
Optimierung von adaptiven KFZ- Scheinwerfertechnologien zur Blendungsbegrenzung unter dynamischen Bedingungen

Dem Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
vorgelegte Dissertation

von

Kyriakos Kosmas, M. Sc.
Geboren am 18.07.1983
in Essen

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann

Tag der Einreichung: 02.10.2018
Tag der mündlichen Prüfung: 25.01.2019

D17
Darmstadt 2019

Kyriakos Kosmas: Optimierung von adaptiven Kfz-Scheinwerfertechnologien zur Blendungsbegrenzung unter dynamischen Bedingungen, Darmstadt, Technische Universität Darmstadt
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2019
Tag der mündlichen Prüfung: 25.01.2018
Nutzungsrecht gemäß UrhG

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Für das Zustandekommen und für die Betreuung dieser Arbeit bin ich meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh zu großem Dank verpflichtet. Herr Khanh hat mich in meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und auch schon zuvor als Student immer vorbildlich und intensiv betreut, wobei mir immer der nötige Freiraum gegeben wurde, die fachlichen Themen und die Herangehensweise an Problemstellungen selbst zu gestalten.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann für sein Interesse an der Arbeit, der Annahme des Korreferats und der damit verbundenen Investition seiner Zeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Kollegen Jonas Kobbert, für die vielen fachlichen Diskussionen und Anregungen, als auch für seine große Hilfsbereitschaft, egal zu welcher Tages- und Nachtzeit und vor allem unter Wetterbedingungen. Des Weiteren möchte ich mich auch bei allen Kollegen, Studenten und Hiwis für Ihre Unterstützung bedanken.

Ebenso danke ich meinen Korrekturlesern, die mir geholfen haben, unverständliche Passagen aufzudecken und die Arbeit verständlicher zu formulieren.

Zu guter Letzt gilt mein ganz besonderer Dank meinem Vater und meiner Lebensgefährtin für die immerwährende Unterstützung. Sie hatten stets ein offenes Ohr für mein Anliegen und haben mich auch in schwierigen Zeiten an das „Licht“ am Ende des Tunnels erinnert. Vielen Dank!

Darmstadt, im Oktober 2018

Kyriakos Kosmas

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Optimierung von adaptiven Scheinwerfertechnologien zur Blendungsbegrenzung unter dynamischen Bedingungen. In diesem Kontext werden zwei Fragestellungen im Themengebiet der Blendungsforschung untersucht und diskutiert.

Bei der ersten Fragestellung wird untersucht, inwieweit die Verwendung von Systemen, wie beispielsweise die dynamische Leuchtweitenregelung und die Scheinwerferreinigungsanlage, anhand aktueller Gesetzgebung, mit dem Lichtstrom der Lichtquellen verknüpft werden können. Aus diesem Grund wurden zwei Feldversuche durchgeführt, die den Einfluss des Lichtstroms auf die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer untersuchten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Beladung, die Fahrwerkshärte und die Lichtverteilung einen signifikanten Einfluss auf die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer haben und somit der Lichtstrom als nicht geeignetes Kriterium erscheint. Beim zweiten Feldtest wurde der Einfluss von verschmutzten Scheinwerfern auf die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer und die Sichtweite des Fahrers untersucht. Hierfür wurden Abblendlichtverteilungen von Halogenleuchtstofflampen- und LED-Scheinwerfern, sowie blendfreie Fernlichtfunktionen im sauberen, verschmutzten und durch die Scheinwerferreinigungsanlage gereinigtem Zustand untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass durch verschmutzte Scheinwerfer der durch die Straßenverkehrsordnung geforderte Sicherheitsabstand zu gering ist, wodurch der vorausfahrende Fahrer geblendet wird und kein sicheres Anhalten im Falle einer plötzlich auftauchenden Gefahr möglich ist. Eine Scheinwerferreinigungsanlage könnte dem entgegenwirken, allerdings funktionieren die überprüften Systeme nur ab einem gewissen Verschmutzungsgrad effektiv.

Bei der zweiten Fragestellung dieser Arbeit wird untersucht, inwieweit blendfreie Fernlichtsysteme in alltäglichen Begegnungssituationen hinsichtlich Blendung und Detektion optimiert werden können. Hierfür wurde die optimale Anleuchtung von Verkehrszeichen, sowie eine Begegnungssituation auf nasser Fahrbahn untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine gezielte Abdunkelung der Verkehrszeichen, die Helligkeitsbewertung optimiert, die Blendungswahrscheinlichkeit minimiert und eine Lesbarkeitsgewinn von 25 m erzielt werden kann. Bei der Begegnungssituation auf nasser Fahrbahn konnte gezeigt werden, dass durch eine Abdunkelung der Vorfeldbeleuchtung die Blendung auf Werte einer trockenen Fahrbahn reduziert werden kann, ohne dabei die Sichtweite des Fahrers zu beeinflussen.

Aus den Blendungsergebnissen konnte eine Korrelation zwischen der maximalen Blendbeleuchtungsstärke und der Adaptations-Beleuchtungsstärke (Beleuchtungsstärke im Adaptationszustand) gefunden werden, die eine Grenzlinie zwischen nicht blendend und blendend beschreibt. Die Adaptations-Beleuchtungsstärke besteht aus dem gleitendem Mittelwert fünf Sekunden vor Erreichen des Maximums, wobei die Adaptation des Fahrers maßgeblich von den Scheinwerfern des entgegenkommenden Verkehrs abhängig ist. Bei trockener Fahrbahn sind es die direkten Lichtstrahlen und bei nasser Fahrbahn die Vorwärtsreflexionen des entgegenkommenden Verkehrs, auf die der Fahrer adaptiert. Ebenfalls wurden verschiedene Modelle zur Berechnung der äquivalenten Schleierleuchtdichte kritisch betrachtet und deren Übertragbarkeit auf reale Verkehrssituationen überprüft. Aus den Ergebnissen konnte auf Basis der Holladay-Gleichung eine eigene Formel für die äquivalente Schleierleuchtdichte im dynamischen Fahrzustand entwickelt und validiert werden.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Zusammenfassung	IV
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	8
Symbolverzeichnis	10
Abbildungsverzeichnis	11
1 Einleitung, Motivation und Aufbau der Arbeit	15
2 Grundlagen	19
2.1 Scheinwerfersysteme und deren Komponenten	19
2.1.1 Adaptive Frontbeleuchtungssysteme	19
2.1.2 Aufbau und Reflexionseigenschaften von Verkehrszeichen	22
2.1.3 Die Scheinwerferreinigungsanlage	23
2.1.4 Die Leuchtweitenregelung	24
2.2 Die Adaptation des menschlichen Auges	27
2.3 Blendung	28
2.3.1 Die physiologische Blendung	29
2.3.2 Die psychologische Blendung	32
2.3.3 Stand des Wissens	33
3 Anforderungen an die dynamische Leuchtweitenregelung	41
3.1 Stand der Forschung	41
3.2 Methodik	45
3.2.1 Auswahl und Einteilung der Testfahrzeuge	47
3.2.2 Messtechnik zur Ermittlung der Fahrzeugdynamik	48
3.2.3 Messtechnik zur Bestimmung der Blendung	49
3.3 Ergebnisse	51
3.3.1 Probandenbewertungen	51
3.3.2 Psychologische Blendung	53
3.3.3 Physiologische Blendung	56
3.3.4 Photometrische Ergebnisse	57
3.3.5 Fazit	60
3.4 Abgeleitete Ergebnisse	61
3.4.1 Vergleich mit Ergebnissen der Literatur	61
3.4.2 Weiterführende Ergebnisse	62
4 Einfluss der Verschmutzung auf blendfreie Fernlichtsysteme	65
4.1 Stand der Forschung	65
4.2 Methodik	68
4.3 Ergebnisse	72
4.3.1 Einfluss der Verschmutzung auf die Abblendlichtverteilung	72
4.3.2 Einfluss der Verschmutzung auf blendfreie Fernlichtsysteme	74
4.3.3 Einfluss der SRA auf die Verschmutzung von Scheinwerfern	77

4.3.4	Fazit.....	79
4.4	Abgeleitete Ergebnisse	80
5	Optimale Anleuchtung von Verkehrszeichen.....	87
5.1	Stand der Forschung.....	87
5.2	Methodik.....	90
5.3	Ergebnisse.....	92
5.3.1	Wahrnehmungsergebnisse	92
5.3.2	Photometrische Ergebnisse	93
5.3.3	Fazit.....	96
5.4	Abgeleitete Ergebnisse	96
5.4.1	Vergleich mit Ergebnissen der Literatur	96
5.4.2	Weiterführende Ergebnisse	97
6	Einfluss nasser Fahrbahnen auf die Blendung und Detektion	100
6.1	Stand der Forschung.....	100
6.2	Methodik.....	104
6.3	Ergebnisse.....	107
6.3.1	Wahrnehmungsergebnisse	107
6.3.2	Photometrische Ergebnisse	108
6.3.3	Fazit.....	113
6.4	Abgeleitete Ergebnisse	113
6.4.1	Vergleich mit Ergebnissen der Literatur	113
6.4.2	Weiterführende Ergebnisse	115
7	Diskussion der physiologischen und psychologischen Blendungsergebnisse	120
7.1	Psychologische Blendung	120
7.2	Physiologische Blendung.....	123
8	Kritik, Zusammenfassung und Ausblick	130
9	Literaturverzeichnis	135
Anhang	145	
Statistik.....	145	
Abhängige und unabhängige Stichproben und Variablen	145	
Parametrische und nicht-parametrische Tests.....	145	
Anhang zu Kapitel 2.....	146	
Anhang zu Kapitel 3.....	147	
Anhang zu Kapitel 4.....	149	
Anhang zu Kapitel 5.....	150	
Anhang zu Kapitel 6.....	151	
Anhang zu Kapitel 7.....	154	
Veröffentlichungen und betreute Arbeiten	157	
Veröffentlichungen	157	
Betreute Arbeiten.....	158	
Lebenslauf	160	
Anmerkung zum Kapitel 3 dieser Dissertation	162	

Erklärungen laut Promotionsordnung.....163

Abkürzungsverzeichnis

A

aLWR *Automatische Leuchtweitenregelung*
ATZ *Automobiltechnische Zeitschrift*

B

BCD *Borderline Between Comfort and Discomfort*

C

CIE *Commission Internationale de l'Éclairage*

D

dLWR *Dynamische Leuchtweitenregelung*

F

FLI *Fernlichtintensität*

H

HDG *Hell-Dunkel-Grenze*
HGL *Halogenleuchte*
HID *High Intensity Discharge*

I

IQA *Interquartilsabstand*
ISAL *International Symposium on Automotive Lighting*

K

Kfz *Kraftfahrzeug*

L

LED *Licht-Emittierende-Diode*
LVK *Lichtstärke-Verteilung-Körper*
LWR *Leuchtweitenregelung*

P

PWM *Pulsweitenmoduliert*

S

SRA *Scheinwerferreinigungsanlage*

StVZO *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung*

U

UGR-Modell *Unified Glare Rating-Modell*

UNECE *United Nations Economic Commission for Europe*

V

VZ *Verkehrszeichen*

Symbolverzeichnis

- a* Bremsverzögerung
A Anhalteweg
B Bremsweg
E Beleuchtungsstärke
E_B Blendbeleuchtungsstärke
I Lichtstärke
k Altersfaktor der äquivalenten Schleierleuchtdichte, Altersfaktor
K_W Weber-Kontrast
K_{W,th} Schwellenkontrast
L_{ad} Adaptationsleuchtdichte
L_g Mittlere Blendleuchtdichte
L_O Objekteleuchtdichte
L_{säq} äquivalenten Schleierleuchtdichte
n Exponent der äquivalenten Schleierleuchtdichte
p Wahrscheinlichkeit
R Reaktionsweg
RA Spezifischer Rückstrahlwert
v_{aufprall} Aufprallgeschwindigkeit
W Psychologischer Blendeindruck
α Anleuchtungswinkel
β Betrachtungswinkel
ΔL Schwellenleuchtdichtedifferenz
θ Blendwinkel

