen Displays und ergaben damit eine Leuchtfläche von 103.63 cm²

pro Display. Auch in diesem Versuch unterschritt die Lichtstärke niemals das gesetzliche Minimum eines Schlusslichts von 4.0 cd und überschritt in keinem Zustand das gesetzliche Maximum von 17.0 cd. Die Anordnung der beiden Displays in Höhe und Breite entsprach der Vorstudie. Die Displays standen während des Versuchs mittig vor einem Fahrzeug (Audi A5, 2016), in dem der Proband während des gesamten Versuchs auf dem Fahrersitz saß (siehe Abbildung 5.2-7). Damit konnte eine Verkehrssituation mit einem vorausfahrenden Fahrzeug nachgebildet werden. Die Studie wurde durch zwei Versuchsleiter betreut: Versuchsleiter 1 saß an einem Schreibtisch am Rand des Lichtassistenzzentrums und bediente von hier aus die Ansteuerung der beiden OLED-Displays. Versuchsleiter 2 saß auf dem Beifahrersitz des Audi A5 und übernahm die subjektive Befragung des Probanden während des Versuchs. Ein Tabletcomputer wurde für die Nebenaufgabe auf dem im Fahrzeug verbauten Navigationssystem befestigt. Um Reaktionszeiten während des Versuchs aufzuzeichnen, hielt der Proband jeweils einen Druckschalter in beiden Händen.

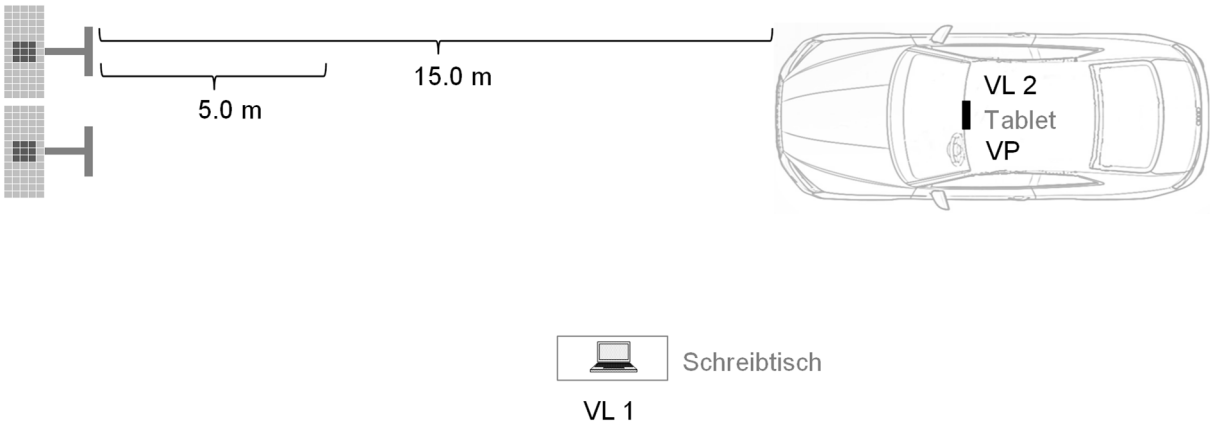

Abbildung 5.2-7. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit VL = Versuchsleiter und VP = Versuchsperson.

5.2.3.1.3 Aufgabenstellung

Der Proband sollte auf das Erscheinen einer Animation auf den beiden OLED-Displays mit einem Schalterdruck reagieren. Der Proband hatte jeweils einen Schalter in der rechten und einen Schalter in der linken Hand. Die beiden Schalter unterschieden sich in ihrer Farbe. Dem Probanden wurde im Vorfeld des Versuchs randomisiert zugewiesen, welchen Schalter er über die Dauer des gesamten Versuchs in welcher Hand halten sollte. Während des Versuchs wurde die Anordnung der Schalter nicht geändert. Der Proband wurde zu Beginn des Versuchs instruiert, auf welche der beiden Animationen er mit welchem Schalter reagieren sollte. Die Schalter waren mit einem Kabel mit dem

OLED-Display verbunden und wurden über das offene Fenster auf der Fahrerseite in das Fahrzeug geführt.

Zusätzlich wurde vom Probanden eine Nebenaufgabe bearbeitet. Dabei wurden Verkehrsmeldungen entweder visuell oder auditiv dargestellt. Bei der visuellen Nebenaufgabe las der Proband Verkehrsnachrichten vor, die mittels Teleprompter-App (dv Prompter © Datavideo) auf einem Tabletcomputer (iPad 1; Displaygröße 9.7 Zoll) in Textform (Schriftgröße: 36 pt, Schriftart: Arial; linksbündig; weiße Schrift auf schwarzem Hintergrund) abgespielt wurden. Die Geschwindigkeit des fortlaufenden Texts war auf die Stufe 1 – slow eingestellt. Die visuelle Nebenaufgabe garantierte durch die Fokussierung auf den fortlaufenden Text einen peripheren Blick zu den beiden OLED-Displays. In der auditiven Nebenaufgabe las der Versuchsleiter 2 Verkehrsnachrichten vor, die vom Probanden mündlich wiederholt werden sollten. Die auditive Nebenaufgabe erlaubte einen fokalen Blick auf die beiden OLED-Displays. Diese Aufgabe wurde durchgeführt, um eine ähnlich hohe kognitive Beanspruchung wie bei der visuellen Aufgabe hervorzurufen.

5.2.3.1.4 Studiendesign

Die Forschungsfrage wurde in einem mehrfaktoriellen Versuchsdesign mit Messwiederholung untersucht. Als unabhängige Variablen gingen dabei in einem within-subjects Design die Entfernung (5 m; 15 m), der Blickwinkel (fokal; peripher), die Art der Animation (Dynamik 1; Dynamik 2) und die Animationsgeschwindigkeit (langsam; schnell) ein. Zusätzlich wurde in einem between-subjects Design die Umgebungshelligkeit in zwei Stufen (dunkel; hell) variiert.

Die Variable „Entfernung“ wurde in zwei Stufen variiert. In der ersten Stufe „5 m“ befand sich die Spitze des Fahrzeugs mit dem Probanden in 5 m Abstand zu den beiden OLED-Displays. In der zweiten Stufe wurde der Abstand zwischen Displays und Fahrzeug auf 15 m erweitert.

Die Variable „Blickwinkel“ wurde ebenso in zwei Stufen variiert. In der ersten Stufe „fokal“ richtete der Proband seinen Blick zentral nach vorne, um die beiden Displays im zentralen Blickfeld betrachten zu können. Dabei ergab sich für die Bedingung „5 m – fokal“ ein Sehwinkel von ca. 10°[3] und für die Bedingung „15 m – fokal“ ein Sehwinkel von ca. 4°. In dieser Bedingung bearbeitete der Proband die auditive Nebenaufgabe, um den

[3] 5.0 m Abstand zwischen Fahrzeug und Display; 7.3 m Abstand zwischen Proband und Display; leuchtende Flächen des Displays insgesamt ca. 1.30 m.

Blick nicht von den Displays abwenden zu müssen. Dabei las der Versuchsleiter 2 Verkehrsnachrichten vor, die vom Probanden mündlich wiederholt werden sollten. In der zweiten Stufe „peripher“ bearbeitete der Proband hingegeben die visuelle Nebenaufgabe. Dabei las der Proband Verkehrsnachrichten vor, die mittels Teleprompter-App auf dem Tabletcomputer in Textform abgespielt wurden. Der Blickwinkel zum Tabletcomputer betrug ca. 29° (3D-Winkel im Raum).

Es gab zwei verschiedene Bewegungsabläufe der Animation, die die Art der Animation bestimmten. In der ersten Stufe „Dynamik 1“ (siehe Abbildung 5.2-8) wurde der Eindruck einer von oben nach unten laufenden Bewegung erzeugt. Um die wahrgenommene Dringlichkeit zu erhöhen, wurde ein Blinken in die Animation integriert. Die einzelnen OLED-Segmente wurden in zwei verschiedenen Dimmstufen betrieben, die im Folgenden mit „maximal“ und „minimal“ beschrieben werden. Im Ausgangszustand leuchteten alle neun OLED-Segmente auf minimaler Stufe mit einer Gesamtlichtstärke von ca. 4.0 cd. Im ersten Schritt wurden die Segmente 1, 2 und 3 auf die maximale Stufe mit einer Gesamtlichtstärke von ca. 16.9 cd gedimmt. Im zweiten Schritt wurden die Segmente 1, 2 und 3 wiederum auf minimale Stufe heruntergedimmt. Im dritten Schritt wurden die Segmente 4, 5 und 6 auf maximale Stufe gedimmt. Im vierten Schritt wurden wiederum alle Segmente auf das Minimalniveau heruntergedimmt. Im fünften Schritt wurden die Segmente 7, 8 und 9 auf die maximale Stufe hochgedimmt.

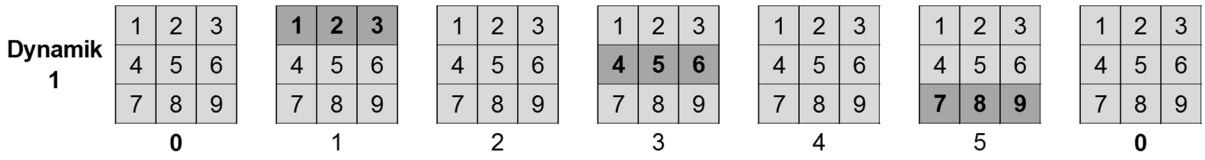

Abbildung 5.2-8. Schematische Darstellung der Dynamik 1.

Die zweite Animation „Dynamik 2“ (siehe Abbildung 5.2-9) rief die Illusion einer sich drehenden, leuchtenden Fläche hervor. Dazu wurden im ersten Schritt die Segmente 2, 3 und 6 auf die maximale Stufe gedimmt. Die Segmente 1, 4, 5, 7, 8 und 9 blieben auf dem Ausgangsniveau (minimale Stufe). Im zweiten Schritt wurden die Segmente 6, 8 und 9 auf Maximalniveau geschalten und die verbleibenden Segmente auf das Minimalniveau. Im dritten Schritt wurde jeweils die Segmente 4, 7 und 8 und im vierten Schritt die Segmente 1, 2 und 4 auf das Maximalniveau geschalten. Die restlichen OLED Segmente waren jeweils auf der minimalen Stufe gedimmt.

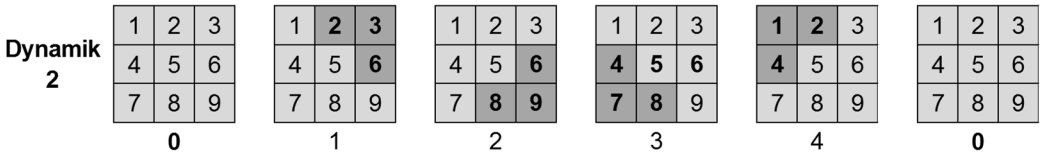

Abbildung 5.2-9. Schematische Darstellung der Dynamik 2 (linkes Display).

Beide Arten der Animation liefen parallel auf beiden Displays. Für die Animation „Dynamik 2“ wurde die Bewegung auf dem rechten Display vertikal gespiegelt dargestellt.

Die Variable „Animationsgeschwindigkeit“ wurde ebenfalls in zwei Stufen variiert. In der ersten Stufe „langsam“ wurde die Animation „Dynamik 1“ im Takt 0.20 s – 0.10 s – 0.20 s – 0.10 s – 0.20 s geschalten. In der schnellen Bedingung hingegen im Takt 0.12 s – 0.06 s – 0.12 s – 0.06 s – 0.12 s. Die Animation „Dynamik 2“ wurde in der langsamen Bedingung in einem Takt von jeweils 0.20 s geschalten und in der schnellen Bedingung in einem Takt von jeweils 0.12 s. Damit ergab sich für die langsame Bedingung eine Gesamtdauer der jeweiligen Animation von 0.80 s und für die schnelle Bedingung jeweils eine Gesamtdauer von 0.48 s. Da die Zeitintervalle der Darbietung der einzelnen Leuchtzustände jeweils größer als 0.03 s und nicht größer als 0.20 s waren, erzeugten sie eine sogenannte Scheinbewegung (siehe Hagendorf et al., 2011; Lich, 2010; Steinman, Pizlo, & Pizlo, 2000). Man spricht von einer Scheinbewegung, wenn eine optische Täuschung vorliegt, „bei der die Wahrnehmung einer kontinuierlichen Bewegung eines Objekts entsteht. Sie tritt auf, wenn zwei Lichtpunkte in einem bestimmten Abstand kurz nacheinander aufleuchten“ (Hagendorf et al., 2011, S. 88). Die beiden Animationen wurden von den Probanden als kontinuierlich und flüssig laufende Bewegung beschrieben.

Als weitere Versuchsvariable wurde die Umgebungshelligkeit zwischen den Personen variiert. Die Hälfte der Probanden führte den Versuch ohne Deckenbeleuchtung des Lichtkanals und ohne Fahrzeugbeleuchtung durch. Damit konnte eine dunkle Nacht im Freien simuliert werden. Lediglich durch die beiden OLED-Displays wurde Licht abgestrahlt. Nach dem Abspielen der Animationen wurde das Fahrzeuginnenlicht für die Dauer der subjektiven Bewertung eingeschaltet, um die Antworten notieren zu können. Bei der anderen Hälfte der Probanden wurde zusätzlich zu den OLED-Displays die Deckenbeleuchtung eingeschaltet. Die Fahrzeugaußenbeleuchtung war auch in dieser Bedingung ausgeschaltet. Es resultierte eine Beleuchtungsstärke auf der Fahrbahn von ca. 700 lx. Der Versuchsaufbau ähnelte einer Tunnelsituation. Die lichttechnischen Anforderungen an die Beleuchtung von

Tunneln werden durch verschiedene Parameter, wie der Verkehrsstärke, der Verkehrszusammensetzung und der Verkehrsführung bestimmt (Din 67524-1, 2008). Im Freien wird bei einsetzender Dämmerung im Allgemeinen eine Globalbeleuchtungsstärke von 1000 lx angenommen (Din 67524-1, 2008), was in etwa den Bedingungen der zweiten Versuchsgruppe in der helleren Umgebung des Lichtkanals entsprach.

Als abhängige Variable wurde die Reaktionszeit [s] erfasst. Des Weiteren wurden subjektive Bewertungen der wahrgenommenen Dringlichkeit, Sichtbarkeit und Aufmerksamkeitsanziehung erhoben.

Aus der Kombination der verschiedenen Bedingungen ergaben sich pro Proband acht Versuchsblöcke: 2 (Entfernung) x 2 (Blickwinkel) x 2 (Animationsgeschwindigkeit). Die Reihenfolge der Versuchsblöcke wurde über die Probanden hinweg randomisiert. In jedem Versuchsblock wurde jede Animationsart insgesamt dreimal gezeigt. Die Reihenfolge des Erscheinens der insgesamt sechs Animationen wurde ebenso randomisiert. Zwischen dem Erscheinen der Animationen wurde der Ausgangszustand 0 des Displays entweder 5.0 s, 10.0 s oder 15.0 s lang gezeigt. Die Darstellung erfolgte nach dem Zufallsprinzip. Die beiden Displays leuchteten während eines Versuchsblocks zu jedem Zeitpunkt innerhalb der gesetzlich notwendigen Lichtstärke für ein Schlusslicht.

5.2.3.1.5 Versuchsablauf

Im ersten Teil des Versuchs wurde die subjektive Bedeutung der präsentierten Animationen abgefragt. Dabei wurde für beide Animationen das Ausmaß der Zustimmung auf einer 7-stufigen bipolaren Skala hinsichtlich der potenziellen Bedeutungen „Bremsung“, „Verzögerung“, „Beschleunigung“, „Stillstand“, „kritischer Abstand“, „Danke“ und „Hallo“ abgefragt.

Im zweiten Teil des Versuchs wurden in acht Versuchsblöcken die Reaktionen auf das Erscheinen der Animationen aufgezeichnet. Dabei wurden die Reaktionszeiten mithilfe der Druckschalter erfasst. Nach jedem Versuchsblock (Präsentation von sechs Animationen) wurde die subjektive Sichtbarkeit, Dringlichkeit und Aufmerksamkeitsanziehung erfragt (siehe Kapitel 5.2.2). Die Items wurden auf dem Tabletcomputer präsentiert und von Versuchsleiter 2 notiert. Zu Beginn des zweiten Versuchsteils wurde jeweils ein Übungsblock mit der visuellen und auditiven Nebenaufgabe absolviert.

Zum Abschluss füllte der Proband einen kurzen demographischen Fragebogen aus.

5.2.3.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden sowie die Ergebnisse der Auswertung der subjektiven und objektiven Daten dargestellt.

5.2.3.2.1 Bedeutungsbewertung

Die Ergebnisse der Bedeutungsbewertung der beiden präsentierten Animationen ist in Abbildung 5.2-10 dargestellt. Dabei gingen die Bewertungen teils sehr stark auseinander. Dynamik 1 wurde nicht mit Bedeutungen wie „Beschleunigung“, „Danke“ oder „Hallo“ assoziiert. Für die Begriffe „Bremsung“, „Verzögerung“ und „kritischer Abstand“ fand sich hingegen teilweise Zustimmung. Die Bewertung der zweiten Dynamik fiel differenzierter aus. Hier konnte für keine der Bedeutungen eine deutliche Zu- oder Ablehnung festgestellt werden. Hier wurden im Gegensatz zu Dynamik 1 die Bedeutungen „Bremsung“, „Verzögerung“ und „kritischer Abstand“ eher abgelehnt und dafür fanden die Begriffe „Danke“ und Hallo“ wiederum teilweise Zustimmung.

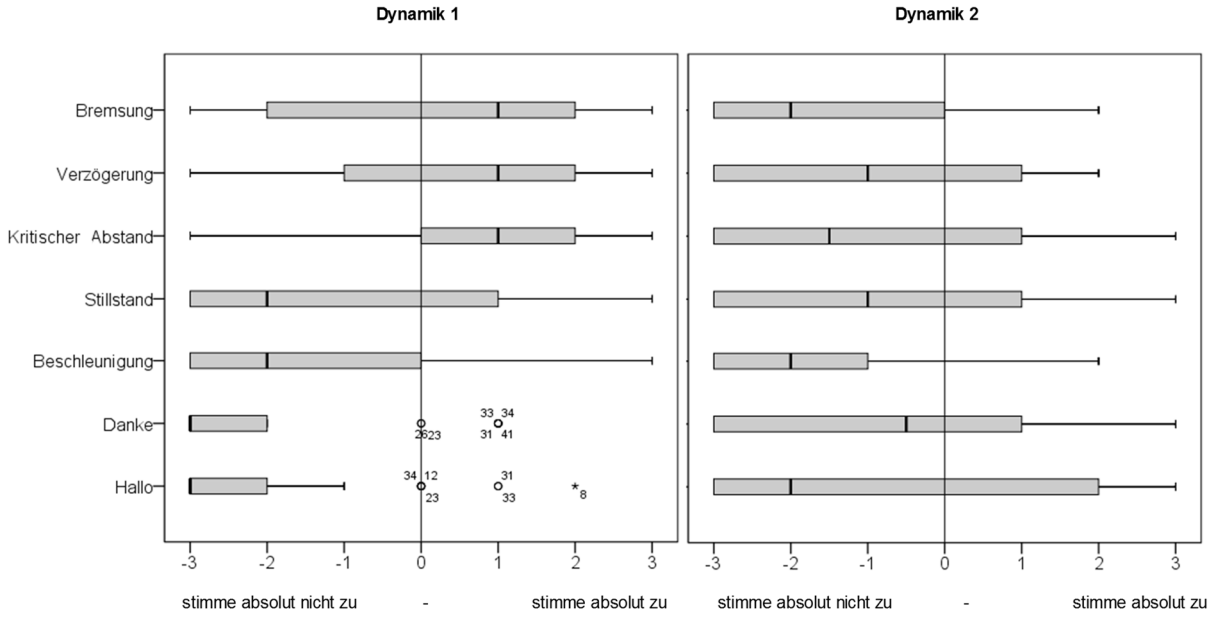

Abbildung 5.2-10. Boxplots der subjektiven Bedeutung. *N* = 42.

5.2.3.2.2 Analyse der subjektiven Bewertung und der Reaktionszeiten

Bei der subjektiven Bewertung wurde eine erhöhte Dringlichkeit bei geringerer Entfernung, einem fokalen Blickwinkel, Dynamik 1 und einer schnelleren Darbietung wahrgenommen (siehe Abbildung 5.2-11).

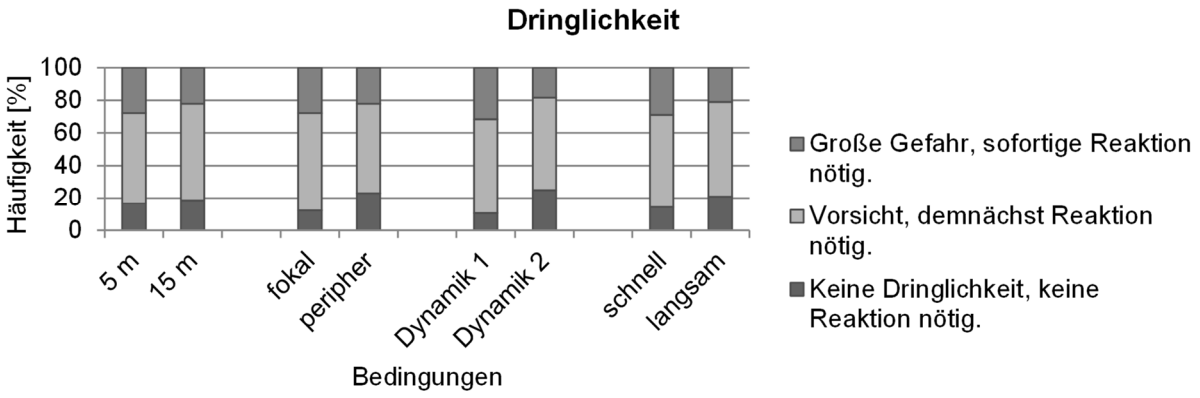

Abbildung 5.2-11. Relative Häufigkeiten [%] für die subjektive Bewertung der Dringlichkeit. *N* = 42.

Ebenfalls wurde eine etwas bessere Sichtbarkeit bei geringerer Entfernung, einem fokalen Blickwinkel, Dynamik 1 und einer schnelleren Darbietung angegeben (siehe Abbildung 5.2-12).

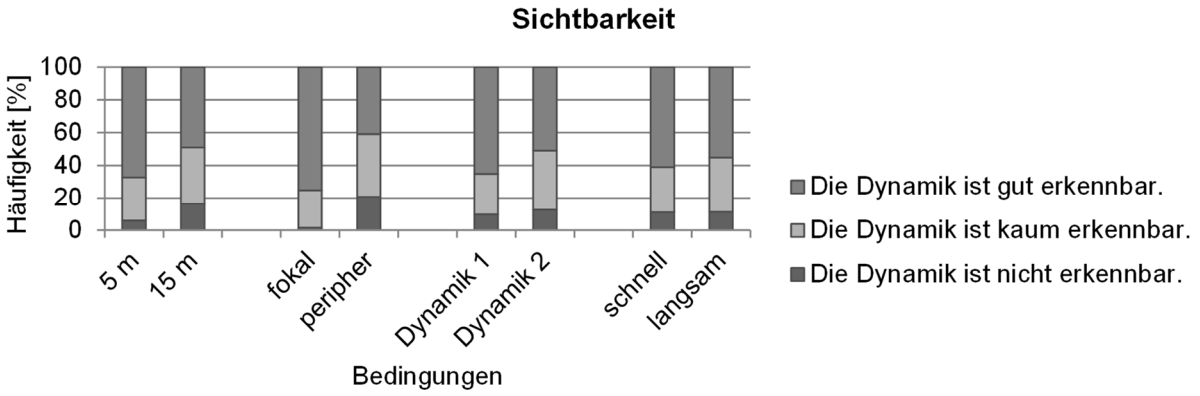

Abbildung 5.2-12. Relative Häufigkeiten [%] für die subjektive Bewertung der Sichtbarkeit. *N* = 42.

Ein ähnliches Muster ergab sich für die subjektive Bewertung der Aufmerksamkeitsanziehung (siehe Abbildung 5.2-13).

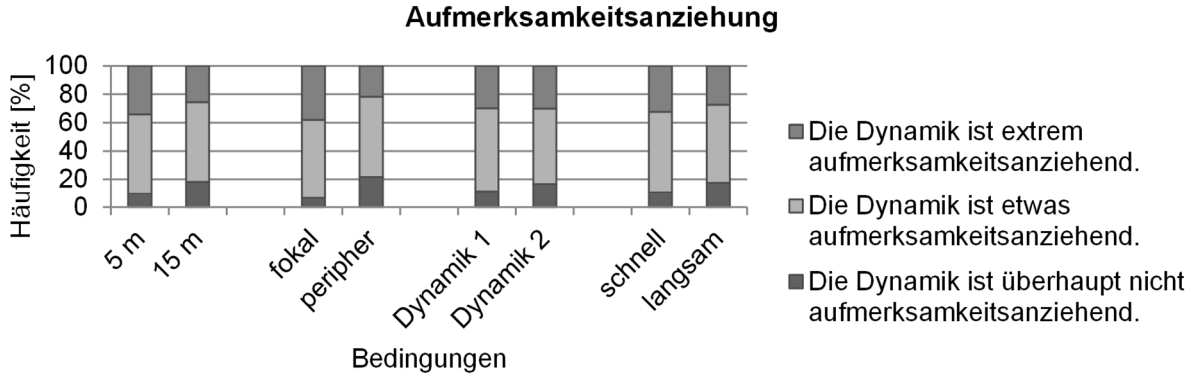

Abbildung 5.2-13. Relative Häufigkeiten [%] für die subjektive Bewertung der Aufmerksamkeitsanziehung. *N* = 42.

Im nächsten Schritt wurden die objektiven Reaktionen (Schalterdruck) betrachtet. Die Reaktionen ließen sich grob in Hit (korrekte Reaktion auf Animation), False (falsche Reaktion auf Animation) und Miss (keine Reaktion auf Animation) unterteilen. Über alle 2016 Bedingungen (42 Probanden, 16 Bedingungen, jeweils 3 Durchgänge) wurden im Durchschnitt 6.70 % der Animationen nicht wahrgenommen („verpasst“). Eine Übersicht über die prozentuale Verteilung der Treffer und Verpasser pro Bedingung (Mittelwert aus drei Darbietungen) ist in Tabelle 5.2-4 dargestellt. Dabei war der prozentuale Anteil der verpassten Sequenzen für die niedrigere Entfernung, den fokalen Blickwinkel, Dynamik 1, die langsamere Animationsgeschwindigkeit und die dunkle Umgebungsbedingung jeweils geringer.