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1-1: Anzahl der Getöteten bei Nachtunfällen</i>	15
<i>Abbildung 1-2: : Gefahren für Autofahrer bei Dunkelheit:</i>	16
<i>Abbildung 1-3: Skizzenhafte Darstellung verschiedener Lichtfunktionen:</i>	17
<i>Abbildung 2-1: Aufbau des Audi A8 Matrix-Scheinwerfers [23]</i>	20
<i>Abbildung 2-2: Funktionsprinzip von blendfreien Fernlichtsystemen [23]</i>	20
<i>Abbildung 2-3: A: Platine mit den 84 LEDs für das blendfreie Fernlicht nach [27]</i>	21
<i>Abbildung 2-4: Aufbau einer Reflexfolie für Verkehrszeichen,</i>	23
<i>Abbildung 2-5: Frontansicht einer Scheinwerferreinigungsanlage</i>	24
<i>Abbildung 2-6: Schematische Darstellung der beladungsabhängigen Nickwinkeländerung,</i>	25
<i>Abbildung 2-7: Dunkeladaptation der Zapfen und Stäbchen,</i>	28
<i>Abbildung 2-8: Entstehung von Streulicht in Folge von Blendung nach VÖLKER [58]</i>	30
<i>Abbildung 2-9: Neun stufige de Boer Skala nach DE BOER [68]</i>	32
<i>Abbildung 2-10: Anteil der Fernlichtnutzung auf Landstraßen</i>	38
<i>Abbildung 3-1: Readaptationszeit in Abhängigkeit der Blendbeleuchtungsstärke</i>	44
<i>Abbildung 3-2: Versuchsaufbau nach [15]</i>	46
<i>Abbildung 3-3: Positionierung der verwendeten Sensoren am Fahrzeug:</i>	48
<i>Abbildung 3-4: Eingesetzte Messtechnik im Messfahrzeug:</i>	49
<i>Abbildung 3-5: Ermittlung des dynamischen Schwellenkontrastes nach [15]</i>	51
<i>Abbildung 3-6: Psychologische Blendung in Abhängigkeit des Alters</i>	52
<i>Abbildung 3-7: Vergleich der psychologischen Blendung</i>	53
<i>Abbildung 3-8: Psychologische Blendung:</i>	53
<i>Abbildung 3-9: Psychologische Blendung</i>	54
<i>Abbildung 3-10: z-Transformation der „Blendungsknopf-Betätigungen“:</i>	55
<i>Abbildung 3-11: Mittlerer Schwellenkontrast:</i>	56
<i>Abbildung 3-12: Ermittelte Belichtung:</i>	57
<i>Abbildung 3-13: Boxplot-Darstellung des Fahrzeugwinkels:</i>	58
<i>Abbildung 3-14: Latenzzeit der dLWR</i>	59
<i>Abbildung 3-15: Korrelation zwischen der Latenzzeit und der inversen de Boer Bewertung</i>	60
<i>Abbildung 3-16: Vergleich der inversen de Boer Bewertungen</i>	62
<i>Abbildung 3-17: Verhältnis zwischen Puls- und Adaptations-Beleuchtungsstärke</i>	63
<i>Abbildung 3-18: Physiologische zur psychologische Blendung</i>	64
<i>Abbildung 4-1: Vergleich zwischen sauberen und schmutzigen Scheinwerfer</i>	65

<i>Abbildung 4-2: Messaufbau zur Bestimmung der Leuchtdichte:</i>	69
<i>Abbildung 4-3: Rundkurs und Messplatz auf dem die Untersuchung durchgeführt:</i>	70
<i>Abbildung 4-4: Leuchtdichteaufnahmen der Abblendlichtverteilung:</i>	71
<i>Abbildung 4-5: Leuchtdichteaufnahmen des blendfreien Fernlichts:</i>	71
<i>Abbildung 4-6: Verschmutzungsgrad unterhalb (links) und oberhalb (rechts) der HDG:</i>	72
<i>Abbildung 4-7: Vergleich zwischen Projektions- (links) und Reflexionssystem (rechts).</i>	73
<i>Abbildung 4-8: Horizontaler Schnitt durch den Hot-Spot (links) und durch B50L (rechts).</i>	74
<i>Abbildung 4-9: Verschmutzungsgrad im Fernlicht- (links) und im ausgeblendeten Bereich:</i>	75
<i>Abbildung 4-10: Differenzleuchtdichtebild des linken Scheinwerfers:</i>	75
<i>Abbildung 4-11: Querschnitt durch den ausgeblendeten Bereich</i>	76
<i>Abbildung 4-12:Verhältnis zwischen ausgeblendeten Bereich und Fernlichtbereich:</i>	77
<i>Abbildung 4-13: Prozentuale Differenz zwischen schmutzig und SRA gereinigt</i>	78
<i>Abbildung 4-14: Verschmutzungsgrad des ausgeblendeten (links) und des Fernlichtbereichs:</i>	79
<i>Abbildung 4-15: Trajektorie des Objektes in der Lichtverteilung</i>	81
<i>Abbildung 4-16: Simulierte Detektionsdistanz</i>	82
<i>Abbildung 4-17: Simulierte Detektionsdistanz für das blendfreie Fernlichtsystem</i>	82
<i>Abbildung 4-18: Anhalteweg bei blendfreien Fernlichtsystemen:</i>	83
<i>Abbildung 4-19: Beleuchtungsstärke am B50L Punkt</i>	84
<i>Abbildung 4-20: Mittlere Beleuchtungsstärke des ausgeblendeten Bereichs,</i>	85
<i>Abbildung 5-1: Anleuchtung eines Verkehrszeichens mit Abblendlicht (links) und Fernlicht (rechts).</i>	87
<i>Abbildung 5-2: Verwendete Verkehrszeichen</i>	90
<i>Abbildung 5-3: Versuchsaufbau nach [107]</i>	91
<i>Abbildung 5-4: Normierte Blendwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Fernlichtintensitäten</i>	92
<i>Abbildung 5-5: Helligkeitsbewertung in Abhängigkeit der Fernlichtintensitäten</i>	93
<i>Abbildung 5-6:Vergleich der Lesbarkeitsentfernungen in Bezug zu Abblendlicht:</i>	94
<i>Abbildung 5-7: Exemplarischer Verlauf der Beleuchtungsstärke am Verkehrszeichen 1</i>	95
<i>Abbildung 5-8: Lesbarkeitsabstand in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke:</i>	95
<i>Abbildung 5-9: Optimale, dynamische Fernlichtintensität</i>	99
<i>Abbildung 6-1: Blendung durch Reflexionen auf einer nassen Fahrbahn</i>	100
<i>Abbildung 6-2: Schematische Darstellung der direkten und indirekten Lichtstrahlen</i>	101
<i>Abbildung 6-3: LVK vom Testfahrzeug (links) und Blendfahrzeug (rechts)</i>	105
<i>Abbildung 6-4: Schematischer Versuchsaufbau:</i>	106
<i>Abbildung 6-5: Helligkeitsbewertungen der Abblendlichtverteilung</i>	107
<i>Abbildung 6-6: Inverse de Boer Bewertungen des Blend- und Testfahrzeuges</i>	108

<i>Abbildung 6-7: Exemplarische Darstellung der Beleuchtungsstärkeverläufe</i>	109
<i>Abbildung 6-8: Verlauf der Beleuchtungsstärke im Blendfahrzeug</i>	109
<i>Abbildung 6-9: Verlauf der Beleuchtungsstärke im Testfahrzeug</i>	110
<i>Abbildung 6-10: Leuchtdichteaufnahme aus Sicht des Testfahrzeuges</i>	111
<i>Abbildung 6-11: Detektionsabstände bei trockener (links) und nasser Fahrbahn (rechts)</i>	111
<i>Abbildung 6-12: Detektionswahrscheinlichkeiten</i>	112
<i>Abbildung 6-13: Schematische Darstellung der Vorwärtsreflexion</i>	115
<i>Abbildung 6-14: Korrelation zwischen psychologischer Blendung und Beleuchtungsstärke,</i>	116
<i>Abbildung 6-15: Detektionsabstände mit und ohne Vorhandensein einer Blendquelle</i>	117
<i>Abbildung 6-16: Dynamische Intensität der Vorfeldbeleuchtung bei nasser Fahrbahn,</i>	118
<i>Abbildung 6-17: Empfohlene Lichtverteilung für nasse Fahrbahnoberflächen.</i>	118
<i>Abbildung 7-1: Histogramm der Betätigungen des Blendungsknopfes</i>	120
<i>Abbildung 7-2: Anwendung der Regressionslinie aus Kapitel 3.4 auf die Ergebnisse von Kapitel 5,</i>	121
<i>Abbildung 7-3: Anwendung der Regressionslinie aus Kapitel 3.4 auf die Ergebnisse von Kapitel 6,</i>	122
<i>Abbildung 7-4: Psychologische Blendung und mittlere Beleuchtungsstärke</i>	123
<i>Abbildung 7-5: Leuchtdichtedifferenz ΔL (links) und Weber-Kontrast (rechts)</i>	124
<i>Abbildung 7-6: Leuchtdichtedifferenz und Blendbeleuchtungsstärke</i>	125
<i>Abbildung 7-7: Äquivalente Schleierleuchtdichte anhand der unterschiedlichen Modelle</i>	125
<i>Abbildung 7-8: Äquivalente Schleierleuchtdichte mit unterschiedlichen Exponenten n,</i>	127
<i>Abbildung 7-9: Berechneter Schwellenkontrast nach Kapitel 3.4</i>	128

<i>Abbildung A-1: Messanordnung zur Bewertung retroreflektierender Materialien [120]</i>	146
<i>Abbildung A-2: Histogramm mit dem Alter der teilgenommenen Probanden</i>	147
<i>Abbildung A-3: Verlauf der Kontrastbox-Messung:</i>	147
<i>Abbildung A-4: Histogramm mit der Dauer der gemessenen Lichtpulse</i>	148
<i>Abbildung A-5: Vergleich der inversen de Boer Bewertungen</i>	148
<i>Abbildung A-6: Selbst entwickeltes Bewässerungssystem zum Bewässern der Fahrbahn</i>	149
<i>Abbildung A-7: Vergleich des Gradienten an der vertikalen HDG</i>	149
<i>Abbildung A-8: Gemessene mittlere Leuchtdichten für den Bereich oberhalb der HDG</i>	150
<i>Abbildung A-9: Prozentuale Differenz zwischen schmutzig und SRA gereinigt</i>	150
<i>Abbildung A-10: Histogramm mit dem Alter der teilgenommenen Probanden</i>	150
<i>Abbildung A-11: Histogramm mit dem Alter der teilgenommenen Probanden</i>	151
<i>Abbildung A-12: Lichtverteilung eines adaptiven blendfreien Abblendlichts</i>	153
<i>Abbildung A-13: Messschirm über die photometrischen Eigenschaften</i>	153

<i>Abbildung A-14: Psychologische Blendung und mittlere Beleuchtungsstärke:</i>	154
<i>Abbildung A-15: Leuchtdichteaufnahmen aus unterschiedlichen Abständen</i>	154
<i>Abbildung A-16: Abstandsabhängiger Verlauf der äquivalenten Schleierleuchtdichte</i>	155
<i>Abbildung A-17: Abstandsabhängiger Verlauf der äquivalenten Schleierleuchtdichte</i>	155
<i>Abbildung A-18: Abstandsabhängiger Verlauf der äquivalenten Schleierleuchtdichte</i>	156
<i>Abbildung A-19: Vergleich der berechneten Schwellkontraste</i>	156

1 Einleitung, Motivation und Aufbau der Arbeit

Der Hauptteil der Informationsaufnahme geschieht beim Führen eines Kraftfahrzeuges (Abk.: Kfz) über den visuellen Kanal, wodurch etwa 90 % aller Informationen aufgenommen werden [1]. Bei Nachtfahrten ist die visuelle Informationsaufnahme, bedingt durch die geringe Helligkeit, gestört. Da mit abnehmender Helligkeit das Farbsehen nachlässt, wird die Kontrastwahrnehmung zur bestimmenden Größe bei der Detektion von Objekten im nächtlichen Verkehrsraum [2]. Eine schlechte Ausleuchtung und daraus resultierende schlechte Sicht verursacht bei knapp der Hälfte aller Autofahrer Stress [3], wodurch das Unfallrisiko erheblich steigt. Dies wird durch Daten der Verkehrsunfallstatistik unterstrichen, die zeigen, dass sich mehr als 40 % aller tödlich verlaufenden Verkehrsunfälle bei Nacht ereignen, wobei lediglich 20 % des gesamten Verkehrsaufkommens in den Dunkelstunden anfällt [4]. Die absolute Anzahl der nächtlichen Todesfälle ist in *Abbildung 1-1* zu sehen.

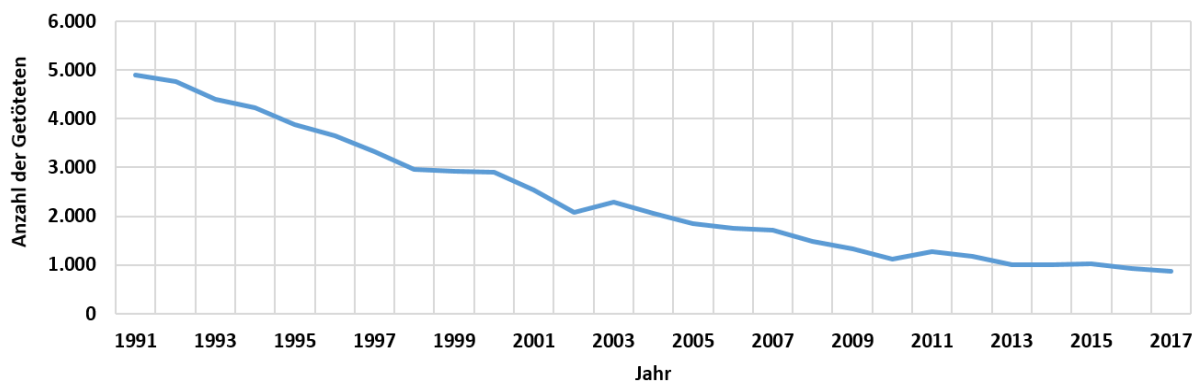


Abbildung 1-1: Anzahl der Getöteten bei Nachtunfällen im Straßenverkehr in Deutschland [5]

Zu erkennen ist, dass die Anzahl der Getöteten bei Nachtunfällen in den letzten 26 Jahren einen stetigen Rückgang aufweist. Allerdings besteht bei rund 1000 Getöteten in Deutschland im Jahr 2017 noch Handlungsbedarf. Dies unterstreicht auch der jährlich durchgeführte Licht-Test, bei dem etwa 40 % aller untersuchten Fahrzeuge einen defekten oder falsch eingestellten Scheinwerfer hatten [6]. Zudem hatte in einer Umfrage knapp die Hälfte aller befragten Autofahrer Probleme zugegeben, einen Fußgänger bzw. ein Hindernis zu erkennen [7]. Neben Mängel in der Fahrzeugbeleuchtung und der daraus resultierenden schlechten Sicht zeigt eine weitere Umfrage, dass Blendung zu den größten Ängsten der Autofahrer gehört (vgl. *Abbildung 1-2*) [8].

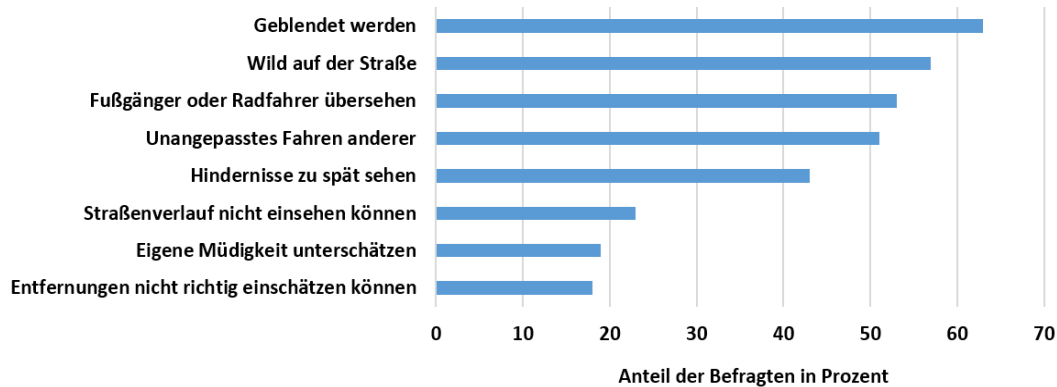


Abbildung 1-2: : Gefahren für Autofahrer bei Dunkelheit: „Wovor fürchten Sie sich, wenn Sie im Dunkeln Auto fahren?“ [8]

An erster Stelle der Ängste befindet sich mit 63 % die Blendung, gefolgt von schlechter Sicht durch „Fußgänger oder Radfahrer übersehen“, „Hindernisse zu spät erkannt“ und „Straßenverlauf nicht einsehen können“. Auf diese Problematik sind die Automobilhersteller aufmerksam geworden und entwickeln ihre Kfz-Scheinwerfer stetig weiter, um dem Autofahrer bessere Sicht bei Dunkelheit zu ermöglichen ohne dabei andere Verkehrsteilnehmer zu blenden, denn eine bessere Sicht darf nicht zur Blendung von vorausfahrenden bzw. entgegenkommenden Verkehr führen. Somit ist die Kfz-Lichttechnik seit den Anfängen des Automobils bestrebt, die Ausleuchtung vor dem Fahrzeug so gut wie möglich zu gestalten, indem ein Kompromiss zwischen Sichtweite und Blendungsvermeidung getroffen wird.

Aus historischer Sicht wurde der erste elektrische Scheinwerfer im Jahre 1908 in Fahrzeuge verbaut, der ein Vielfaches an besserer Sicht bot, als Kerzen und Gaslampen, die bis zu diesem Zeitpunkt zum Einsatz kamen [9]. Die Halogenleuchte (Abk.: HGL) die bis heute in Kfz-Scheinwerfer verbaut wird, fand 1962 ihren Einzug in die Scheinwerfer und erhöhte sowohl die Lebensdauer der verwendeten Leuchtmittel als auch die Sichtweite [9]. Im Jahre 1992 folgte die Xenon-Entladungslampe zu Englisch „high intensity discharge“ (Abk.: HID) der ersten Generation, mit der sich die Lichtausbeute um das Dreifache erhöhte [9]. Durch die Entwicklung der blauen Licht-Emittierenden Diode (Abk.: LED), war es möglich, effizient weißes LED-Licht zu generieren, wodurch die LED ihren Einzug in den ersten Voll-LED-Scheinwerfer im Jahre 2007 erlangte [10].

Neben der stetigen Entwicklung der Leuchtmittel entwickelten sich auch die Lichtverteilungen der Scheinwerfer. So wurde im Jahre 1920 die symmetrische Lichtverteilung eingeführt, die zur Vermeidung der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führen sollte [11]. Im Jahre 1957 wurde die asymmetrische Lichtverteilung eingeführt, die den Fahrbahnrand der eigenen Straßenseite, durch die Asymmetrie, erheblich besser ausleuchtet als die Gegenfahrbahn [9]. Dadurch konnte eine bessere Sichtweite und gleichzeitig eine geringere Blendung des entgegenkommenden Verkehrs erzielt werden. Im Jahre 1965 wurde der erste Hauptscheinwerfer mit zwei HGL eingesetzt, der neben der asymmetrischen auch eine Fernlichtverteilung hatte. Durch die Einführung des Fernlichtes konnte die Sichtweite im Vergleich zu Abblendlicht nochmals erhöht werden. Historisch betrachtet ist das Fernlicht das eigentliche genutzte Fahrlicht, eine Tatsache, die sich auch in der englischen Namensgebung für Fernlicht nämlich „driving beam“ zu Deutsch Fahrlicht, widerspie-

gelt. Das Abblendlicht (engl.: passing beam), zu Deutsch Vorbeifahrlicht, sollte nur bei Begegnungssituationen genutzt werden, um den Gegenverkehr bzw. vorausfahrenden Verkehr nicht zu blenden [12].

Mit zunehmender Verkehrsdichte wird das Fernlicht allerdings immer seltener manuell eingesetzt und das Abblendlicht gewinnt zunehmend an Bedeutung. SPRUTE [13] zeigte in seiner Arbeit, dass Fernlicht deutlich zu selten genutzt wird und somit das Potenzial der Scheinwerfer nicht komplett ausgereizt wird. Verschiedene Assistenzsysteme wurden seitdem vorgestellt, die mit Hilfe einer Kamera den Verkehrsraum vor dem Fahrzeug überwachen und beispielsweise automatisch zwischen Abblend- und Fernlicht umschalten. Im Jahre 2010 wurde das blendfreie Fernlichtsystem in einem VW Touareg vorgestellt, das die Vorteile von Abblend- und Fernlicht vereint – minimale Blendung und maximale Sichtweite [14] (vgl. *Abbildung 1-3*). Dies wird ebenfalls mithilfe einer Kamera ermöglicht, die andere Verkehrsteilnehmer detektiert und diese aus der Fernlichtverteilung entblendet. So wird dem Fahrer auch bei Gegenverkehr eine Fahrt mit Fernlicht ermöglicht, bei der mit gezielter Verwendung von vertikalen Hell-Dunkel-Grenzen (Abk.: HDG), der relevante Bereich in dem sich der Gegenverkehr befindet, abgeschattet wird. Im Gegensatz zu Abblend- und Fernlicht ist das blendfreie Fernlicht eine dynamische Lichtfunktion, die sich situationsbedingt anpasst. In *Abbildung 1-3* ist ein direkter Vergleich zwischen den statischen Lichtfunktionen Abblendlicht und Fernlicht, zur dynamischen Lichtfunktion blendfreies Fernlicht, zu sehen.