Tabelle 5.2-4. Relative Häufigkeiten [%] der Reaktionen aufgeteilt nach Hits, Falses und Misses. *N* = 42.

	Hit	False	Miss
Entfernung			
5 m	92.86 %	5.56 %	1.59 %
	▼	▼	▲
15 m	83.63 %	4.56 %	11.81 %
Blickwinkel			
fokal	95.44 %	4.17 %	0.40 %
	▼	▲	▲
peripher	81.05 %	5.95 %	13.00 %
Art der Dynamik			
Dynamik 1	88.79 %	6.35 %	4.86 %
	▼	▼	▲
Dynamik 2	87.70 %	3.77 %	8.53 %
Animationsgeschwindigkeit			
schnell	88.29 %	4.86 %	6.85 %
	▼	▲	▼
langsam	88.19 %	5.26 %	6.55 %
Umgebungshelligkeit			
dunkel	89.09 %	6.25 %	4.66 %
	▼	▼	▲
hell	87.40 %	3.87 %	8.73 %

Die schnellste Reaktion des Versuchs mit 0.55 s wurde in den Bedingungen 15 m – fokal – Dynamik 1 – schnell und 15 m – fokal – Dynamik 2 – schnell erreicht. Im Mittel wurde ein Minimalwert von 0.75 s über alle Versuchsbedingungen erreicht. Die maximale Reaktionszeit des Versuchs mit 3.69 s wurde in der Bedingung 15 m – peripher – Dynamik 1 – langsam erreicht. Im Durchschnitt wurde ein Maximalwert von 2.45 s über alle Versuchsbedingungen erreicht. Es wurden keine Ausreiser aus der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Die Betrachtung der Mittelwerte und der 95%-Konfidenzintervalle (siehe Tabelle 5.2-5) zeigte, dass eine niedrigere Entfernung, ein fokaler Blickwinkel, Dynamik 1, eine schnellere Animationsgeschwindigkeit und eine dunkle Umgebungsbedingung im Durchschnitt zu kürzeren Reaktionszeiten führten.

Tabelle 5.2-5. Mittelwerte, Standardfehler und 95%-Konfidenzintervalle der Reaktionszeiten [s]. *N* = 42.

	Mittelwert	Standardfehler	95%-Konfidenzintervall	
			Untergrenze	Obergrenze
Entfernung				
5 m	1.26	0.03	1.20	1.33
	▲	▲	▲	▲
15 m	1.41	0.04	1.32	1.50
Blickwinkel				
fokal	1.01	0.03	0.95	1.07
	▲	▲	▲	▲
peripher	1.66	0.05	1.56	1.76
Art der Dynamik				
Dynamik 1	1.31	0.04	1.23	1.38
	▲	▲	▲	▲
Dynamik 2	1.36	0.03	1.29	1.43
Animationsgeschwindigkeit				
schnell	1.30	0.04	1.22	1.39
	▲	▼	▲	▲
langsam	1.36	0.03	1.29	1.43
Umgebungshelligkeit				
dunkel	1.32	0.05	1.23	1.42
	▲	▲	▲	▲
hell	1.34	0.05	1.24	1.45

Zur Überprüfung der Hypothesen wurde eine mehrfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung berechnet. Dabei gingen jeweils die Mittelwerte aller Reaktionszeiten (Hit und False) in die Analyse mit ein. In 12 Fällen konnte der Proband keine der drei Darbietungen einer Animation pro Bedingung wahrnehmen. Insgesamt fünf Probanden mussten dadurch von der Analyse ausgeschlossen werden und es ergab sich eine Stichprobengröße von $N = 37$ (Umgebungshelligkeit: dunkel $N = 20$; hell: $N = 17$). Die Varianzanalyse enthielt insgesamt vier Faktoren: Entfernung (zwei Stufen: 5 m; 15 m), Blickwinkel (zwei Stufen: fokal; peripher) und Art der Dynamik (2 Stufen: Dynamik 1; Dynamik 2). Die Umgebungshelligkeit (zwei Stufen: dunkel; hell) ging als Zwischensubjektfaktor in die Analyse mit ein. Jeder Proband durchlief die Bedingung Entfernung, Blickwinkel, Art der Dynamik und Animationsgeschwindigkeit. Die Umgebungshelligkeit wurde zwischen den Probanden variiert. Damit ergab sich ein mixed-factor Design.

Es ergab sich ein signifikanter Einfluss der Entfernung auf die Reaktionszeit ($F(1, 35) = 21.82$, $p = .000$, $\eta_p^2 = .38$). Es wurde 38 % der Variation der Reaktionszeit

durch die Entfernung aufgeklärt. Es ergab sich außerdem ein signifikanter Haupteffekt des Blickwinkels ($F(1, 35) = 291.51$, $p = .000$, $\eta_p^2 = .89$). Der Blickwinkel nahm somit signifikant Einfluss auf die Reaktionszeit. Es wurde 89 % der Variation der Reaktionszeit durch den Blickwinkel aufgeklärt. Ebenso wies die Art der Dynamik einen signifikanten Einfluss auf die Reaktionszeit auf ($F(1, 35) = 5.37$, $p = .026$, $\eta_p^2 = .13$). Es wurde 13 % der Variation der Reaktionszeiten durch die Art der Dynamik aufgeklärt. Auch durch die Animationsgeschwindigkeit wurde ein signifikanter Haupteffekt festgestellt ($F(1, 35) = 4.82$, $p = .035$, $\eta_p^2 = .12$). Es wurde 12 % der Varianz der Reaktionszeit durch die Animationsgeschwindigkeit aufgeklärt. Es wurden signifikante Interaktionseffekte zwischen der Umgebung und dem Blickwinkel ($F(1, 35) = 8.10$, $p = .007$, $\eta_p^2 = .19$) sowie zwischen dem Blickwinkel und der Entfernung ($F(1, 35) = 10.78$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .24$) auf die Reaktionszeiten festgestellt. Durch den Zwischensubjektfaktor Umgebungshelligkeit konnte kein signifikanter Haupteffekt festgestellt werden ($F(1, 35) = 0.06$, $p = .805$, $\eta_p^2 = .00$). Abbildung 5.2-14 stellt die gefundene Effekte grafisch dar. Hierbei wurde deutlich, dass die Reaktion bei 5 m etwas schneller erfolgte, als bei 15 m. Dabei wurde auf die Dynamik 1 jeweils schneller reagiert, als auf die Dynamik 2. Die Zunahme der Reaktionszeiten von 5 m auf 15 m galt für beide Animationen. In den peripheren Bedingungen reagierten die Probanden signifikant langsamer, als in den fokalen Bedingungen. Dabei wurde auf die Dynamik 1 jeweils schneller reagiert, als auf die Dynamik 2. Die Steigerung der Reaktionszeiten von fokal auf peripher galt für beide Animationen. Die Reaktion auf die schneller abgespielte Animation erfolgte etwas schneller, als die Reaktion auf die langsamere Animation. Dabei wurde auf die Dynamik 1 jeweils schneller reagiert, als auf die Dynamik 2. Die Zunahme der Reaktionszeiten von schnell auf langsam galt für beide Animationen. In der dunklen Umgebungsbedingung wurde minimal schneller auf die Animationen reagiert, als in der hellen. Der Effekt war jedoch nicht signifikant. Dabei wurde auf die Dynamik 1 jeweils schneller reagiert, als auf Dynamik 2. Die minimale Steigerung der Reaktionszeiten von schnell auf langsam galt für beide Animationen.

Die Umgebungshelligkeit ergab in Interaktion mit dem Blickwinkel signifikante Ergebnisse: In der fokalen Bedingung erfolgte in der hellen Umgebungsbedingung die Reaktion etwas schneller, als in der dunklen Umgebung. In der peripheren Bedingung erfolgte hingegen in der dunklen Umgebungsbedingung die schnellere Reaktion. Der Unterschied zwischen dunkler und heller Umgebung fiel in der peripheren Umgebung größer aus.

Der Blickwinkel spielte auch im Zusammenspiel mit der Entfernung eine wichtige Rolle. So zeigte sich im Experiment, dass unter peripheren Bedingungen eine Reaktion im Abstand von 5 m deutlich schneller erfolgen konnte, als im Abstand von 15 m. Unter fokalen Bedingungen konnte unter beiden Entfernungsbedingungen etwa gleich schnell auf die Animation reagiert werden.

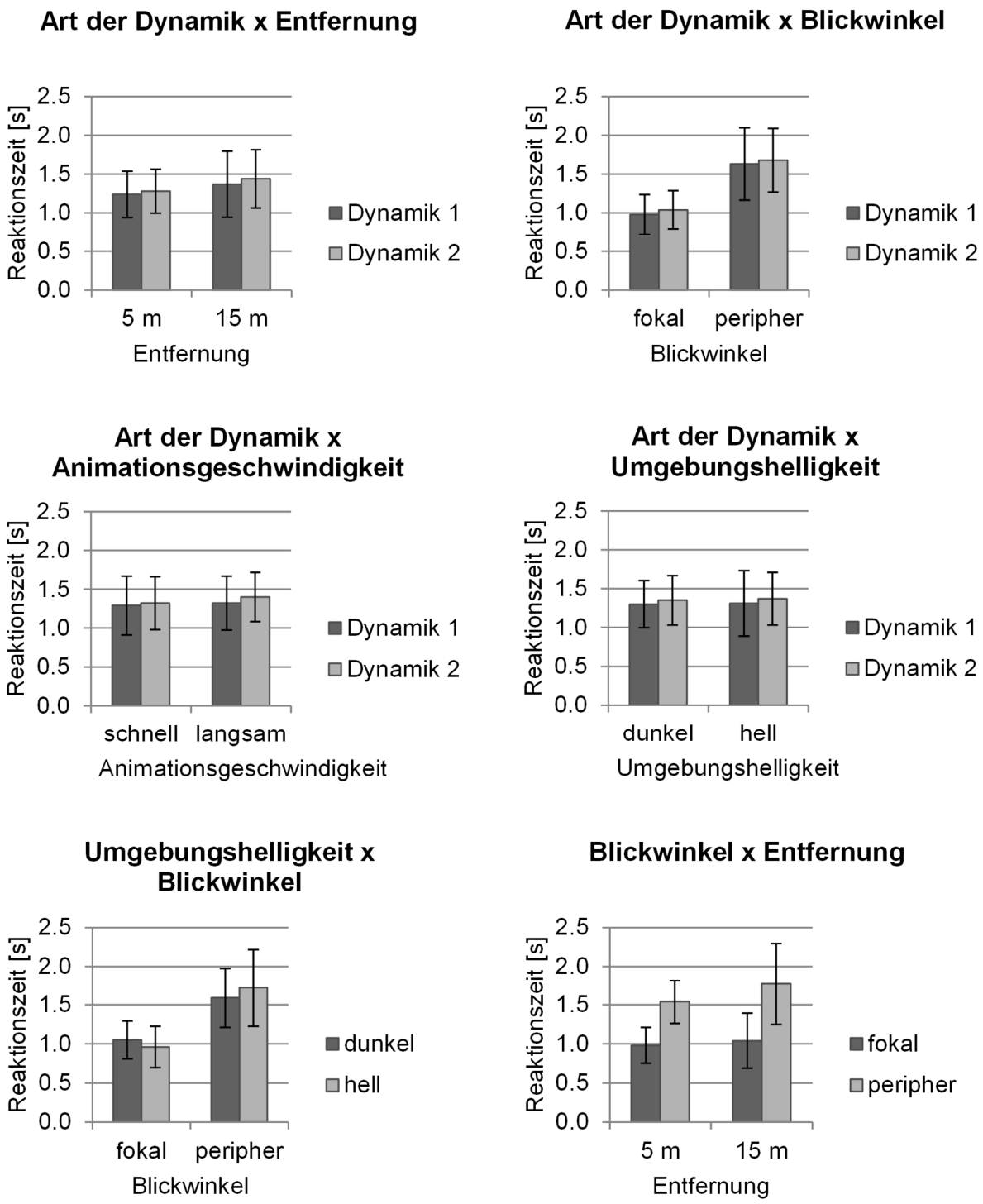

Abbildung 5.2-14. Mittelwerte der Reaktionszeiten [s] mit Fehlerindikatoren (Standardabweichungen) aufgeteilt nach Versuchsbedingungen. *N* = 37.