Abbildung 1-3: Skizzenhafte Darstellung verschiedener Lichtfunktionen: Asymmetrisches Abblendlicht (links), Fernlicht (mitte) und blendfreies Fernlicht (rechts) [15]

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich grundlegend mit dem Thema Blendung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfersystemen, vor allem weil aktuelle Blendungsbewertungen als unzureichend angesehen werden, weil sie nicht die Realsituation betrachten [16]. Aus diesem Grund, werden in der vorliegenden Arbeit realitätsnahe Feldtests durchgeführt, deren Fokus in der Verbesserung der Verkehrssicherheit liegt. Hierzu gehören Feldtests, die sicherheitsrelevante lichttechnische Systeme untersuchen, wie es die Leuchtweitenregelung und die Scheinwerferreinigungsanlage sind. Die Verwendung dieser Systeme ist nach aktueller Gesetzeslage mit dem Lichtstrom vom Abblendlicht verbunden und wird deshalb von einigen Automobilherstellern, vorwiegend aus Kostengründen weggelassen [17]. Hiervon sind allerdings nicht nur Abblendlichter, sondern auch blendfreie Fernlichtsysteme betroffen, da diese durch ein intelligentes Zusammenspiel von Abblendlicht und partiellem Fernlicht, die Straße anleuchten.

Neben den beiden sicherungstechnischen Systemen ist weiterer Forschungsbedarf nötig, um intelligente Lichtsysteme, wie das blendfreie Fernlicht, optimieren zu können [1]. Obwohl blendfreie Fernlichtsysteme durch bestimmte Segmentierungsstrategien weitgehend optimiert sind (vgl. u.a.

[18]), besteht bei alltäglichen Verkehrssituationen noch Handlungsbedarf. So werden beispielsweise Verkehrszeichen mit Fernlicht angeleuchtet, wodurch diese überstrahlen und dadurch nicht lesbar sind und den Fahrer blenden können. Ein anderes Beispiel, bei dem Handlungsbedarf besteht, ist eine Begegnungssituation auf nasser Fahrbahn. Der Wasserfilm kann erhöhte Vorwärtsreflexionen und Absorptionen verursachen, wodurch andere Verkehrsteilnehmer geblendet werden können bzw. für eine dunkel wirkende Straße sorgen.

In diesem Kontext dient die vorliegende Arbeit dazu, adaptive Kfz-Scheinwerfertechnologien unter dynamischen Bedingungen, blendungstechnisch zu bewerten und zu optimieren. Dabei steht der Bezug zu real- und folglich zu dynamischen Bedingungen im Vordergrund. Die Ergebnisse der Arbeit sollen sowohl der Wissenschaft als auch der Wirtschaft dienen und letztendlich die Verkehrssicherheit erhöhen.

Inhaltlich gliedert sich die Arbeit in drei Abschnitte. Im ersten Abschnitt werden die nötigen Grundlagen für das Verständnis dieser Arbeit vermittelt (Kapitel 2). Unter anderem wird in diesem Kapitel auf die Blendung näher eingegangen, indem Definitionen und Forschungsergebnisse präsentiert werden. Für einen besseren Überblick sind die Forschungsergebnisse in Laboruntersuchungen und Feldtests unterteilt, aus denen die Methodik der vorliegenden Arbeit abgeleitet wird.

Im zweiten Abschnitt, dem Hauptteil, werden die eigenen Untersuchungen dargestellt, die aus vier Felduntersuchungen bestehen. Jeder Feldtest wird in einem eigenen Kapitel gezeigt und beinhaltet die zugehörigen Forschungsergebnisse, aus denen die Forschungsfragen abgeleitet werden. In den Kapiteln 3 und 4 werden die zuvor angesprochenen sicherheitsrelevanten Systeme, Leuchtweitenregelung und Scheinwerferreinigungsanlage behandelt. In den darauffolgenden beiden Kapiteln 5 und 6 wird die optimale Anleuchtung von Verkehrszeichen sowie der Einfluss einer nassen Fahrbahn auf die Blendung und Sichtweite des Fahrers untersucht.

Im dritten Abschnitt werden die gezeigten Ergebnisse diskutiert, kritisch betrachtet und zusammengefasst.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die nötigen Grundlagen für das Verständnis dieser Arbeit erörtert. Hierzu wird zunächst auf die adaptiven Scheinwerfersysteme eingegangen, die in der vorliegenden Arbeit untersucht wurden. Im Anschluss wird auf die wichtigsten Formen der Blendung eingegangen und ausgewählte Forschungsergebnisse präsentiert.

2.1 Scheinwerfersysteme und deren Komponenten

In diesem Kapitel werden Scheinwerfersysteme und deren Komponenten beschrieben. Hierzu gehören adaptive Frontbeleuchtungssysteme, die Leuchtweitenregelung sowie die Scheinwerferreinigungsanlage. Solche Systeme erhöhen einerseits die Sichtweite des Fahrers und tragen zu einer Reduzierung der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer bei. Zudem werden der Aufbau und die Reflexionseigenschaften von Verkehrszeichen beschrieben, da diese die Blendung des Fahrers beeinflussen können.

2.1.1 Adaptive Frontbeleuchtungssysteme

Bei heutigen Lichtsystemen werden unterschiedliche Lichtquellentechnologien wie HGL, HID, LED oder auch Laser eingesetzt. Letzteres bietet einen wichtigen Schritt, um die Verkehrssicherheit bei Nachtfahrten zu erhöhen, da mit dem eingesetzten zusätzlichem Laserfernlichtmodul die Sichtweiten um 50 % im Vergleich zu konventionellem LED-Fernlicht gesteigert werden kann [19]. Die Vorteile dieser Technologie sind neben der erhöhten Sichtweite, in einer kompakten Bauform mit sehr hohen Leuchtdichten zu finden. Der Durchmesser der lichtaustretenden Fläche der Scheinwerfer hat sich nach ALBOU et al. [20] in den letzten Jahren von 130 mm auf bis zu 40 mm reduziert. Neue Tendenzen zeigen sogar eine zusätzliche Reduzierung auf bis zu 25 mm [21]. Trotz aller Design und sicherheitstechnischer Vorteile werden Laserscheinwerfer aktuell lediglich als Zusatzfernlichtmodule in Oberklassefahrzeugen und in Fahrzeugen, die in einer geringen Stückzahl produziert werden, angeboten. Der Grund hierfür liegt in den überdurchschnittlich hohen Produktionskosten der Laserkomponenten und deren Sicherheitssysteme, sowie eine relativ geringe Nutzungsrate der Systeme, die je nach Fahrzeugarchitektur in den meisten Fällen bei unter 10 % liegt [21]. Daher gewinnt der LED-Scheinwerfer immer mehr an Popularität bei den Automobilherstellern, die vor allem wegen der hohen Lebensdauer im Vergleich zu HGL und dem geringen Energieverbrauch und dem damit verbundenem geringerem CO_2 Ausstoß auf diese Technik vertrauen. So kann beispielsweise der CO_2 Ausstoß durch Verwendung von LEDs beim Abblend- und Schlusslicht um ca. 60 % gesenkt werden [22]. Ein weiterer Vorteil besteht im breiten Einsatzgebiet der LEDs, der vom stromsparenden Elektrofahrzeugscheinwerfer bis hin zu komplexen Matrix-Scheinwerfer reicht. Der Einsatz von LEDs in solchen Scheinwerfern hat hierbei den Vorteil, dass viele und vor allem komplexe Lichtfunktionen auf engstem Raum, und das auch noch in einem ansprechenden Design, realisiert werden können [23]. LEDs weisen eine gute Schalt- und Dimmbarkeit auf, sodass komplizierte Lichtfunktionen ohne Schrittmotoren rein elektrisch realisiert werden können [24]. Als Nachteil ist die umständliche Kühlung zu erwähnen, die entweder passiv oder aktiv gestaltet wird. In *Abbildung 2-1* ist der Aufbau des Audi A8 Matrix Scheinwerfers dargestellt,

der aus etwa 230 einzelnen Teilen besteht [25]. Die LEDs zur Realisierung des blendfreien Fernlichtes sind in Form einer Matrix angeordnet, weshalb häufig auch von Matrix-Beam oder auch Matrix-Scheinwerfern die Rede ist.



Abbildung 2-1: Aufbau des Audi A8 Matrix-Scheinwerfers [23]

Bei dem gezeigten Scheinwerfer wird die blendfreie Fernlichtfunktion durch einzeln ansteuerbare LEDs erzielt, die sich in fünf Reflektoren befinden. Durch gezieltes Ein- und Ausschalten der einzelnen LEDs entstehen Lücken mit einer Breite von etwa 1° in der Verteilung, die den Gegen- und Vorderverkehr ausblenden [25]. Situationsabhängig können dadurch mehrere Bereiche abgedunkelt werden, um andere Verkehrsteilnehmer nicht zu blenden und gleichzeitig dem Fahrer die bestmögliche Sichtweite zu garantieren. Dabei wird zusätzlich zum Abblendlicht ein partielles Fernlicht eingeschaltet. Dieses Funktionsprinzip wird in *Abbildung 2-6* schematisch dargestellt.

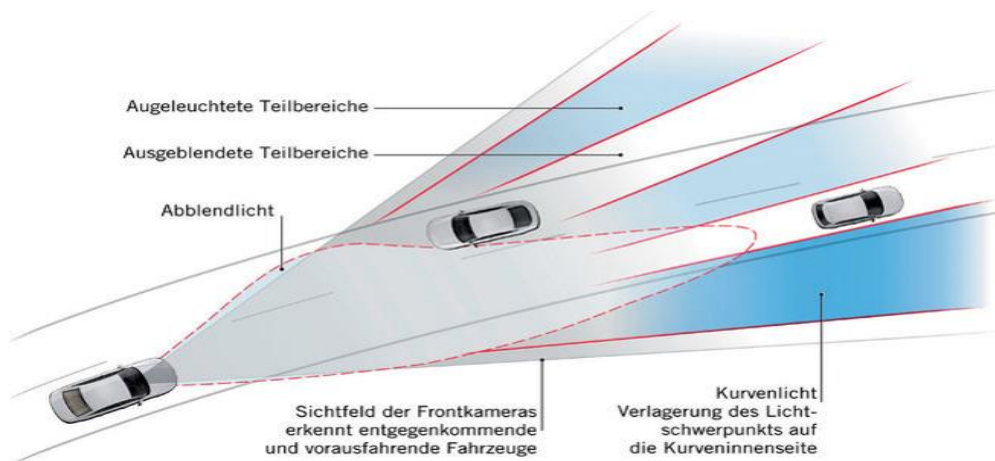


Abbildung 2-2: Funktionsprinzip von blendfreien Fernlichtsystemen [23] bei dem ein vorausfahrendes und ein entgegenkommendes Fahrzeug in der Lichtverteilung ausgeblendet werden – **grau:** Abblendlicht, **blau:** Fernlicht und **weiß:** ausgeblendeter Bereich

Bei dem gezeigten Scheinwerfer kommen insgesamt 25 LEDs zum Einsatz, die eine Vielzahl an ausgeblendeten Bereichen erzeugen können. Neuere Entwicklungen wie der Multibeam-LED Scheinwerfer von Mercedes Benz besitzen 84 LEDs für die Fernlichtfunktion (vgl. *Abbildung 2-3*)

die noch feinere und lichtstärkere Segmente ermöglichen, sodass die Auflösung auch im Randbereich erhöht werden kann und die Beleuchtungsstärke steigt [26].