5.2.3.3 Diskussion

Sowohl die subjektiven als auch objektiven Messungen wiesen darauf hin, dass die Wirkung der untersuchten Animationen von verschiedenen Faktoren abhing. Es zeigte sich, dass unter besseren Sichtbedingungen, wie einer kürzeren Entfernung (Hypothese 1) und einem fokalen Blickwinkel (Hypothese 2), die Reaktionszeiten verkürzt werden konnte. Lediglich die Umgebungshelligkeit zeigte keinen signifikanten Einfluss, wobei die Tendenz ebenfalls zu Gunsten der besseren Sichtbarkeit der Animation ausfiel (Hypothese 5). Zusätzlich wurden die Reaktionszeiten durch die Parameter der Animation beeinflusst. So wurden kürzere Reaktionszeiten bei Dynamik 1 (Hypothese 3) und einer schnelleren Animationsgeschwindigkeit (Hypothese 4) erreicht. Diese Animationsbedingungen wurden jeweils als besser sichtbar, dringlicher und aufmerksamkeitsanziehender bewertet. Der Blickwinkel interagierte außerdem mit der Umgebungshelligkeit und der Entfernung. Da in der peripheren Bedingung weniger Licht des OLED-Displays auf das Auge fiel, scheint die Umgebungsbedingung hier von Bedeutung gewesen zu sein. Befand sich der Proband in einem dunklen Raum, fiel es ihm leichter das Licht der Animation aus den Augenwinkeln wahrzunehmen. In der fokalen Bedingung schien dies keine Rolle zu spielen, da die Animation durch den besseren Blickwinkel unter beiden Umgebungsbedingungen gut zu erkennen und hoch salient war. Auch im Zusammenhang mit der Entfernung schien der Anteil des Lichts, das auf das Auge fällt eine entscheidende Rolle für die Reaktionsgeschwindigkeit zu spielen. In der peripheren Bedingung wurde es dem Probanden erschwert, das Display wahrzunehmen. Wurde zusätzlich die Entfernung vergrößert, bedeutete dies, dass noch weniger Licht beim Probanden ankommen konnte. Dies zeigte sich in den verlängerten Reaktionszeiten. In den fokalen Bedingungen war das Display gut sichtbar, so dass die Distanzveränderung deutlich kleinere Auswirkungen auf die Reaktionszeit bewirkte.

5.2.4 Allgemeine Diskussion

In einer Vor- und einer Hauptuntersuchung wurde mithilfe zweier OLED-Displays das Schlusslicht eines Fahrzeugs simuliert. Dabei wurden verschiedene Animationen in Form einer sequentiellen Helligkeitsänderung des Schlusslichts, innerhalb der gesetzlich vorgegebenen Lichtstärken, präsentiert und von den Probanden subjektiv hinsichtlich Bedeutung und Wirkung bewertet. In der Hauptuntersuchung wurden zusätzlich

Entfernung, Blickwinkel und Animationsgeschwindigkeit variiert und Reaktionszeiten aufgezeichnet.

5.2.4.1 Anwendungskontext

Die Animationen waren unter allen untersuchten Bedingungen für die Probanden gut sichtbar und wurden nur selten gar nicht oder zu spät wahrgenommen. Dies deutet daraufhin, dass eine wahrgenommene Bewegung in einem Schlusslicht potenziell dazu geeignet ist, die Aufmerksamkeit auf ein vorausfahrendes Fahrzeug zu lenken und eine Reaktion hervorzurufen. Dabei war die Reaktion auf eine Animation im Schlusslicht von der Entfernung zur Heckleuchte und vom Blickwinkel auf die Heckleuchte abhängig. Außerdem zeigten sich Unterschiede in der Reaktionszeit in Abhängigkeit der Art der Animation und der Geschwindigkeit der Animation. Dieselben Muster konnten in der subjektiven Befragung zur Sichtbarkeit, Dringlichkeit und Aufmerksamkeitslenkung festgestellt werden. So wurden schnellere Reaktionen hervorgerufen, wenn die dargestellte Animation als besser sichtbar, als dringlicher und als aufmerksamkeitslenkender wahrgenommen wurde. Sowohl die subjektiven als auch die objektiven Reaktionen wurden durch die Entfernung, den Blickwinkel, die Art der Animation und die Animationsgeschwindigkeit beeinflusst. Diese Faktoren sind somit potenziell in der Lage, die Reaktionen eines Hinterherfahrenden zu beeinflussen. Die Animationen gingen damit über eine einfache Signalgebung, wie die des Bremslichts oder des Fahrtrichtungsanzeigers hinaus. Vielmehr zeigte diese Studie das Potenzial von Animationen auf, als intuitive Sprache im Verkehrsraum angewendet zu werden.

5.2.4.2 Einschränkungen

Die teilweise weit auseinandergehenden subjektiven Bedeutungsinterpretationen wiesen allerdings darauf hin, dass es noch weiterer Forschung bedarf, um mittels dynamischen Schlusslichtfunktionen eindeutig und intuitiv kommunizieren zu können. In dieser Studie konnte außerdem nur eine beschränkte Anzahl an Variablen untersucht werden. So bleibt unklar, inwiefern die Animationen auch in größeren Entfernungen erkennbar und wirkungsvoll sind. Auch steht eine Anwendung in einem echten Verkehrsgeschehen mit weiteren Verkehrsteilnehmern und deren zusätzlichen Lichtquellen aus. Die Umgebungshelligkeit konnte unter den gegebenen, recht geringen Beleuchtungsstärken die Reaktionszeit nur wenig beeinflussen. Bei Tageslichtbedingungen könnten die Animationen in einem Schlusslicht allerdings deutlich schwerer wahrgenommen werden. Auch dies bleibt zu überprüfen. Der Blick des Probanden lag in dieser Studie in der

peripheren Bedingung auf einem Navigationssystem. Es bleibt zu untersuchen, inwiefern die Animationen bei einem Blick aus dem Fenster wahrgenommen würden, was beispielsweise in einer Kreuzungs- oder Abbiegesituation auftreten kann. Des Weiteren sollte die Versuchsanordnung in dynamische und teildynamische Situationen übertragen werden, in denen sich das vorausfahrende Fahrzeug und oder der Fahrer selbst bewegen.

Die Studie untersuchte welche Faktoren einen Einfluss auf die subjektive und objektive Reaktion auf eine Animation in einem simulierten Schlusslicht haben. Inwiefern eine Bewegung grundsätzlich dazu geeignet ist, Aufmerksamkeit zu lenken, wurde nicht untersucht. Hierzu wäre eine Kontrollbedingung notwendig, in der eine Lichtveränderung im Schlusslicht ohne Bewegung stattfände. Allerdings ließen sich in diesem Fall nicht alle Variablen (wie die Animationsgeschwindigkeit) über alle Bedingungen variieren. Außerdem ist es fraglich, ob die Ergänzung des Versuchs, durch die Bedingung mit einer Lichtveränderung ohne Bewegung, überhaupt umsetzbar wäre, da für die Wahrnehmung des Auftretens eines neuen Ereignisses so wie für die Bewegungswahrnehmung die sogenannten instationären Zellen verantwortlich sind (Ansorge & Leder, 2011). So stellt nach Ansorge und Leder (2011) „[d]as plötzliche Auftreten eines neuen Objekts eine Form visueller Bewegung dar […]“ (S. 94). Das vorliegende Experiment konnte jedoch zeigen, dass verschiedene Bewegungsmuster unterschiedliche Reaktionen hervorrufen können.

Die Bewegung im Schlusslicht führte nicht nur unter fokalen Bedingungen zu einer gewollten Reaktion, sondern konnte auch im peripheren Sichtfeld die Aufmerksamkeit gezielt auf das Schlusslicht lenken. Im Gegensatz zu fovealen Reizen, lassen sich periphere Hinweisreize jedoch nicht ignorieren (Ansorge & Leder, 2011). Der Blick auf das vorausfahrende Fahrzeug könnte somit unwillkürlich gesteuert werden. Im Falle eines drohenden Auffahrunfalls wäre diese schnelle Zuwendung zum Gefährdungsobjekt wünschenswert und könnte die Situation durch eine angemessene Reaktion des Fahrers entschärfen. Geht die Gefahr jedoch nicht vom vorausfahrenden Fahrzeug, sondern durch eine andere Situation aus, wäre es unter Umständen fatal, wenn der Fahrer, unabhängig von der jeweiligen Situation, seine Aufmerksamkeit zwangsläufig auf die Heckleuchte richten würde. Die Dynamik würde in diesem Fall ablenkend wirken. Die Möglichkeit der Aufmerksamkeitssteuerung durch eine Schlusslichtdynamik sollte somit für eine konkrete Anwendung im Straßenverkehr kritisch geprüft werden, um eine Erhöhung der Verkehrssicherheit gewährleisten zu können.

5.2.4.3 Fortsetzung des Ansatzes

Im Zuge einer Weiterführung des Ansatzes lässt sich diese Aufgabenstellung auf ähnliche Konzepte übertragen. So wäre eine Anwendung der Signalentdeckungstheorie für die Fragestellung denkbar. Wie in dem vorliegenden Experiment wird dabei von einem „zweistufigen Urteilsprozess aus[gegangen]: einem rein sensorischen Prozess und einem Entscheidungsprozess“ (Hagendorf et al., 2011, S. 46). Dabei werden die Reaktionen in einem Vierfelderschema erfasst: Treffer, Auslassung, Falscher Alarm, Richtige Zurückweisung (Hagendorf et al., 2011). In dieser Studie können als Treffer diejenigen Reaktionen gewertet werden, in denen der richtige Tastendruck auf eine bestimmte Dynamik ausgelöst wird. Eine Auslassung wäre eine fehlende Reaktion in Form eines Tastendrucks auf eine dargebotene Dynamik. Als falscher Alarm könnte ein falscher Tastendruck auf eine Dynamik bzw. ein Tastendruck ohne Darbietung einer Dynamik gewertet werden. Allerdings könnte mit dem vorliegenden Versuchsaufbau eine richtige Zurückweisung nicht systematisch gezählt werden. Dazu müsste eine Darbietung ohne Reiz (das sogenannte Rauschen) erfolgen (Hagendorf et al., 2011).

In Entscheidungssituationen erhält das Konzept des Nudging immer größere Bedeutung. Dabei wird untersucht, inwiefern Entscheidungen durch einen „kleinen Schubs […] – einen Nudge“ (Thaler & Sunstein, 2011, S. 13) beeinflusst werden können. Beispiele finden sich hierbei unter anderem in der Privatwirtschaft, in der Politik und der Gesetzgebung (Thaler & Sunstein, 2011). Im Bereich Verkehr finden Nudges Beispielsweise bei der Einführung von Mautgebühren über eine Versuchsperiode ihren Einsatz (Eliasson, 2014). So wird beschrieben, dass „[d]ie versuchsweise Einführung von Maßnahmen […] Blockaden vermeiden [kann], indem sie den Betroffenen einen Freiraum [eröffnet, die neuen Bedingungen zu testen“ (Eliasson, 2014, S. 22). Auch eine Schlusslichtdynamik kann als solcher Nudge aufgefasst werden, da sie lediglich auf die aktuelle Fahrsituation hinweist und eine Reaktion darauf ermöglicht, jedoch nicht erzwingt.

Das vorliegende Experiment lässt sich außerdem im Licht des Spatial-Cueing-Paradigmas von Posner (1980) betrachten. Posner zeigte, wie sich mittels kurzzeitiger Luminanzänderung an einem bestimmten Ort auf ein dort später erscheinendes Symbol hingewiesen werden kann (Müsseler & Rieger, 2017). Durch diesen Hinweisreiz am angezeigten Ort können die Reaktionszeiten verkürzt werden, im Vergleich zu einem invaliden Cue, der an einem nichtindizierten Ort erscheint (Müsseler & Rieger, 2017). Da die hier untersuchten Schlusslichtdynamiken in der Heckleuchte erschienen, könnte die

Lichtveränderung als Cue für ein mögliches später erscheinendes Bremslicht verwendet werden. So könnte bei einem kritischen Abstand die visuelle Aufmerksamkeit rechtzeitig gezielt auf das Heck des vorausfahrenden Fahrzeugs, mittels eines ortsbezogenen Hinweisreizes (Spatial Cue) gelenkt werden.

In diesem Kapitel wurde das vielversprechende Potenzial von dynamischen Funktionen im Schlusslicht zur gezielten Aufmerksamkeitssteuerung im Straßenverkehr untersucht. Diese Untersuchung bildete den Abschluss einer Reihe von verkehrspsychologischen und psychophysikalischen Experimenten, die sich mit den Anforderungen an zukünftige Heckleuchten im Hinblick auf die Erhöhung der Verkehrssicherheit beschäftigten. Im Folgenden werden die Erkenntnisse gesamtheitlich diskutiert.

6 Implikationen und Schlussfolgerungen

Der Mensch erfasst seine Umwelt mithilfe seiner Sinnessysteme. Das visuelle System ist dabei von zentraler Bedeutung für das Autofahren (Schlag et al., 2009). Licht macht die physikalische Welt sichtbar und liefert uns dadurch wichtige visuelle Informationen über unsere Umgebung. Beim Fahren werden die meisten verkehrsrelevanten Informationen über das Auge aufgenommen (Hills, 1980; Schlag et al., 2009; Vollrath & Krems, 2011; Woelk et al., 1988). Heckleuchten erfüllen dabei zwei zentrale Funktionen: Zum einen wird die Sichtbarkeit des Fahrzeugs bei Dunkelheit und schlechter Sicht für andere Verkehrsteilnehmer erhöht. Das Schlusslicht übermittelt Informationen über die Anwesenheit eines Fahrzeugs, über den Fahrzeugtyp und über die Fahrzeugbreite. Diese Informationen sind notwendig, um während der Fahrt einen angemessenen Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug einschätzen und einhalten zu können. Die zweite zentrale Funktion von Heckleuchten ist die Kommunikation mit dem rückwärtigen Verkehr. Mithilfe von Lichtsignalen der Bremsleuchte und des Fahrtrichtungsanzeigers wird die Aufmerksamkeit gezielt auf das vorausfahrende Fahrzeug gelenkt und es werden weitere Informationen an andere Verkehrsteilnehmer übertragen. So werden Verzögerungen in Längsrichtung, Fahrtrichtungsänderungen und Hinweise auf eine mögliche Gefahrenquelle durch die Heckleuchte kommuniziert. Für alle Lichtfunktionen gilt, dass die ausgesendeten Signale in jeder Situation gut wahrnehmbar und intuitiv verständlich sein müssen.