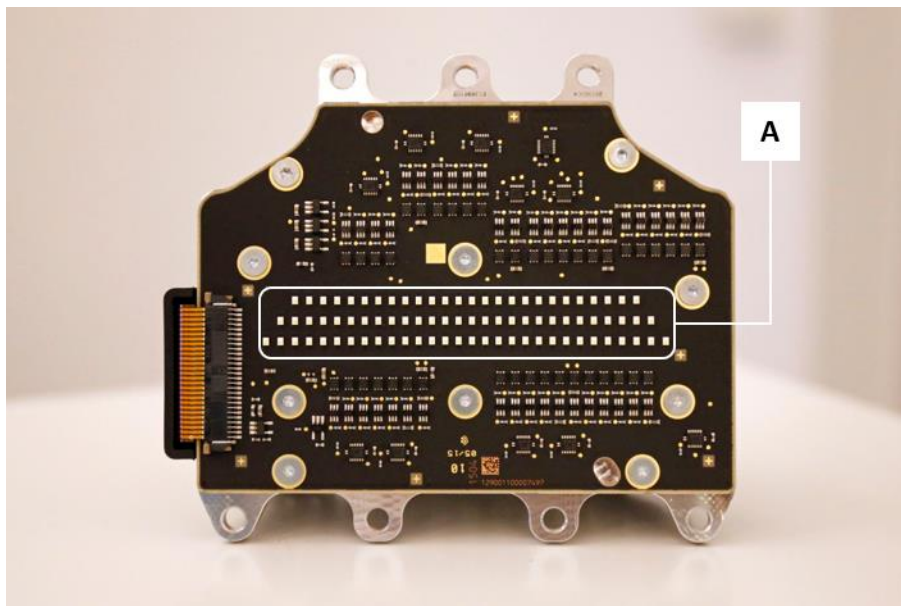


Abbildung 2-3: A: Platine mit den 84 LEDs für das blendfreie Fernlicht nach [27]

Aktuelle Forschungen beschäftigen sich mit Scheinwerfern, die mit 1024 LEDs ausgestattet sind, wodurch sich das Scheinwerferlicht sehr genau an die jeweiligen Verkehrssituationen anpassen kann und optimale Lichtverhältnisse herrschen können, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu blenden [28].

Eine alternative Möglichkeit zur Erzeugung von blendfreiem Fernlicht ist der mechanische Ansatz. Hierbei kommt ein Projektionsmodul zum Einsatz, das mit einer L-förmigen Blende beim linken Scheinwerfer und einem gespiegeltem Profil beim rechten, die Lücke in der Lichtverteilung erzeugt [29]. Eine horizontale Bewegung der Lücke, sowie eine Anpassung der Größe wird durch die Schrittmotoren des Kurvenlichtes erzeugt. Aufbaubedingt ist lediglich die Erzeugung einer Lücke möglich und wegen der mechanischen Bewegungen verursachter Verschleiß, ist das System auch fehleranfälliger [29].

Das mechanische System war das erste blendfreie System das auf dem Markt erschienen ist und wurde zu seiner Zeit vorwiegend mit HID-Entladungslampen betrieben. Wegen dem stetigem Vormarsch der LED in den letzten Jahren und der oben beschriebenen Fehleranfälligkeit des Systems, werden aktuelle blendfreie Fernlichtsysteme meist rein elektrisch mit LED-Matrizen realisiert. Die in der Arbeit untersuchten blendfreie Fernlichtsysteme basieren auf dem elektrischen Prinzip.

Neben dem Sicherheitsgewinn, den blendfreie Fernlichtsysteme dem Fahrer bieten, kann es bei Fahrten mit solchen Systemen passieren, dass der Fahrer durch retroreflektierende Verkehrszeichen geblendet wird. Der Grund hierfür wird im Folgenden näher erläutert.

2.1.2 Aufbau und Reflexionseigenschaften von Verkehrszeichen

Alle Verkehrszeichen sind retroreflektierend, weshalb das auftreffende Scheinwerferlicht wieder zurück an die Quelle bzw. den Fahrer reflektiert wird und dadurch Blendung verursachen kann. Maßgeblichen Einfluss auf die wahrgenommene Helligkeit bzw. Blendung der Verkehrszeichen haben ihre retroreflektierenden Eigenschaften. Diese werden aufgrund ihrer lichttechnischen Eigenschaften in drei Reflexionsklassen eingeteilt (RA1, RA2 und RA3), die durch den spezifischen Rückstrahlwert RA charakterisiert werden. Mit steigender Klasse erhöht sich auch der Rückstrahlwert. Dies hat zur Folge, dass immer mehr Licht zurück reflektiert wird und somit das Verkehrszeichen immer heller erscheint.

Das Einsatzgebiet der unterschiedlichen Reflexionsklassen hängt dabei von der Umfeldbeleuchtung ab, so wird beispielsweise auf Autobahnen, die viele externe Lichtquellen aufweisen, RA3 Schilder verwendet und auf Landstraßen eher RA2 [30]. Die Rückstrahlwerte der einzelnen Reflexionsklassen sind abhängig von der Farbe, dem Anleuchtungswinkel α und dem Betrachtungswinkel β des Verkehrszeichens. Eine Skizze der Messanordnung der Winkel ist in *Abbildung A-1* zu sehen. In *Tabelle 2-1* sind die Rückstrahlwerte der Reflexionsklasse RA3 beispielhaft dargestellt [31].

Tabelle 2-1: Mindest Rückstrahlwerte der Reflexionsklasse RA3 bei unterschiedlichen Anleuchtungswinkeln α und Beobachtungswinkel β [31]

	Rückstrahlwerte in $\text{cd}/\text{lx}\cdot\text{m}^2$			
	$\alpha=0,33^\circ$		$\alpha=1,5^\circ$	
	$\beta=5^\circ$	$\beta=40^\circ$	$\beta=5^\circ$	$\beta=40^\circ$
Weiß	300	30	15	1,5
Orange	150	15	7,5	1
Blau	19	2	1	Nicht festgelegt

Zu erkennen ist, dass mit größer werdendem Anleuchtungs- bzw. Betrachtungswinkel, der Rückstrahlwert sinkt. Der Grund hierfür ist eine gleichbleibende Helligkeit des Verkehrszeichens bei geringer werdendem Abstand zwischen Fahrer und Verkehrszeichen, um eine Überstrahlung bzw. Blendung zu vermeiden. Der Rückstrahlwert ist maßgebend für die Wahl der Reflexfolie, wobei jede Klasse (RA1 bis RA3) einen eigenen spezifischen konstruktiven Aufbau aufweist, der in *Abbildung 2-4* dargestellt ist.

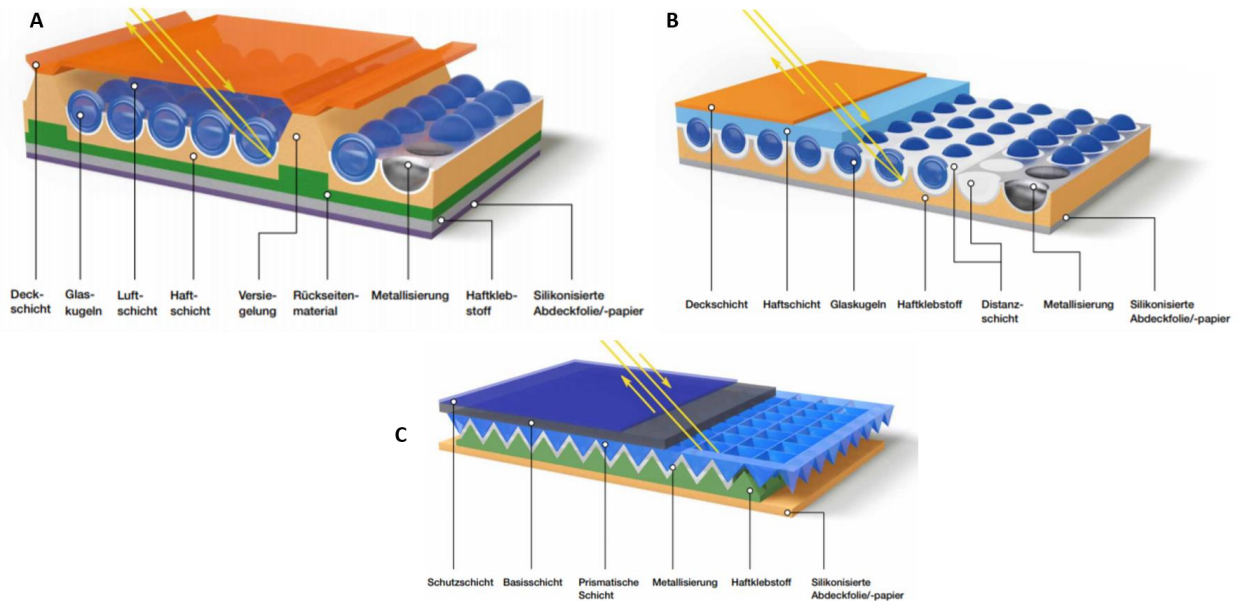


Abbildung 2-4: Aufbau einer Reflexfolie für Verkehrszeichen, **A:** eingebundene Mikroglasperlen Bauart RA1, **B:** eingekapselte Mikroglasperlen Bauart RA2 und **C:** Mikroprismen Bauart RA3 [32]

Bei der Bauart 1 und 2 (vgl. *Abbildung 2-4 A* und *B*) werden Mikroglasperlen verwendet, die dafür sorgen, dass einfallende Lichtstrahlen winkelunabhängig wieder zurück reflektiert werden. Der Unterschied der beiden Aufbauten besteht darin, dass bei den eingebundenen Mikroglasperlen unter der Deckschicht eine Schutzschicht ist, die dafür sorgt, dass das auftreffende bzw. zurückreflektierte Licht stark gestreut wird. Eine zusätzliche Streuung entsteht durch eine Schicht, in der die Glasperlen eingebunden sind. Bei der Bauart 3 (vgl. *Abbildung 2-4 C*) ist die Beschichtung soweit optimiert, dass das einfallende Licht möglichst verlustfrei zurückreflektiert wird. Dies wird durch die Verwendung von Mikroprismen erzielt, die einen Reflexionsverlust von ca. 4 % aufweisen, wodurch auch der höchste Rückstrahlwert erreicht wird. [32]

Im Folgenden wird auf Systeme eingegangen, die primär die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer reduzieren. Hierzu gehört die Leuchtweitenregelung und die Scheinwerferreinigungsanlage, auf die im Nachfolgenden näher eingegangen wird.

2.1.3 Die Scheinwerferreinigungsanlage

Um eine Verschmutzung der Scheinwerfer vorzubeugen, die zu einer möglichen verringerten Sichtweite und Blendung von anderen Verkehrsteilnehmern führen kann, wurde die Scheinwerferreinigungsanlage (Abk.: SRA) eingeführt. Die SRA wird anhand der United Nations Economic Commission for Europe (Abk.: UNECE) Nr. 48 bei allen Scheinwerfern eingesetzt, die im Abblendlicht eine Lichtquelle mit über 2000 lm verwenden [33]. Anhand der UNECE Regelung Nr. 45 soll die Scheinwerferreinigungsanlage den Bereich des Scheinwerfers abdecken, in dem das Abblendlicht austritt und lediglich optional den Fernlichtbereich [34]. Diese soll eine Effizienz von mindestens 70 % aufweisen und bis zu einer Geschwindigkeit von 130 km/h funktionieren. Aktuell auf dem Markt befindliche Systeme verwenden eine Druckreinigung, die mit Waschdüsen eine Reinigungsflüssigkeit mit hohem Druck (ca. 3 bis 5 Bar) auf den Scheinwerfer spritzen [35].



Abbildung 2-5: Frontansicht einer Scheinwerferreinigungsanlage die nach dem Prinzip der Druckreinigung funktioniert [36]

Die Druckreinigung erfolgt in den meisten Fällen in einem doppelten Zyklus d.h. bei Auslösung wird im ersten Zyklus der Schmutz auf- bzw. eingeweicht und 200 ms verzögert im zweiten Zyklus, der Schmutz weggespült. Eine Auslösung der SRA erfolgt herstellerabhängig und ist in den meisten Fällen mit der Frontscheibenreinigungsanlage verknüpft, wodurch der Fahrer von der Beurteilung der Scheinwerferverschmutzung entlastet wird. Hierbei wird nach jedem dritten oder fünften Zyklus der Frontscheibenreinigung die SRA angesteuert, wodurch auch eine gewisse Wasserersparnis erzielt wird. Ältere Scheinwerferreinigungsanlagen verwenden Scheibenwischer, um den Schmutz zu entfernen. Dies ist allerdings nur möglich, wenn die Abschlusscheibe des Scheinwerfers aus Glas besteht und eine ebene Oberfläche aufweist. Moderne Scheinwerfer hingegen besitzen eine Abschlusscheibe aus Polycarbonat, das durch die Scheibenwischer zerkratzen kann und sind meist aerodynamisch geformt, wodurch der Scheibenwischer sie nicht komplett reinigen kann. Die Verschmutzung der zu prüfenden Scheinwerfer wird durch Normschmutz durchgeführt, wodurch die Reinigungswirkung der SRA unter realen Bedingungen kleiner ausfällt als bei den Prüfbedingungen. Realer Schmutz ist meist in mehreren Lagen angetrocknet und haftet zäher als Normschmutz [37]. Die Reinigungswirkung wird relativ im Punkt 50R gemessen und muss mindestens 70 % betragen.

Im Folgenden wird auf die Leuchtweitenregelung näher eingegangen, deren Einbau im Scheinwerfer ebenfalls vom Lichtstrom abhängig ist.

2.1.4 Die Leuchtweitenregelung

Fahrzeugscheinwerfer sind fest mit der Karosserie des Fahrzeuges verbunden und werden im Allgemeinen danach ausgerichtet bzw. eingestellt. Stellt sich eine Situation ein, bei der das Fahrzeug beispielsweise beladen wird, so federt es an der Hinterachse ein und verändert demzufolge seinen Nickwinkel in Abhängigkeit zur Straße. In *Abbildung 2-6* wird diese Situation schematisch veran-

schaulich. Für den unbeladenen Fall, befindet sich die HDG auf der Grundeinstellung und verursacht demzufolge keine Blendung beim entgegenkommenden Verkehr (B50L¹). Im beladenen Fall dagegen federt das Fahrzeug auf der Hinterachse ein, wodurch die HDG nach oben verschoben wird und somit den entgegenkommenden Verkehr blenden kann.

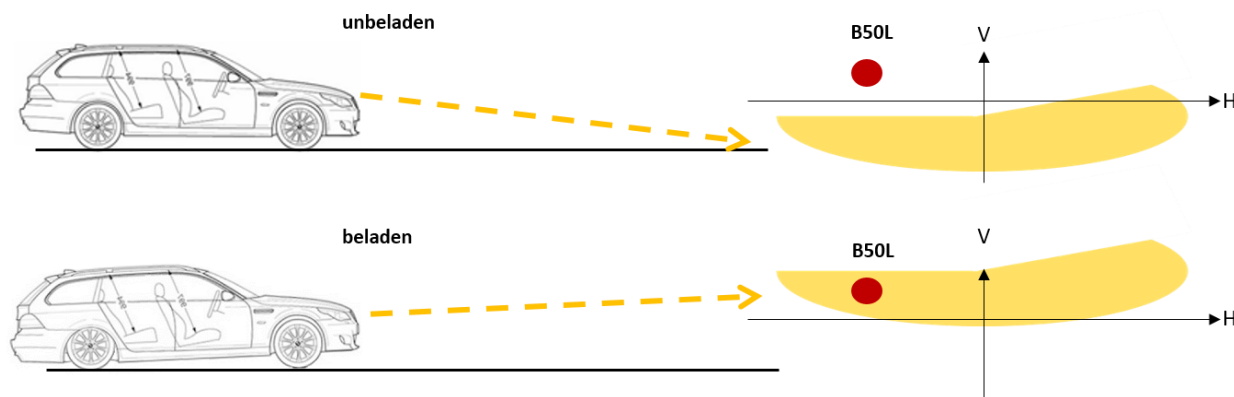


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung der beladungsabhängigen Nickwinkeländerung, **oben:** keine Beladung und keine Blendung des Gegenverkehrs, **unten:** Beladen und potentielle Blendung anderer Verkehrsteilnehmer

Eine Änderung des Nickwinkels kann ebenfalls durch Straßenunebenheiten und Beschleunigungsvorgänge hervorgerufen werden. In der UNECE Regelung Nr. 48 [33] wird die Leuchtweitenregelung (Abk.: LWR) vorgeschrieben, die Nickbewegungen des Fahrzeuges ausgleicht, indem die Höhe der Hell-Dunkel-Grenze und damit des gesamten Lichtkegels, in Abhängigkeit des Fahrzeugnickwinkels nachgeregelt werden. Es wird zwischen drei Varianten, der manuellen, der automatischen und der dynamischen LWR unterschieden, die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden.

Manuelle Leuchtweitenregelung

Die manuelle LWR wird vom Fahrer mit Hilfe eines Reglers betätigt, um Änderungen des Fahrzeugnickwinkels durch Beladung auszugleichen. Hierbei hat der Fahrer die Möglichkeit, die Scheinwerferneigung bzw. die Lage der HDG in der Regel in vier Höhenstufen einzustellen. Die erste Stufe entspricht der Scheinwerfergrundeinstellung und wird für unbeladene Fahrzeuge mit lediglich dem Fahrer auf dem Fahrersitz verwendet. Stufe zwei der manuellen LWR wird verwendet, falls sich ein Fahrer und ein Beifahrer im Fahrzeug befinden. Die dritte Stufe wird laut UNECE Regelung Nr. 48 verwendet, falls alle Sitzplätze im Fahrzeug besetzt sind. Die vierte und letzte Stufe soll verwendet werden, falls alle Sitzplätze und der Kofferraum vollständig und gleichmäßig beladen sind und dabei die zulässige Hinterachs- bzw. Vorderachslast nicht überschritten wird. Jede Stufe senkt demzufolge den Lichtkegel in Abhängigkeit von der Beladung des Fahrzeuges.

¹ B50L: Ein vom Gesetzgeber festgelegter Messpunkt bei der Erstprüfung des Scheinwerfers, der den Fahrer des entgegenkommenden Verkehrs in 50 m Entfernung repräsentiert. Er dient zur messtechnischen Bestimmung der Blendung.

Hierbei bewegt ein Schrittmotor das komplette Lichtmodul, das sich im Scheinwerfer befindet. Der Regelbereich ist hierbei in der UNECE Regelung Nr. 48 definiert und basiert auf der maximalen, statischen Beladung eines Fahrzeuges. Die manuelle LWR ist bei Fahrzeugen mit einer Erstzulassung ab dem 01.01.1990 vorgeschrieben. [33]

Automatische Leuchtweitenregelung

Da nach JEBAS et al. [38] viele Fahrer die manuelle LWR so gut wie nie bedienen, wurde die automatische Leuchtweitenregelung (Abk.: aLWR) eingeführt. Diese wird für Kfz-Scheinwerfer, die mit einer Lichtquelle für Abblendlicht über 2000 Lumen ausgestattet sind, vorgeschrieben [33]. Von dieser Regelung sind Scheinwerfer mit LED-Lichtquellen ausgeschlossen, die unabhängig vom erzeugten Lichtstrom, eine aLWR verbaut haben müssen. Hierbei messen, je nach Automobilhersteller, zwischen einem und vier Sensoren den Abstand zwischen der Fahrzeugkarosserie und der Radaufhängung und übermitteln diesen an ein Steuergerät. Bei kompakten Fahrzeugen ohne langen Radstand wird beispielsweise auf die Sensoren der Vorderachse verzichtet, da ein großer Teil der Neigungsänderungen an der Hinterachse auftritt. Das Steuergerät ermittelt aus den Daten der Sensoren den Fahrzeugnickenwinkel und passt die vertikale Lage der HDG mit Hilfe eines Schrittmotors dementsprechend an. Durch die hohe Anzahl an Regelvorgängen innerhalb eines Fahrzeuglebens sind berührungslos arbeitende Schrittmotoren für diesen Einsatz besonders geeignet. Nachteil der Schrittmotoren ist allerdings der Initialisierungsvorgang bei jedem Systemstart durch ein einmaliges Fahren an den unteren Anschlag [37]. Um ungewollte Fehleinstellungen von zum Beispiel Bodenunebenheiten oder sogar von den Motorvibrationen zu vermeiden, werden Algorithmen zur Datenglättung verwendet [39]. Die aLWR reagiert dadurch verzögert auf Neigungsänderungen und wird lediglich zum Ausgleich der Fahrzeugneigung bei Beladungen verwendet.

KASABA [40] stellte ein alternatives System vor, mit dem die Fahrzeugneigung nicht durch konventionelle Abstandssensoren, sondern mit einem Beschleunigungssensor bestimmt werden kann. Dieser soll kleiner, leichter und kostengünstiger sein als die aktuell verwendeten Abstandssensoren. Mit dem Beschleunigungssensor ist es möglich, die dynamischen Fahrzeugnickenbewegungen zu berechnen. Als Referenz wird hierbei die Fahrzeugachse verwendet und mittels des Tangenssatzes und der Sensordaten, die Fahrzeugneigung berechnet. Die statischen Nickbewegungen, z.B. durch Beladung werden durch einen Gravitationsbeschleunigungssensor ermittelt. Hierbei werden die Sensordaten miteinander verglichen und somit eine mögliche Beladung festgestellt. [40]

Dynamische Leuchtweitenregelung

Die dynamische Leuchtweitenregelung (Abk.: dLWR) reagiert zusätzlich zur Beladungsabhängigkeit der aLWR auch auf Änderungen der Fahrzeugdynamik. Hierzu zählen beispielweise Beschleunigungs- und Abbremsmanöver sowie Fahrbahnunebenheiten, die eine Veränderung der Fahrzeugneigung zur Folge haben können. Hierbei gleicht die dLWR die Nickbewegungen, dynamisch während der Fahrt aus und hält die HDG auf deren Grundeinstellung (vergleichbar mit Stufe 0 für unbeladene Fahrzeuge der manuellen LWR). Die Berechnungen zur Regelung der HDG basieren dabei auf Analyse von Daten des Rad-Drehzahlsensors (Geschwindigkeit des Fahrzeuges) und der Sensoren, welche die Fahrzeugneigung detektieren [41]. Die Geschwindigkeit der Regelung sowie

die Latenzzeiten des Systems sind nicht vorgeschrieben und werden deshalb von jedem Automobilhersteller individuell eingestellt. Die gesetzlichen Anforderungen der dLWR basieren auf jene der aLWR in der Regelung Nr. 48 der UNECE [33].

Die Einführung der beiden vorgestellten Systeme, LWR und SRA, dient primär der Vermeidung der Blendung und werden deshalb aus Sicht des Gesetzgebers bei Scheinwerfern mit einem Lichtstrom über 2000 lm verbaut. Um die Hintergründe der Blendung besser zu verstehen, wird im Folgenden auf die Adaptation des menschlichen Auges näher eingegangen, da diese die Blendung maßgeblich beeinflusst.