6.1 Zusammenfassung der Befunde

Zur Ermittlung sicherheitsrelevanter Anforderungen an Heckleuchten wurde eine Unfallanalyse (siehe Kapitel 3.2) durchgeführt. Wenn ein Fahrzeug auf ein vorderes Fahrzeug auffährt, welches vorausfährt, wartet, anfährt, anhält, oder im ruhenden Verkehr steht, spricht man von einem Auffahrunfall. Der Unfall ist nicht mehr zu vermeiden, wenn das hintere Fahrzeug keine angemessene Handlung ausführen kann, um den Aufprall zu verhindern (Nekovee & Bie, 2013). Dabei gehören Auffahrunfälle zu den häufigsten Unfallarten und verursachen Personen- und Sachschäden sowie Verkehrsbehinderungen. In der vorliegenden Arbeit wurde eine Analyse eines Datenabzugs von Dezember 2014 der GIDAS-Datenbank durchgeführt und die Ergebnisse mit Erkenntnissen aus der Literatur verglichen und ergänzt. Fahrzeugtechnische Mängel, Witterungseinflüsse oder ungünstige Straßenverhältnisse gelten dabei nur selten als Unfallursache. Die Hauptunfallursachen liegen vielmehr in

Geschwindigkeits- und Abstandsverstößen und sogenannten anderen Fehlern des Fahrzeugführers. Um die Anzahl von Auffahrunfällen zu reduzieren, bieten sich Interventionen im Bereich der Abstands- und Geschwindigkeitsbeeinflussung sowie der gezielten Aufmerksamkeitslenkung des Fahrers auf ein vorderes Fahrzeug an. In der vorliegenden Arbeit wurde zunächst der Einfluss von Heckleuchten auf die Entfernungsschätzung und damit auf das Abstandsverhalten untersucht. Zusätzlich wurde analysiert, inwieweit neue Lichtfunktionen die Aufmerksamkeit eines Fahrers lenken und damit gezielt Reaktionen hervorrufen können.

Das Schlusslicht dient dazu, ein Fahrzeug bei Dunkelheit oder schlechten Witterungsbedingungen für den rückwärtigen Verkehr gut erkennbar werden zu lassen. Um unfallfrei einem anderen Fahrzeug folgen zu können, muss kontinuierlich der Abstand zu diesem geschätzt werden. Dabei werden vertraute Attribute einer Leuchte, wie die Größe, Position und Helligkeit automatisch zur Entfernungsschätzung herangezogen (Castro et al., 2005; Cavallo et al., 2001). Der Einfluss der Position von Heckleuchten auf die wahrgenommene Entfernung wurde bereits nachgewiesen (Buchner et al., 2006; Cavallo et al., 2001). Auch ein Effekt der relativen Helligkeit einer Leuchte auf die Entfernungsschätzung wird angenommen (Castro et al., 2005). Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich daher in Kapitel 4.1 mit der Frage, inwiefern eine kontinuierliche Anpassung der Helligkeit an den Abstand des hinteren Fahrers dessen Distanzeinschätzung beeinflussen kann. Es zeigte sich, dass die Güte der Entfernungsschätzung in Abhängigkeit der zu schätzenden Entfernung und der Verfügbarkeit von Distance-Cues (Tiefeninformationen) variiert. Eine Variation der Lichtstärke konnte unter den gegebenen Versuchsbedingungen jedoch keinen Einfluss auf die wahrgenommene Entfernung zur Leuchte ausüben. Andere Attribute, wie die Höhe der Leuchten und die Distanz zwischen rechter und linker Heckleuchte, scheinen dabei ausreichende bzw. bedeutsamere Informationen zur Entfernungsschätzung zu liefern. Damit ergibt sich die Möglichkeit, die Helligkeit eines Schlusslichts an den Abstand zu einem hinterherfahrenden Fahrzeug anzupassen, ohne die Entfernungsschätzung des hinteren Fahrers negativ zu beeinflussen. Die Probanden der Studie wurden zusätzlich aufgefordert für verschiedene Entfernungen zwischen 15.0 m und 75.0 m ihren Lichtstärke-Korridor für eine optimale Helligkeit einzustellen. Es zeigte sich, dass lediglich eine Anpassung im Nahbereich gewünscht wurde. Für schlechte Sichtbedingungen könnte eine adaptive und damit variable Lichtstärke in der Schlussleuchte einen Sicherheitsgewinn durch eine verbesserte Sichtbarkeit bedeuten.

Von einer Verschlechterung der Entfernungsschätzung ist dabei aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht auszugehen.

Wie bereits beschrieben, beruhen Abstandsschätzungen im Straßenverkehr unter anderem auf der wahrgenommenen Breite eines Fahrzeughecks. Bei Dunkelheit und schlechter Sicht liefert das Schlusslicht eines Fahrzeugs die notwendigen Tiefeninformationen für den rückwärtigen Verkehr. In Kapitel 4.2 wurde der Frage nachgegangen, inwiefern die Gestaltung von Heckleuchten die wahrgenommene Größe des Hecks beeinflussen kann. Dabei wurde in zwei psychophysikalischen Experimenten untersucht, ob sich der wahrgenommene Abstand zwischen zwei Elementen verändert, wenn sie durch eine Linie verbunden werden. Dies sollte schematisch den Unterschied zwischen zwei konventionellen Heckleuchten auf der rechten und linken Seite des Fahrzeughecks und einem Fahrzeugheck mit zwei, durch ein Leuchtenband verbundenen, Heckleuchten darstellen. Es ergab sich eine bemerkenswert gute Schätzung für die Distanzen zwischen den beiden Elementen in allen Versuchsbedingungen (jeweils unter 2 % der Gesamtlänge). Die Schätzung der Entfernung zwischen zwei Fahrzeugen mithilfe des wahrgenommenen horizontalen Abstands zwischen rechter und linker Heckleuchte (bzw. dessen Veränderung in dynamischen Situationen) basiert somit auf einer gut wahrnehmbaren Tiefeninformation. Des Weiteren weisen die Ergebnisse darauf hin, dass in der Bedingung ohne Verbindungslinie, der Abstand tendenziell minimal unterschätzt und in der Bedingung mit Verbindungslinie tendenziell leicht überschätzt wurde. Dabei fiel die Schätzung für unverbundene Elemente etwas besser aus, als die Schätzung für verbundene Elemente. Auf Heckleuchten übertragen, sollte man daher von einer leichten Überschätzung des Fahrzeughecks mit einem verbundenen Leuchtenband zwischen den beiden Schlussleuchten ausgehen. Geht man in den theoretischen Überlegungen einen Schritt weiter, sollten Fahrzeuge mit dieser Heckleuchtengestaltung daher minimal näher entfernt wahrgenommen werden. Dies könnte das Abstandsverhalten eines Hinterherfahrenden tendenziell positiv beeinflussen, indem der Fahrer durch diese leichte Wahrnehmungstäuschung einen größeren Abstand einstellen sollte. Eine Überprüfung mit realen Fahrzeugen im Straßenverkehr steht allerdings noch aus.

Bis hierhin beschäftigten sich die Experimente der Arbeit mit der Erkennbarkeit von Leuchten und ihren Einfluss auf das Abstandsverhalten. Heckleuchten dienen darüber hinaus der Kommunikation, indem sie über Lichtsignale Informationen an den rückwärtigen Verkehr übermitteln können. Das plötzliche Aufleuchten eines Bremslichts

informiert über eine Verzögerung des Fahrzeugs durch Betätigung der Bremse. Das Bremslicht wird in der gleichen Farbe wie das Schlusslicht dargestellt, so dass die Differenzierung der beiden Lichtfunktionen über die Helligkeit (diese ist beim Bremslicht deutlich höher) und das nur temporäre Aufleuchten des Bremslichts geschieht. Auch mit dem Fahrtrichtungsanzeiger wird eine konkrete Information über eine anstehende Fahrtrichtungsänderung an andere Verkehrsteilnehmer übertragen. Dabei wirkt das Blinken in einer bestimmten Frequenz durch seine hohe Salienz extrem aufmerksamkeitslenkend. Ohne diese kommunikativen Lichtfunktionen wäre ein funktionierender Straßenverkehr mit mehreren Verkehrsteilnehmern kaum noch vorstellbar. In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, inwieweit der Einsatz weiterer dynamischer Lichtfunktionen einen Vorteil für den Straßenverkehr mit sich bringen könnte.

In einem ersten Schritt (siehe Kapitel 5.1) wurden die Reaktionen auf das Deaktivieren des Bremslichtes in Abhängigkeit der Art der Deaktivierung (statisch vs. teildynamisch), des Blickwinkels und der Position der Heckleuchte untersucht. Es zeigte sich, dass unter den gegebenen Umständen (die Distanz zwischen Heckleuchte und Beobachterfahrzeug betrug 2.5 m und der Untersuchungsaufbau war statisch umgesetzt) das Deaktivieren der Bremsleuchte extrem schnell und sehr zuverlässig entdeckt wurde. Dabei ergaben sich etwas längere Reaktionszeiten in der peripheren Bedingung, im Vergleich zu einer fokalen Darbietung der Lichtsignale. Ein signifikanter Unterschied zwischen einer statischen und einer teildynamischen Deaktivierung des Bremslichts konnte jedoch in keiner der Untersuchungsbedingungen festgestellt werden.

Kapitel 3.2 zeigt ein Potenzial für aufmerksamkeitssteuernde Lichtfunktionen zur Vermeidung von Auffahrunfällen auf. So könnte bei einem kritischen Abstand der Blick des Hinterherfahrenden gezielt auf das vorausfahrende oder stehende Fahrzeug gelenkt werden, indem dieses durch ein salientes Signal im Heck auf sich aufmerksam machen würde. Weiterhin ist denkbar, dass auch andere Informationen durch dynamische Lichtfunktionen im Heck übertragen werden könnten. Daher wurde im nächsten Schritt (siehe Kapitel 5.2) untersucht, wie verschiedene Dynamiken im Schlusslicht einer Heckleuchte wahrgenommen und bewertet werden. Die Untersuchung unterteilte sich in zwei Experimente. Zunächst wurden acht verschiedene Dynamiken mit unterschiedlicher Bewegungsart und -richtung dargeboten und hinsichtlich einer möglichen Bedeutung, ihrer subjektiven Wirkung, ihrer wahrgenommenen Dringlichkeit, Sichtbarkeit und Aufmerksamkeitsanziehung bewertet. Dabei zeigte sich, dass manche

Bewegungsmuster mit bestimmten Bedeutungen assoziiert wurden. Obwohl sich das Helligkeitsniveau bei allen Animationen stets im für den ECE-Raum gesetzlich vorgegebenen Korridor für Schlussleuchten bewegte und die Dauer der Animationen über alle Dynamiken hinweg gleich war, unterschieden sich die Bewertungen der verschiedenen Dynamiken hinsichtlich Bedeutung, Dringlichkeit, Sichtbarkeit und Aufmerksamkeitsanziehung. Für den zweiten Versuchsteil wurden zwei Animationen ausgewählt, die sich in ihrer subjektiven Bewertung möglichst stark unterschieden. Diese wurden unter verschiedenen Versuchsbedingungen (verschiedene Abstände, Blickwinkel, Geschwindigkeiten der Animationen und Umgebungshelligkeiten) dargeboten und wiederum bewertet. Zusätzlich wurden die Reaktionszeiten auf die Lichtsignale erhoben. Es ergaben sich Unterschiede in Abhängigkeit der Entfernung und des Blickwinkels sowie der Art und Geschwindigkeit der Dynamiken. Dabei stimmten die Muster der Ergebnisse für die subjektiven und objektiven Daten überein. Es zeigte sich außerdem, dass die Animationen unter allen Bedingungen für die Probanden gut sichtbar waren und nur selten gar nicht oder zu spät wahrgenommen wurden. Schlusslichtdynamiken sind somit unter verschiedenen Bedingungen potenziell geeignet, Aufmerksamkeit auf sich zu lenken. Eine Wiederholung der Fragestellung in einer dynamischen Situation und mit weiteren Verkehrsteilnehmern steht allerdings noch aus. Die Ergebnisse deuten außerdem darauf hin, dass über die Animationsart und -geschwindigkeit verschiedenartige Reaktionen hervorgerufen werden können. Durch die Entwicklung salienter und intuitiv verständlicher Lichtfunktionen könnten die Kommunikationsmöglichkeiten im Straßenverkehr durch das Medium Heckleuchte erweitert und differenziert werden.

6.2 Theoretische und praktische Implikationen

Heckleuchten dienen der Sichtbarkeit und der Kommunikation im Straßenverkehr. Sie sollen verhindern, dass Fahrzeugen aufgefahren wird und Unfälle oder kritische Situationen verursacht werden. Die Signale der Heckleuchten werden über die verschiedenen Lichtfunktionen, wie dem Bremslicht, dem Schlusslicht oder dem Fahrtrichtungsanzeiger vermittelt und müssen jederzeit gut wahrnehmbar, intuitiv verständlich und weltweit gleich sein. Daher bedürfen Veränderungen oder Erweiterungen dieses Kommunikationsmittels großer Sorgfalt.