2.2 Die Adaptation des menschlichen Auges

Das Anpassen des menschlichen Sehsystems an die im Gesichtsfeld herrschende Leuchtdichte, wird als Adaptation bezeichnet. Hierbei ist die Adaptationsleuchtdichte bzw. Umgebungsleuchtdichte L_U direkt mit der Leistungsfähigkeit des menschlichen Auges gekoppelt [42]. Mit zunehmender Adaptationsleuchtdichte steigt auch die Sehschärfe an [43], wodurch bei niedrigen Leuchtdichten kleine Änderungen in der Adaptationsleuchtdichte, einen starken Einfluss auf den Visus haben. Das visuelle System kann sich dabei an stark unterschiedliche Umgebungshelligkeiten anpassen, eine Fähigkeit, die als Hell- bzw. Dunkeladaptation bezeichnet wird. Diese liegt nach DAMASKY [44] in Bereich von 10^{-8} cd/m² bis 10^6 cd/m², wobei die für den nächtlichen Straßenverkehr relevante mesopische Adaptation im Bereich von 10^{-3} cd/m² bis 10^2 cd/m² liegt [45]. Die Grenzen dieses Bereiches werden allerdings in der Literatur unterschiedlich definiert. Eine Übersicht der verschiedenen Grenzen der Literatur zeigt SCHÄFER [46]. Ein möglicher Grund für die unterschiedlichen Grenzbereiche ist, dass die Adaptation an die Leuchtdichtebedingungen der Umgebung aus verschiedenen Mechanismen zusammensetzt wird, die fließend ineinander übergehen. Hierzu zählt die Iris des Auges, die ihren Durchmesser d in einem Bereich von 2 mm bis 8 mm verändern kann und so den ins Auge eintretenden Lichtstrom reduziert, sobald höhere Leuchtdichten auftauchen. Ein anderer Mechanismus findet direkt in der Netzhaut statt, bei der durch photochemische und neuronale Anpassungsprozesse, die Empfindlichkeit des visuellen Apparates angepasst wird [47]. Hierbei wird bei Umgebungsleuchtdichten kleiner als etwa 100 cd/m² zwischen den beiden Empfängertypen der Netzhaut, Zapfen und Stäbchen, umgeschaltet. Die Zapfen sind für das Sehen am Tag sowie das Farbsehen verantwortlich und weisen die höchste Dichte unter einem Beobachtungswinkel von $\theta = 0^\circ$ auf [48]. Die Stäbchen dagegen weisen ihre maximale Empfindlichkeit in dunkler Umgebung auf, besitzen eine deutlich höhere Absolutempfindlichkeit, ermöglichen jedoch nur ein Schwarz-Weiß Sehen. Die maximale Anzahl der Stäbchen ist unter einem Beobachtungswinkel von etwa $\theta \approx \pm 17^\circ$ bis $\pm 20^\circ$ anzutreffen [48]. In den ersten Minuten der Dunkeladaptation sind die Zapfen dominant, die nach etwa 7 bis 8 Minuten ihre Empfindlichkeitsschwelle bei etwa 10^{-3} cd/m² erreicht haben und keinen Beitrag mehr am Sehprozess leisten (vgl. *Abbildung 2-7*). Die Stäbchen erreichen ihre maximale Empfindlichkeit bei etwa 10^{-6} cd/m² nach etwa 30 bis 60 Minuten [49].

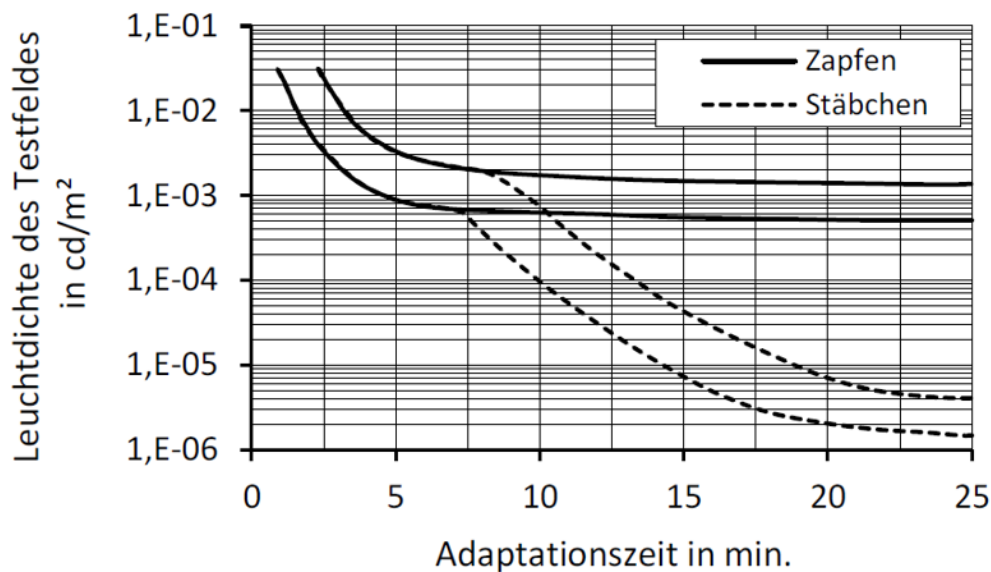


Abbildung 2-7: Dunkeladaptation der Zapfen und Stäbchen, dargestellt sind die obere und untere Grenze der interpersonellen Abweichung [49]

Im Gegensatz zur Dunkeladaptation verläuft die Helladaptation im Bereich einiger Sekunden bis hin zu einer Minute deutlich schneller [50].

Im nächtlichen Straßenverkehr wird somit der Adaptationszustand des Fahrers maßgeblich durch die Leuchtdichteverteilung festgelegt, die durch die Scheinwerfer und die Reflexionseigenschaften des Straßenraumes erzeugt werden. Durch die Scheinwerfer des Gegenverkehrs wird eine temporäre Erhöhung des Adaptationszustandes verursacht, der durch Lichtpulse von auftretenden Fahrbahnunebenheiten noch weiter beeinflusst wird. So benötigt das Auge eine gewisse Readaptationszeit nach dem Begegnungsfall bzw. Lichtpuls, um auf das ursprüngliche Adaptationsniveau zu gelangen. Die Readaptation kann bis zu einige Sekunden dauern und ist abhängig von der Beleuchtungsstärke, der Dauer und dem Blickverhalten [51]. Während dieser Zeit kommt es wegen der erhöhten Adaptationsleuchtdichte zu einer verringerten Wahrnehmung, da sich der Kontrast zwischen einem Objekt und seiner Umgebung verringert (vgl. Kapitel 2.3.1). Die Readaptation tritt folglich nach einer Blendung im Auge auf, die im Weiteren näher beschrieben und analysiert wird.

2.3 Blendung

Blendung wird in der DIN Norm als „unangenehmer Sehzustand durch ungünstige Leuchtdichteverteilungen oder hohe Kontraste“ definiert [52]. Die internationale Beleuchtungskommission mit dem Namen „Commission Internationale de l'Éclairage“ (Abk.: CIE) definiert in ihrem internationalem Wörterbuch der Lichttechnik Blendung folgendermaßen [53]:

„Condition of vision in which there is discomfort or a reduction in the ability to see details or objects, caused by an unsuitable distribution or range of luminance, or by extreme contrasts“

Demzufolge wird Blendung generell als Sehzustand definiert. Als Ursachen werden extreme Kontrastverhältnisse, ungeeignete Leuchtdichteverteilungen und Leuchtdichteumfänge genannt [53].

Die Wirkung äußert sich anhand der CIE in einer physiologischen und einer psychologischen Blendung, die wie folgt definiert sind [53]:

Psychologische Blendung (engl. „Discomfort glare“):

„Glare that causes discomfort without necessarily impairing the vision of objects“

Physiologische Blendung (engl. „Disability glare“):

„Glare that impairs the vision of objects without necessarily causing discomfort“

Demnach wird zwischen einem Sehzustand unterschieden, in dem man sich unwohl fühlt und in einem Sehzustand in dem eine reduzierte Fähigkeit, Details und Objekte zu erkennen, herrscht. Diese Unterteilung der Blendung wurde erstmals in einer wissenschaftlichen Literatur im Jahre 1910 von PARSONS [54] beschrieben. Im Folgenden werden die beiden Arten der Blendung vorgestellt und erläutert, um ein besseres Verständnis für die Untersuchungen und deren Ergebnisse zu ermöglichen.

2.3.1 Die physiologische Blendung

Die physiologische Blendung ist, wie zuvor angesprochen, ein Sehzustand, in dem eine oder mehrere Lichtquellen im Gesichtsfeld zu einer messbaren Reduzierung der Sehleistung führen. Der Grund hierfür ist, dass durch die Lichtquellen Streulicht im Auge entsteht, welches das eigentliche Bild auf der Netzhaut überlagert und somit die Kontrastempfindlichkeit verringert [55]. Dies hat eine messbare Reduzierung der Sehleistung zur Folge, die nach LINDNER [56] durch zwei Prozesse verursacht wird. Beim ersten Prozess wird die Empfindlichkeit der gesamten Netzhaut reduziert, die umso größer ist, je näher die Blendquelle zur Sehachse ist. Beim zweiten Prozess entsteht das Streulicht durch Brechungen an den Grenzflächen des Auges, die das Abbild des betrachteten Gegenstandes überlagert [56] (vgl. *Abbildung 2-8*). Die eben erwähnte Brechung wird durch den dimensionslosen Brechungsindex beschrieben, der die optische Materialeigenschaft vorgibt. Der Brechungsindex gibt an, um welchen Faktor die Wellenlänge sowie die Phasengeschwindigkeit des Lichtes kleiner sind als im Vakuum. Der Brechungsindex ist demzufolge für die Entstehung des Streulichtes im Auge verantwortlich. Beim menschlichen Auge tragen verschieden Brechungsindices zur optischen Abbildung bei, wie die Hornhaut mit einem Wert von 1,376, das Kammerwasser und der Glaskörper mit 1,336, die Linse mit 1,385-1,406 und der Glaskörper mit 1,336 [57]. In *Abbildung 2-8* ist die Entstehung des Streulichtes schematisch dargestellt. Der Winkel θ gibt dabei den Winkel der Blendquelle zur optischen Sehachse an und die Buchstaben a bis e das entstehende Streulicht aus den unterschiedlichen Augenmedien.