Die Untersuchung zur kontinuierlichen Helligkeitsanpassung an den Abstand zwischen zwei Fahrzeugen ergab keinen Hinweis auf eine Gefahr durch die Einführung

adaptiver Schlusslichtfunktionen. Unter guten Sichtbedingungen könnte diese Anpassung im Nahbereich zu einem Komfortgewinn für den Hinterherfahrenden führen. Für schlechte Sichtbedingungen wird ein möglicher Sicherheitsgewinn durch eine verbesserte Erkennbarkeit des Fahrzeughecks erwartet. Es konnte die Bedeutsamkeit von Heckleuchten für die Entfernungsschätzung aufgezeigt werden. Eine Veränderung der optischen Gestaltung von Heckleuchten sollte immer unter wahrnehmungspsychologischen Aspekten untersucht werden. Die vorliegenden psychophysikalischen Experimente deuten auf keine deutliche Verschlechterung der Tiefenschätzung durch durchgehende Leuchtenbänder in Heckleuchten hin.

Der Einsatz dynamischer Lichtfunktionen sollte einen spürbaren Sicherheitsgewinn mit sich bringen. In kritischen Situationen, wie einem drohenden Auffahrunfall, könnten saliente, dynamische Bewegungen im Schlusslicht die Aufmerksamkeit des hinteren Fahrers gezielt auf das Fahrzeug lenken. Des Weiteren ergaben sich Hinweise, dass mittels dynamischer Schlusslichtfunktionen differenzierte Kommunikationsmöglichkeiten denkbar sind. Sofern eine intuitive Verständlichkeit erhalten bliebe, könnten neben Informationen zur Verzögerung durch Bremsen und einem Fahrtrichtungswechsel, weitere Hinweise an den rückwärtigen Verkehr gegeben werden. Dabei wird zusätzlich eine Differenzierung hinsichtlich der wahrgenommenen Dringlichkeit und Bedeutung ermöglicht.

6.3 Kritische Reflexion der Studienmethodik

Im folgenden Kapitel wird, zusätzlich zu den bereits für die einzelnen Studien genannten Einschränkungen, die Studienmethodik der vorliegenden Arbeit übergreifenden kritisch reflektiert.

Die Zusammensetzung der Stichprobe ist ein elementarer Bestandteil bei der Beschreibung eines Experiments und sollte daher immer kritisch betrachtet werden. Das Ziel bei der Auswahl von Probanden ist letztendlich immer eine repräsentative Stichprobe. Diese ermöglicht eine hohe externe Validität, das heißt die Ergebnisse des Experiments sollten auf andere „Personen, Zeiten und Situationen übertragen werden können“ (Renkewitz & Sedlmeier, 2015, S. 268). Dazu sollten Stichproben grundsätzlich zufällig gezogen werden (Sedlmeier & Köhlers, 2001). Die Teilnehmer der vorliegenden Studien waren alle Mitarbeiter der AUDI AG und Größtenteils in der Lichtentwicklung tätig. Im Vergleich zu Untersuchungen an Universitäten, die häufig mit einem relativ jungen Altersdurchschnitt durch die Teilnahme von Studenten und, je nach Studienfach,

einem unausgeglichenen Geschlechterverhältnis zu kämpfen haben, war die vorliegende Stichprobe bezüglich zahlreicher Personenvariablen relativ breit aufgestellt. Dennoch wäre diese Personengruppe für Akzeptanzuntersuchungen, mit Vorhersage von Kaufentscheidungen, kaum geeignet, da eine gewisse Voreingenommenheit durch die Verbundenheit und Loyalität zum Arbeitgeber und den eigenen Produkten denkbar ist. Da sich die Fragestellungen allerdings vornehmlich auf eher allgemeine, wahrnehmungspsychologische Phänomene bezogen, sollte die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Firma für diese vorliegende Arbeit keine Limitation der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Personengruppen darstellen. Ein weiterer Diskussionspunkt ist die Stichprobengröße. Die notwendige Stichprobengröße wird durch verschiedene Parameter, wie der Qualität der Daten und der Art der Fragestellung, bestimmt (Bubb, 2003). Grundsätzlich sind Schätzungen aus größeren Stichproben genauer als aus kleineren (Sedlmeier & Köhlers, 2001). Bei der praktischen Umsetzung muss jedoch immer der zeitliche und organisatorische Aufwand von Experimenten in einem angemessenen Verhältnis zu den testtheoretischen Forderungen stehen. So können Stichproben von ungefähr 30 Personen meist als ausreichend betrachtet werden (siehe Bubb, 2003; Kubinger, Rasch, & Moder, 2009).

Verkehrspsychologische Untersuchungen müssen eine Gradwanderung zwischen standardisierten und experimentellen sowie anwendungsorientierten und realitätsnahen Bedingungen bewältigen. Die vorliegenden Studien wurden, mit Ausnahme der psychophysikalischen Experimente, an Heckleuchtenmustern durchgeführt. Dies gewährleistete realitätsnahe Helligkeiten und Lichtverteilungen und weist damit, gegenüber Untersuchungen im Fahrsimulator, einen wichtigen methodischen Vorteil auf. Dennoch waren die Muster nicht in Fahrzeuge verbaut und die Studien wurden daher in statischen bzw. teildynamischen Situationen durchgeführt. Die Dynamik im Straßenverkehr konnte damit nicht abgebildet werden. Die Studien wurden im Lichtassistenzzentrum der AUDI AG durchgeführt, durch welches standardisierte Umgebungsbedingungen gewährleisten werden konnten. Der Lichtkanal ist dabei außerdem mit einem straßenähnlichen Bodenbelag ausgestattet und kann somit realitätsnahe Reflexionen des von den Heckleuchtenmustern ausgesendeten Lichts vom Boden darstellen. Dennoch fehlen in einer dieser standardisierten Untersuchungsbedingung zahlreiche Tiefeninformationen, die zur Entfernungsschätzung verwendet werden können. Die Vielfalt an Umgebungshelligkeiten der realen Welt ist außerdem nicht abbildbar. Auch kann die Komplexität realer Verkehrssituationen nicht

ausreichend nachgebildet werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Studien unter standardisierten, lichttechnisch realistischen und reproduzierbaren Versuchsbedingungen durchgeführt wurden. Eine Erweiterung der Versuche auf den realen Straßenverkehr sollte weitere wichtige Erkenntnisse zur Wahrnehmung von Heckleuchtenfunktionen und-gestaltungen in dynamischen Umgebungen liefern.

6.4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit stellt einen Überblick über die sicherheitsrelevanten Anforderungen an Heckleuchten dar. Durch die Heckleuchte muss zu jeder Zeit und in jeder Situation gewährleistet werden können, dass das Fahrzeug für den rückwärtigen Verkehr sichtbar und gut zu erkennen ist. Dadurch werden Informationen über das Vorhandensein des Fahrzeugs und den Abstand zu diesem Fahrzeug übermittelt. Besteht die technische Möglichkeit, die Sichtbarkeit durch eine adaptive Anpassung der Schlusslichthelligkeit an Umgebungsbedingungen zu verbessern, so sollte dies umgesetzt werden. Es sind keine negativen Konsequenzen in Form einer Verschlechterung der Entfernungsschätzung zu erwarten. Bei einer grundsätzlichen Formänderung einer Heckleuchte sollte vorsichtig vorgegangen werden. Schon durch das Verbinden der beiden Heckleuchten durch ein Leuchtenband könnte sich ein kleiner Effekt auf die menschliche Wahrnehmung der Größe des Fahrzeughecks ergeben. Die Gestalt und Position einer Heckleuchte können kritische Faktoren bei der Schätzung einer Distanz im Straßenverkehr darstellen und sind daher bei der Entwicklung von Leuchten berücksichtigt. Eine weitere Anforderung an eine Heckleuchte ist die Möglichkeit zur gezielten Aufmerksamkeitssteuerung im Straßenverkehr. Dies geschieht bereits heute durch die Brems- und Blinkleuchte. Doch auch die Schlussleuchte erweist sich als geeignetes Mittel zur Aufmerksamkeitslenkung, durch die Variation der Helligkeit innerhalb des gesetzlichen Rahmens. Dabei können die verschiedenen artigen Bewegungen dazu genutzt werden, differenziert mit dem rückwärtigen Verkehr zu kommunizieren und interagieren. Durch die Variation in der Art der Bewegung und der Geschwindigkeit der Animation können gezielt Informationen unterschiedlicher Dringlichkeit an einen Hinterherfahrenden kommuniziert werden und zielgenaue Reaktionen hervorgerufen werden.

Die einzelnen Kapitel legen zusätzliche Möglichkeiten für zukünftige Forschungsvorhaben und die Erweiterung der Fragestellungen dar. Dabei spielen vor allem die, hier weitegehend vernachlässigten, Parameter der Umwelt, verschiedene

Witterungsbedingungen, unterschiedliche Geschwindigkeiten und die Komplexität des Verkehrsraumes, eine wichtige Rolle. Um Auffahrunfälle zukünftig reduzieren zu können und damit die allgemeine Verkehrssicherheit zu erhöhen, müssen die Erkenntnisse zunächst in konkreten Produkten angewandt werden und als Lichtassistenzsysteme im Straßenverkehr erprobt werden. Die Gewährleistung eines intuitiven Verständnisses der Lichtfunktionen steht dabei im Vordergrund. Durch ihre immense Bedeutung für die Verkehrssicherheit, sollten die Veränderungen in der Funktionalität von Heckleuchten niemals zu radikal sein und Bedienungs- und Verständnisfehler durch eine allgemein verständliche Darstellung ausgeschlossen werden. Heckleuchten spielen eine zentrale Rolle für die Sichtbarkeit von Fahrzeugen und für die Kommunikation mit dem rückwärtigen Verkehr. Die Entwicklung und Weiterentwicklung von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen ist ein wichtiger Aspekt der aktiven Sicherheit im Straßenverkehr und Heckleuchten weisen durch innovativen Funktionen ein großes Potenzial auf, nicht das Schlusslicht der Entwicklung zu bilden.

7 Literatur

ADAC e.V. (2010). Mobilität in Deutschland: Ausgewählte Ergebnisse [Statistik]. Abgerufen von der ADAC e.V. Webseite http://www.adac.de/_mmm/pdf/statistik_mobilitaet_in_deutschland_0111_46603.pdf

Anderson, J. R. (2013). *Kognitive Psychologie*. Berlin, Heidelberg, Wiesbaden, Deutschland: Springer VS.

Ansorge, U., & Leder, H. (2011). *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit*. Wiesbaden, Deutschland: VS Verlag für Sozialwissenschaften. doi: 10.1007/978-3-531-92094-8.

AUDI AG. (2015). Ästhetik in Bewegung: Lichtdesign und Lichttechnologien bei Audi [Pressemitteilung]. Abgerufen von der AUDI AG Webseite https://www.audi-mediacenter.com/de/aesthetik-in-bewegung-lichtdesign-und-lichttechnologien-bei-audi-3062

Bachmaier, D. (2016). *Optische Charakterisierung und Validierung eines OLED-Heckleuchtenmusters* (Bachelorarbeit). Technische Hochschule Ingolstadt, Ingolstadt, Deutschland.

Baldock, M. R. J., Long, A. D., Lindsay, V. L., & McLean, A. J. (2005). *Rear End Crashes* (Casr Reprt Series. CASR018). Adelaide, Australia: University of Adelaide.

Bartl, G., & Hager, B. (2006). *Unfallursachenanalyse bei PKW-Lenkern* (Bericht zum Forschungsprojekt). Wien, Österreich: Institut Gute Fahrt.

Bauckhage, T., Decker, D., & Lachmayer, R. (2004). Adaptive Signal System: Konzept für optimierte rückwärtige Signalleuchtensysteme. *Automobiltechnische Zeitschrift, 106*(11)*,* 1010–1014. doi: 10.1007/BF03221672.

Berlitz, S., Gut, C., & Krstajic, V. (2014). Laserscheinwerfer – vom Motorsport zu Serie. *Elektronik automotive, 10,* 44–48.

Blom, B., Niederée, U., Hecker, P., & Vollrath, M. (2013, September). *Aufmerksamkeitssteuerung – Ein Ansatz zur Pilotenunterstützung in der Rollführung*. Paper präsentiert auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress, Stuttgart, Deutschland.

Broughton, K. L. M., Switzer, F., & Scott, D. (2007). Car Following Decisions under Three Visibility Conditions and Two Speeds Tested with a Driving Simulator. *Accident Analysis and Prevention, 39,* 106–116. doi: 10.1016/j.aap.2006.06.009.

Bubb, H. (2003). Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen? In K. Landau, & H. Winner (Hrsg.), *Fahrversuche mit Probanden – Nutzwert und Risiko: Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug* (S. 26–39). Düsseldorf, Deutschland: VDI Verlag.

Buchner, A., Brandt, M., Bell, R., & Weise, J. (2006). Car Backlight Position and Fog Density Bias Observer-Car Distance Estimates and Time-to-Collision Judgments. *Human Factors, 48*(2), 300–317. doi: 10.1518/001872006777724363.

Bullough, J. D., Van Derlofske, J., & Kleinkes, M. (2007). *Rear Signal Lighting: From Research to Standards, Now and in the Future* (SAE Technical Paper Series 2007-01-1229). Warrendale, Pennsylvania, USA: SAE International. doi: 10.4271/2007-01-1229.

Carraro, U. (2009). Dunkelheitsunfälle. In H. Burg, & A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation* (S. 875–900). Wiesbaden, Deutschland: Vieweg+Teubner. doi: 10.1007/978-3-8348-9974-3.

Castro, C., Martínez, C., Tornay, F. J., Fernández, P. G., & Martos, F. J. (2005). Vehicle Distance Estimations in Nighttime Driving: A Real-Setting Study. *Transportation Research Part F, 8*, 31–45. doi: 10.1016/j.trf.2004.12.001.

Cavallo, V., Colomb, M., & Doré, J. (2001). Distance Perception of Vehicle Rear Lights in Fog. *Human Factors, 43*(3), 442–451. doi: 10.1518/001872001775898197.

CHECK24. (2013). Kfz-Nutzungsanalyse: Pkw-Fahrleistung der CHECK24-Kunden [Statistik]. Abgerufen von der CHECK24 Webseite http://www.check24.de/files/po/2013/a/4/b/3200-2013-07-02_check24_praesentation_kfz-fahrleistung_nach_kilometern.pdf

Darwin, C. (1860). *Entstehung der Arten im Thier- und Pflanzen-Reich durch natürliche Züchtung, oder Erhaltung der vervollkommneten Rassen im Kampfe um's Daseyn*. Stuttgart, Deutschland: E. Schweizerhart'sche Verlagshandlung und Druckerei.

Debus, G., Heller, D., Wille, M., Dütschke, E., Normann, M., & Placke, L. (2005). *Risikoanalyse von Massenunfällen bei Nebel* (Bericht zum Forschungsprojekt 82.108/1997). Bergisch Gladbach, Deutschland: Bundesanstalt für Straßenwesen.

Demtröder, W. (2013). *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik.* Heidelberg, Wiesbaden, Deutschland: Springer Spektrum. doi: 10.1007/978-3-642-29944-5.

Deutscher Verkehrssicherheitsrat. (2014). *Leitfaden Fahrbahnmarkierung* (Schriftenreihe Verkehrssicherheit 17). Bonn, Deutschland: DVR.

DIN 67524-1. (2008, Juli). Beleuchtung von Straßentunneln und Unterführungen – Teil 1: Allgemeine Gütemerkmale und Richtwerte. Berlin, Deutschland: Beuth.

Eliasson, J. (2014). „Nudging“: Verhaltensändernde Verkehrspolitik. In OECD (Hrsg.), *Annual Summit of the International Transport Forum* (S. 16–29). Leipzig, Deutschland: OECD Publishing.

Flannagan, M. J., Sivak, M., & Simpson, J. K. (2001). The Relative Importance of Pictorial and Nonpictorial Distance Cues for Driver Vision. In Public Policy Center University of Iowa (Hrsg.), *Proceedings of the International Driving Symposium on Human Factors in Driving Assessment, Training and Vehicle Design* (S. 214–218). Iowa City, Iowa, USA: Public Policy Center University of Iowa.

Gail, J., Lorig, M., Gelau, C., Heuzeroth, D., & Sievert, W. (2001). *Optimization of Rear Signal Pattern for Reduction of Rear-End Accidents during Emergency Braking Maneuvers* (Research Paper 353). Bergisch Gladbach, Deutschland: Bundesanstalt für Straßenwesen.

Gescheider, G. A. (1985). *Psychophysics: Method, Theory, and Application*. Hillsdale, New Jersey, USA: Lawrence Erlbaum Associates.

Gescheider, G. A. (1997). *Psychophysics: The Fundamentals*. Mahwah, New Jersey, USA: Lawrence Erlbaum Associates.

Göhringer, T. (2005). *Neuropsychologische Leistungsprofile bei Patienten mit Diabetes mellitus in Abhängigkeit von ihrer Stoffwechseleinstellung* (Dissertation). Ludwig-Maximilians-Universität München, München, Deutschand.

Götze, M., Bißbort, F., Petermann-Stock, I., & Bengler, K. (2014). “A Careful Driver is One Who Looks in Both Directions When He Passes a Red Light” – Increased Demands in Urban Traffic. In S. Yamamoto (Hrsg.), *Human Interface and the Management of Information: Information and Knowledge in Applications and Services* (S. 229–240). Cham, Schweiz: Springer International Publishing.

Goldstein, E. B. (2015). *Wahrnehmungspsychologie: Der Grundkurs*. Berlin, Heidelberg, Deutschland: Springer.

Hagendorf, H., Krummenacher, J., Müller, H.-J., & Schubert, T. (2011). *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit: Allgemeine Psychologie für Bachelor*. Berlin, Heidelberg, Deutschland: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-12710-6.

Hamm, M. (2013). Safety Improvement generated by Pioneering New Matrix and Direction Indicator Functionalities. In T. Q. Khanh (Hrsg.), *Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting* (S. 310–321). München, Deutschland: Herbert Utz Verlag.

Hamm, M. (2017, Januar). *Lichttechnische Größen: Einführung und Zusammenhänge*. Präsentation im Seminar Lichttechnik: Grundlagen 2017, Ingolstadt, Deutschland.

Hapke, U., Maske, U. E., Scheidt-Nave, C., Bode, L., Schlack, R., Busch, M. A. (2013). Chronischer Stress bei Erwachsenen in Deutschland. *Bundesgesundheitsblatt, 56,* 749–754. doi: 10.1007/s00103-013-1690-9.

Hédelin, P., & Lebot, S. (2010). *Alles über Obst und Gemüse*. Esslingen, Deutschland: Esslinger Verlag J. F. Schreiber.

Hellbrück, J., & Kals, E. (2012). *Umweltpsychologie*. Berlin, Heidelberg, Wiesbaden, Deutschland: Springer VS. doi: 10.1007/978-3-531-93246-0.

Hills, B. L. (1980). Vision, Visibility, and Perception in Driving. *Perception*, *9*(2)*,* 183–216. doi: 10.1068/p090183.

Horrey, W. J., Wickens, C. D., & Consalus, K. P. (2006). Modeling Drivers’ Visual Attention Allocation while Interacting with In-Vehicle Technologies. *Journal of Experimental Psychology, 12*(2), 67–78. doi: 10.1037/1076-898X.12.2.67.

Ianigro, S. (1995). *Ein Modell zur Simulation eines innerstädtischen Verkehrsablaufes und zur Steuerung von Lichtsignalanlagen mittels Petri-Netzen unter Berücksichtigung der Grünen Welle* (Dissertation). Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg, Deutschland.

Kahane, C. J., & Hertz, E. (1998). *The long-Term Effectiveness of Center High Mounted Stop Lamps in Passenger Cars and Light Trucks* (Technical Report Nr. DOT HS 808 696). Washington, D.C., USA: National Highway Traffic Safety Administration.

Kaluza, G. (2011). *Stressbewältigung: Trainingsmanual zur psychologischen Gesundheitsförderung*. Berlin, Heidelberg, Deutschland: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-13720-4.

Kingdom, F. A. A., & Prins, N. (2016). *Psychophysics: A Practical Introduction*. London, Großbritannien: Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-12-407156-8.00001-3.

Kirchhoff, P. (2002). *Städtische Verkehrsplanung: Konzepte, Verfahren, Maßnahmen*. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, Deutschland: B. G. Teubner. doi: 10.1007/978-3-322-84800-0.

Kirschbaum, C. (2008). *Biopsychologie von A bis Z*. Heidelberg, Deutschland: Springer Medizin. doi: 10.1007/978-3-540-39606-2.

Kleinkes, M., & Pohlmann, W. (2015, Oktober). *Neue Halbleiterlichtquellen (LED, OLED, Laser): Zukünftige Funktionalitäten und Styling-Möglichkeiten in der Exterior-Beleuchtung*. Paper präsentiert auf der Electronics in Vehicles Conference, Baden-Baden, Deutschland.

Kubinger, K. D., Rasch, D., & Moder, K. (2009). Zur Legende der Voraussetzungen des *t*-Tests für unabhängige Stichproben. *Psychologische Rundschau, 60*(1), 26–27. doi: 10.1026/0033-3042.60.1.26.

Kühner, M., Bubb, H., Bengler, K., & Wild, J. (2012). Adaptive Verfahren in der Psychophysik: Effiziente Bestimmung von Absolut- und Unterschiedsschwellen. *Ergonomie aktuell, 013*, 26–30.

Lagarde, E., Chastang, J.-F., Gueguen, A., Coeuret-Pellicer, M., Chiron, M., & Lafont, S. (2004). Emotional Stress and Traffic Accidents: The Impact of Separation and Divorce. *Epidemiology, 15*(6), 762–766. doi: 10.1097/01.ede.0000142140.77194.ad.

Lappe, M., Grigo, A., Bremmer, F., Frenz, H., Bertin, R. J. V., & Israël, I. (2000, September). *Perception of Heading and Driving Distance From Optic Flow*. Paper präsentiert auf der Driving Simulation Conference, Paris, Frankreich.

Lee, S. E., Llaneras, E., Klauer, S., & Sudweeks, J. (2007). *Analyses of Rear-End Crashes and Near-Crashes in the 100-Car Naturalistic Driving Study to Support Rear-Signaling Countermeasure Development* (Report Nr. DOT HS 810 846). Washington, D.C., USA: National Highway Traffic Safety Administration.

Lee, S. E., Wierwille, W. W., & DeHart, M. C. (2003). The Evolution of an Enhanced Rear Signaling System. *Transport Research Record: Journal of the Transport Research Bord, 1843,* 31–40. doi: 10.3141/1843-05.

Lee, S. E., Wierwille, W. W., & Klauer, S. G. (2002). *Enhanced Rear Lighting and Signaling Systems: Literature Review and Analyses of Alternative System Concepts* (Report Nr. DOT HS 809 425). Washington, D.C., USA: National Highway Traffic Safety Administration.

Lemmer, B., Bahr, B., & Piccolo, R. (2017). *Quirky Quarks: Mit Cartoons durch die unglaubliche Welt der Physik*. Berlin, Heidelberg, Deutschland: Springer. doi: 10.1007/978-3-662-50259-4.

Lich, M. (2010). *Visuelle Navigation: Dynamik der Wahrnehmung von Eigenbewegung* (Dissertation). Philipps-Universität Marburg, Marburg, Deutschland.

Llaneras, R. E., Neurauter, M. L., & Perez, M. (2010). *Evaluation of Enhanced Brake Lights Using Surrogate Safety Metrics: Task 2 & 3 Report: Further Characterization and Development Development of Rear Signaling Model and Work Plan for Large Scale Field Evaluation* (Report Nr. DOT HS 811 329). Washington, D.C., USA: National Highway Traffic Safety Administration.

Mennig, I. (2016). Analyse von Auffahrunfällen im Hinblick auf Anforderungen an innovative Heckleuchten. In VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik (Hrsg.), *Proceedings of the Automotive meets Electronics Conference* (S. 128–133). Berlin, Offenbach, Deutschland: VDE Verlag GmbH.

Mennig, I., Rosenhammer, S., & Krems, J. F. (2016). Potenzial innovativer Heckleuchten zur Unfallvermeidung. In VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.), *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* (S. 147–158). Düsseldorf, Deutschland: VDI Verlag GmbH.

Moore, D. W., & Rumar, K. (1999). *Historical Development and Current Effectiveness of Rear Lighting Systems* (Report Nr. UMTRI-99-31). Ann Arbor, Michigan, USA: University of Michigan.

Mortimer, R. G. (1990). Perceptual Factors in Rear-End Crashes. In SAGE Publishing (Hrsg.), *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 34th Annual Meeting* (S. 591–594). Thousands Oaks, Kalifornien, USA: SAGE Publishing.

Müsseler, J., & Rieger, M. (Hrsg.). (2017). *Allgemeine Psychologie*. Berlin, Heidelberg, Deutschland: Springer. 10.1007/978-3-642-53898-8.

Myers, D. G. (2014). *Psychologie*. Berlin, Heidelberg, Deutschland: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-40782-6.

Naumann, H., Schröder, G., & Löffler-Mang, M. (2014). *Handbuch Bauelemente der Optik: Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik*. München, Deutschland, Wien, Österreich: Carl Hanser Verlag.

Nekovee, M., & Bie, J. (2013). Rear-End Collision: Causes and Avoidance Techniques. In R. Naja (Hrsg.), *Wireless Vehicular Networks for Car Collision Avoidance* (S. 99–119). New York City, New York, USA: Springer Science+Business Media. doi: 10.1007/978-1-4419-9563-6_4.

Pinel, J. P. J., & Pauli, P. (2007). *Biopsychologie*. München, Deutschland: Pearson Studium.

Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 32*, 3–25.

Pretto, P., Vidal, M., & Chatziastros, A. (2008). Why Fog Increases the Perceived Speed. In Driving Simulation Association (Hrsg.), *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe* (S. 223–235). Monaco: Driving Simulation Association.

Proctor, R. W., & Proctor, J. D. (2012). Sensation and Perception. In G. Salvendy (Hrsg.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (S. 59–94). Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons. doi: 10.1002/9781118131350.ch3.

Raab, G. Unger, A. & Unger, F. (2010). *Marktpsychologie: Grundlagen und Anwendung*. Wiesbaden, Deutschland: Springer Gabler. doi: 10.1007/978-3-8349-6314-7.

Rabenau, P., Ogonda, M., & Pohlmann, W. (2017). Flexible OLEDs in der Fahrzeugheckbeleuchtung. *Automobiltechnische Zeitschrift, 119*(2), 16–21. doi: 10.1007/s35148-016-0180-4.

Rabenau, P., Patzig, F., & Khanh, T. Q. (in press). Modell zur Bewertung der optimalen Helligkeit von homogenen Schlussleuchten. *Automobiltechnische Zeitschrift, 119*(7).

Reif, K. (2012). *Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure*. Wiesbaden, Deutschland: Vieweg+Teubner. doi: 10.1007/978-3-8348-8658-3.

Renkewitz, F., & Sedlmeier, P. (2015). Empirische Forschungsmethoden in der Psychologie: Grundlagen, Versuchspläne, Datenanalyse. In A. Schütz, M. Brand, H. Selg, & S. Lautenbacher (Hrsg.), *Psychologie: Eine Einführung in ihre Grundlagen und Anwendungsfelder* (S. 256–279). Stuttgart, Deutschland: Kohlhammer.

Ripperger, J. (2001). *Lichttechnische Anforderungen an Schluß- und Bremsleuchten für Kraftfahrzeuge* (Dissertation). Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Deutschland.

Rowden, P., Matthews, G., Watson, B., & Biggs, H. (2011). The Relative Impact of Work-Related Stress, Life Stress and Driving Environment Stress on Driving Outcomes. *Accident Analysis and Prevention, 43*, 1332–1340. doi: 10.1016/j.aap.2011.02.004.

Schade, S. (2014). *Endogene Aufmerksamkeitssteuerung und Attentional capture in der visuellen Suche: Ansätze zur Erweiterung der Attentional Engagement Theory* (Dissertation). Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland.

Schaudt, W. A., Bowman, D. S., Stone, S. R. & Perez, M. C. (2014). *Expanded Research and Development of an Enhanced Rear Signaling System for Commercial Motor Vehicles: Final Report* (Report Nr. FMCSA-RRT-13-009). Washington, D.C., USA: U.S. Department of Transportation Federal Motor Carrier Safety Administration.

Schlag, B., Petermann, I., Weller, G., & Schulze, C. (2009). *Mehr Licht – mehr Sicht – mehr Sicherheit? Zur Wirkung verbesserter Licht- und Sichtbedingungen auf das Fahrerverhalten*. Wiesbaden, Deutschland: VS Verlag für Sozialwissenschaften. doi: 10.1007/978-3-531-91397-1.

Schüller, H. (2010). *Modelle zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens auf Stadtstraßen und dessen Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit auf Grundlage der Straßengestaltung* (Dissertation). Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland.

Sedlmeier, P., & Köhlers, D. (2001). *Wahrscheinlichkeiten im Alltag: Statistik ohne Formeln.* Braunschweig, Deutschland: Westermann.

Siebert, F., Oehl, M., & Pfister, H.-R. (2015, Februar). *Das Grenzverfahren im verkehrspsychologischen Experiment am Beispiel von Time Headway und Risikoempfinden*. Paper präsentiert auf dem Kongress für Verkehrspsychologie, Braunschweig, Deutschland.

Snowden, R. J., Stimpson, N., & Ruddle, R. A. (1998). Speed Perception Fogs Up as Visibility Drops. *Nature, 392,* 450.

Statista. (2015). Im Verkehrszentralregister eingetragene Personen nach Deliktart 2014 [Statistik]. Abgerufen von der Statista Webseite http://de.statista.com/statistik/daten/studie/5402/umfrage/im-verkehrszentralregister-eingetragene-personen-nach-deliktart/

Statistisches Bundesamt. (2015). Verkehrsunfälle. Fachserie 8: Verkehr, 7 [Statistik]. Abgerufen von der Statistischen Bundesamt Webseite https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Fachserie_8.html;jsessionid=3D6D7F130F266672D771F06BC67B3188.cae2

Staubach, M. (2010). *Identifikation menschlicher Einflüsse auf Verkehrsunfälle als Grundlage zur Beurteilung von Fahrerassistenzsystem-Potentialen* (Dissertation). Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland.

Steinman, R. M., Pizlo, Z., & Pizlo, F. J. (2000). Phi is not Beta, and Why Wertheimer's Discovery Launched the Gestalt Revolution. *Vision Research, 40*, 2257–2264. doi: 10.1016/S0042-6989(00)00086-9.

Strohbach, O., & Floss, C. (2015). Audi macht die Nacht zum Tag: neues Lichtassistenzzentrum [Pressemitteilung]. Abgerufen von der AUDI AG Webseite https://www.audi-mediacenter.com/de/pressemitteilungen/audi-macht-die-nacht-zum-tag-neues-lichtassistenzzentrum-396

Thaler, R. H., & Sunstein, C. R. (2011). *Nudge: Wie man kluge Entscheidungen anstößt*. Berlin, Deutschland: Ullstein.

Thomas, W., Lendle, R., & Rabenau, P. (2015). OLED in der Fahrzeugbeleuchtung: Enorme Möglichkeiten. *Elektronik automotive, 12,* 42–47.

Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A Feature-Integration Theory of Attention. *Cognitive Psychology, 12,* 97–136.

Trick, L. M., Enns, J. T., Mills, J., & Vavrik, J. (2004). Paying Attention Behind the Wheel: A Framework for Studying the Role of Attention in Driving. *Theoretical Issues in Ergonomic Science, 5*(5), 385–434. doi: 10.1080/14639220412331298938.

United Nations (2012, November). Addendum 6. Regulation No. 7. Uniform Provisions Concerning the Approval of Front and Rear Position Lamps, Stop-Lamps and End-Outline Marker Lamps for Motor Vehicles (Except Motor Cycles) and their Trailers. Genf, Schweiz: UN Economic Commission for Europe.

United Nations (2013a, Januar). Addendum 47. Regulation No. 48. Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to the Installation of Lighting and Light-Signaling Devices. Genf, Schweiz: UN Economic Commission for Europe.

United Nations (2013b, August). Addendum 37. Regulation No. 38. Uniform Provisions Concerning the Approval of Rear Fog Lamps for Power-Driven Vehicles and their Trailers. Genf, Schweiz: UN Economic Commission for Europe.

Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH. (2013). Unfallforschung – GIDAS [Pressemitteilung]. Abgerufen von der VUFO GmbH Webseite http://www.vufo.de/forschung-und-entwicklung/gidas/

Vollrath, M. (2013, November). *Nerv mich nicht – ich muss fahren! Wie Stress und Emotionen das Autofahren beeinflussen*. Paper präsentiert auf dem Presseseminar Emotionen im Straßenverkehr, Bad Breisig, Deutschland.

Vollrath, M., Briest, S., Schießl, C., Drewes, J., & Becker, U. (2006). *Ableitungen von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit* (Bericht zum Forschungsprojekt 82.214/2001). Bremerhaven, Deutschland: Wirtschaftsverlag NW.

Vollrath, M., & Krems, J. (2011). *Verkehrspsychologie. Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker*. Stuttgart, Deutschland: W. Kohlhammer GmbH.

Welsch, N., & Liebmann, C. C. (2012). *Farben*: *Natur Technik Kunst*. Heidelberg, Deutschland: Spektrum Akademischer Verlag.

Werkstetter, M., Weber, S., Hirth, F., & Amann, C. (2014). Laserlicht im BMW i8: Ansteuerung und E/E-Integration. *ATZelektronik, 4*, 26–30. doi: 10.1365/s35658-014-0446-0.

Wickens, C. D., Helleberg, J., Goh, J., Xu, X., & Horrey, W. J. (2001). *Pilot Task Management: Testing an Attentional Expected Value Model of Visual Scanning* (Technical Report Nr. ARL-01-14/NASA-01-7). Moffett Field, Kalifornien, USA: NASA Ames Research Center.

Wierwille, W. W., Llaneras, R. E., & Neurauter, M. L. (2009). *Evaluation of Enhanced Brake Lights Using Surrogate Safety Metrics: Task 1 Report: Further Characterization and Development of Rear Brake Light Signals* (Report Nr. DOT HS 811 127). Washington, D.C., USA: National Highway Traffic Safety Administration.

Witting, W. (2014). *Licht. Sehen. Gestalten. Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen für Architekten und Lichtdesigner*. Basel, Schweiz: Birkhäuser.

Wittlich, M. (2010). Blendung: Theoretischer Hintergrund [Informationen des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung]. Abgerufen von der DGUV Webseite www.dguv.de/medien/ifa/de/fac/strahl/pdf/blendung_theorie.pdf

Woelk, H., Chmielarz, M., Grauberg, U., & Groetzner, C. (1988). Statistische Auswertung von Streulichtmessungen in verschiedenen Regionen. Einfluß von Streulicht auf das Dämmerungsverhalten. In H. Kunert (Hrsg.), *Die Orientierung im Strassenverkehr bei Nachtfahrten: Bedingungen und Probleme* (S. 67–82). Köln, Deutschland: TÜV Rheinland.

Wolfe, J. M., & Horowitz, T. S. (2004). What Attributes Guide the Deployment of Visual Attention and How Do They Do It? *Nature Reviews Neuroscience, 5*(6), 495–501. doi: 10.1038/nrn1411.

8 Anhang

8.1 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Isis Mennig
Geburtstag:	02.10.1988
Geburtsort:	Nürnberg
Staatsangehörigkeit:	Deutsch
E-Mail:	isis-maria.mennig@s2008.tu-chemnitz.de

Ausbildung

Seit 04/2014	**Technische Universität Chemnitz/ AUDI AG** Studiengang: Psychologie (Promotion) Dissertation: *Information und Interaktion: Die Ermittlung von sicherheitsrelevanten Anforderungen an innovative Heckleuchten*
10/2011 – 04/2014	**Technische Universität Chemnitz** Studiengang: Psychologie (Master of Science; Note: 1,2) Vertiefung: Arbeits- und Organisationspsychologie: Human Resources/ Human Factors Masterarbeit: *Eignung eines Fahrsimulators mit Bewegungsplattform für die Erlebbarkeit von Fahrdynamik (Note: 1,0)*
10/2008 – 08/2011	**Technische Universität Chemnitz** Studiengang: Psychologie (Bachelor of Science; Note: 1,6) Bachelorarbeit: *Neue Konzepte zum Laden von Elektrofahrzeugen (Note: 1,3)*

Berufspraktische Erfahrung

Seit 04/2017	**GfK SE** Product Manager im Bereich Market Opportunities and Innovation (Automotive)
04/2014 – 03/2017	**AUDI AG** Doktorandin in der Technischen Entwicklung (Entwicklung Innovationen Licht/ Sicht)
09/2013 – 02/2014	**AUDI AG** Masterandin in der Technischen Entwicklung (Prozess-/ Methodenentwicklung, Eigenschaften/ Funktionen)
11/2012 – 06/2013	**Technische Universität Chemnitz** Studentische Hilfskraft an der Professur Arbeitswissenschaft und Innovationsmanagement
03/2012 – 08/2012	**Adam Opel AG** Praktikantin im GM Europe Engineering (Advanced Engineering Active Safety)
10/2011 – 12/2011	**Technische Universität Chemnitz** Studentische Hilfskraft an der Professur Arbeitswissenschaft
04/2010 – 12/2011	**Technische Universität Chemnitz** Studentische Hilfskraft an der Professur Allgemeine Psychologie und Arbeitspsychologie; Projekt MINI-E
05/2011 – 09/2011	**Mehrgenerationenhaus Generationentreff Chemnitz** Ehrenamtliche Tätigkeit
03/2010	**Team Bank AG** Praktikantin im Bereich Personalauswahl und -entwicklung
08/2009 – 10/2009	**Team Bank AG** Praktikantin im Bereich Personalauswahl und -entwicklung

8.2 Publikationen

Mennig, I. (2016, September). *Anforderungen an innovative Heckleuchten*. Paper präsentiert auf dem 10. Doktorandenworkshop der Fachgruppe Verkehrspsychologie, Dortmund, Deutschland.

Mennig, I., Rosenhammer, S., & Krems, J. F. (2016). Potenzial innovativer Heckleuchten zur Unfallvermeidung. In VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.), *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* (S. 147–158). Düsseldorf, Deutschland: VDI Verlag GmbH.

Mennig, I. (2016). Analyse von Auffahrunfällen im Hinblick auf Anforderungen an innovative Heckleuchten. In VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik (Hrsg.), *Proceedings of the Automotive meets Electronics Conference* (S. 128–133). Berlin, Offenbach, Deutschland: VDE Verlag GmbH

Mennig, I. (2015, November). *Anforderungen an innovative Heckleuchten*. Paper präsentiert auf dem Doktorandentag Pro.Motion, Ingolstadt, Deutschland.

Mennig, I. (2015, September). *Anforderungen an innovative Heckleuchten*. Paper präsentiert auf dem 9. Doktorandenworkshop der Fachgruppe Verkehrspsychologie, Ulm, Deutschland.

Henning, M. J., Berndt, C., Früh, L., Mennig, I. & Schneidereit, T. (2010). Die Speicherung von sich nähernden Objekten im dynamischen Teil des Arbeitsgedächtnisses – Representational Momentum und Zweitaufgaben. In F. Petermann & U. Koglin (Hrsg.). 47. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie, 26.-30. September 2010 (p. 340). Lengerich: Pabst Science Publishers.

8.3 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, nicht anderweitig zu Prüfungszwecken vorgelegt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Sämtliche wissentlich verwendeten Textausschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet. Ich bin mit einer elektronischen Überprüfung der Dissertation auf etwaige Plagiate hin einverstanden.

Isis Mennig
Nürnberg, 18.05.2017