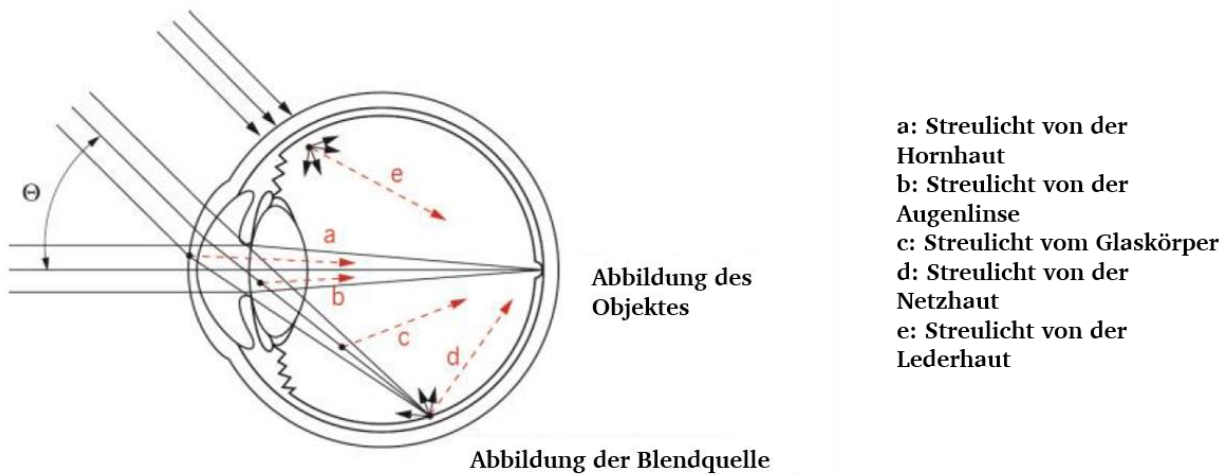


Abbildung 2-8: Entstehung von Streulicht in Folge von Blendung nach VÖLKER [58]

Die Brechungen an den unterschiedlichen Augenmedien sowie Trübungen der Linse verursachen einen Schleier der sich auf die Netzhaut legt und die Abbildung des betrachteten Objektes überlagert. Da das Auge auf die Umgebung adaptiert ist, dominiert auf der Netzhaut die Umgebungsleuchtdichte L_U die von dem durch Streulicht produziertem Schleier überlagert wird. Diese Überlagerung führt zu einer Kontrastreduzierung und folglich zu einer Beeinträchtigung der Sehleistung. Um nun ein Objekt mit seiner Leuchtdichte wahrnehmen zu können, muss zwischen der Umgebungsleuchtdichte L_U und der Objektleuchtdichte L_O eine bestimmte Differenz ΔL vorliegen. Falls die Leuchtdichte im Gesichtsfeld durch eine Blendquelle erhöht wird, muss die Differenz ΔL ebenfalls größer werden, um das Objekt weiterhin wahrnehmen zu können. Dieser Zusammenhang lässt sich durch den Weber-Kontrast K_W nach Gleichung (2-1) erklären.

Weber-Kontrast ohne Blendung:

$$K_W = \frac{L_O - L_U}{L_U} \quad (2-1)$$

Der Weber-Kontrast nach Gleichung (2-1) wird auch als maßgebliche Größe im mesopischen Bereich genannt, um ein Objekt wahrnehmen zu können [59]. Beim Erscheinen einer Blendquelle ändert sich der Weber-Kontrast nach Gleichung (2-2) und (2-3), da sich die Schleierleuchtdichte sowohl über das Objekt als auch über die Umgebung legt bzw. hinzuaddiert.

Weber-Kontrast mit Blendung:

$$K_{W,B} = \frac{(L_O + L_{s\ddot{a}q}) - (L_U + L_{s\ddot{a}q})}{L_U + L_{s\ddot{a}q}} \quad (2-2)$$

$$K_{W,B} = \frac{L_O - L_U}{L_U + L_{s\ddot{a}q}} \quad (2-3)$$

Nach Gleichung (2-3) verringert sich der Kontrast eines Objektes zu seiner Umgebung beim Auftreten einer Blendquelle. Demzufolge ist das Objekt schlechter zu erkennen. Im Allgemeinen wird der Kontrast, bei dem ein Objekt mit einer Wahrscheinlichkeit von $p = 50\%$ gerade von seiner Umgebung zu unterscheiden ist, als Schwellenkontrast $K_{W,th}$ nach Gleichung (2-4) bezeichnet [60].

Schwellenkontrast:
$$K_{W,th} = \frac{\Delta L}{L_U} \quad (2-4)$$

Für den Fall, dass ein Objekt gerade von seiner Umgebung erkannt werden kann und im Anschluss eine Blendung eintritt, reduziert sich der Kontrast nach (2-3) und das Objekt ist nicht mehr sichtbar. Um das Objekt wieder sichtbar zu machen, muss die Differenz zwischen der Objektleuchtdichte und der Umgebungsleuchtdichte erhöht und somit auch der Kontrast erhöht werden. Diese Differenz, auch Schwellenleuchtdichtedifferenz genannt, wurde zusammen mit der äquivalenten Schleierleuchtdichte $L_{säq}$ nach Gleichung (2-5) von HOLLADAY [55] eingeführt.

Äquivalente Schleierleuchtdichte:
$$L_{säq} = k \cdot \frac{E_B}{\theta^n} \quad (2-5)$$

E_B ist dabei die am Auge gemessene Blendbeleuchtungsstärke, θ der Blendwinkel und k ein Faktor, für die individuelle Blendempfindlichkeit der jeweiligen Person. Die Blendempfindlichkeit variiert mit dem Alter, da die Linse mit zunehmendem Alter vergilbt und somit für mehr Streulicht bzw. eine höhere äquivalente Schleierleuchtdichte im Auge sorgt [61]. Die Gleichung (2-5) wird aufgrund des Beitrages von STILES auch die STILES-HOLLADAY Gleichung genannt [62]. Von HOLLADAY [55] wurde der Faktor k mit einem Wert von $4,3 \pm 0,5$, und der Exponent n mit einem Wert von 2 angegeben, wobei im Laufe der folgenden Jahre unterschiedliche Modelle erschienen sind, die den Faktor k , den Exponenten n sowie die unterschiedlichen Blendwinkel θ beschreiben. Alle Ergebnisse zusammengenommen, lässt sich durch die heutige CIE-Formel, die verallgemeinerte äquivalente Schleierleuchtdichte nach Gleichung (2-6) angeben [63].

Äquivalente Schleierleuchtdichte nach CIE:
$$L_{säq} = E_B \cdot \left\{ \frac{10}{\theta^3} + \left[\frac{5}{\theta^2} + \frac{0,1 \cdot p}{\theta} \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{Alter}{62,5} \right)^4 \right] + 0,0025 \cdot p \right\} \quad (2-6)$$

Die Formel ist in einem Winkelbereich von $0,1^\circ$ bis 100° gültig und berücksichtigt mit dem Wert p auch die Pigmentierung der Augen. Dieser hat einen Wert von 0 für schwarze Augen bis hin zu Augen mit geringer Pigmentierung (blaue Augen) von 1,2.

Die Formel nach (2-6) kann für kleinere Winkel vereinfacht werden.

Äquivalente Schleierleuchtdichte nach CIE:
$$L_{säq} = E_B \cdot \left\{ \frac{10}{\theta^3} + \left[\frac{5}{\theta^2} \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{Alter}{62,5} \right)^4 \right] \right\} \quad (2-7)$$

Die Gleichung (2-7) ist in einem Winkelbereich von $0,1^\circ$ bis 30° gültig. Der Altersfaktor k hat eine besonders wichtige Bedeutung in der Gleichung, da mit dem Alter eine Reihe physiologischer Veränderungen eintritt, die zur Beeinträchtigung der Wahrnehmungsleistung führen kann [58]. Dazu gehört einerseits eine verschlechterte Adaptationsfähigkeit des Auges, wegen einer geringeren Flexibilität der Pupille, und andererseits eine Trübung und Vergilbung der Linse. Blautöne sehen somit für ältere Menschen dunkler aus, weshalb Licht mit einem höheren Anteil an kurzwelligem Spektrum von älteren Menschen weniger stark blendend empfunden wird [58].

Als Kritikpunkt der beiden Gleichungen (2-5) und (2-7) wird die Übertragbarkeit auf reale Verkehrssituationen betrachtet. Bei der Gleichung nach HOLLADAY (vgl. (2-5)) beschreibt der Exponent n eine quadratische Abhängigkeit des Blendwinkels, die sich mit abnehmendem Abstand, mit der quadratischen Reduzierung der Beleuchtungsstärke aufheben würde. Somit würde ein Scheinwerfer, unabhängig von der Entfernung immer gleich stark blenden. Bei der Gleichung nach der CIE ist sogar eine kubische Abhängigkeit, weshalb eine noch schlechtere Übereinstimmung mit Realitätsbedingungen die Folge wäre. Außerdem ist bei der verallgemeinerten CIE Gleichung nach (2-6) der Gültigkeitsbereich des Blendwinkels zu kritisieren, der bis zu einem Winkel von 100° reicht und demzufolge hinter dem Fahrer eine Blendung verursachen würde. Aus dem Grund beschäftigen sich einige Forschungsarbeiten mit der Anpassung des Exponenten n auf reale Verkehrssituationen und geben Werte zwischen 0,5 und 3 an (vgl. [55], [63], [64]). Das Bestreben dieser Arbeit liegt darin, unter dynamischen Bedingungen diesen zu verifizieren.

2.3.2 Die psychologische Blendung

Im Gegensatz zur physiologischen ist die psychologische Blendung messtechnisch weder quantifizierbar noch optisch nachweisbar [65]. Es ist demzufolge ein rein subjektiver Eindruck, der als Sehzustand definiert ist, bei dem es zu einem Unwohlsein kommt und bewirkt einen eingeschränkten Sehkomfort bei der geblendeten Person [53]. Obwohl das Sehvermögen nicht zwingend beeinträchtigt wird, kann die psychologische Blendung den Fahrer erschrecken, verwirren, belasten und zur vorzeitigen Müdigkeit führen [66]. Verantwortlich für die psychologische Blendung ist, genau wie bei der physiologischen, die Blendbeleuchtungsstärke, der Blendwinkel und der Adaptationszustand. Als eine Möglichkeit zur Erfassung der psychologischen Blendung wird in der Literatur die „Grenze zwischen Komfort und Unbehagen“ zu Englisch „borderline between comfort and discomfort“ (Abk.: BCD) verwendet [67]. Ein Nachteil dieser Methode besteht jedoch darin, dass die BCD genau und eindeutig definiert sein muss. Zudem muss der Proband den Blendreiz selbst einstellen können, da die Ergebnisse sonst verfälscht werden [68]. Aufgrund dieser Nachteile der BCD wird in der Kfz-Lichttechnik meist die subjektive Bewertung auf einer Skala nach DE BOER erfasst [69]. Diese Skala besteht aus neun Stufen, von denen jede zweite beschriftet ist [68]. Die folgende Abbildung zeigt die englische Version der de Boer Skala, wie sie 1967 veröffentlicht wurde.

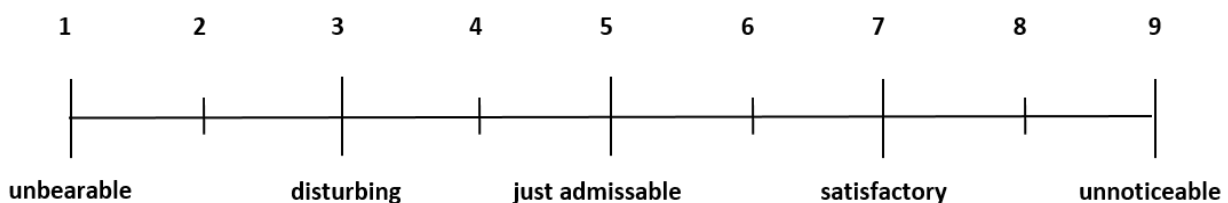


Abbildung 2-9: Neun stufige de Boer Skala nach DE BOER [68]

Die Skala beschreibt demnach mit ihrer kleinsten Zahl das größte Blendempfinden und mit der größten Zahl das geringste. Dieser Umstand hat dazu geführt, dass Probanden die Skala nicht intuitiv benutzen konnten und somit die Ergebnisse verfälscht wurden. Die inverse de Boer Skala

bietet dagegen eine natürliche Intensitätsbeschreibung dar und wurde bereits mehrfach angewendet (vgl. z.B. [15]). Mit dieser Thematik haben sich beispielsweise auch GELLATLY et al. [70] befasst und herausgefunden, dass 75 % der untersuchten Probanden die inverse Skala bevorzugen.

In den Feldtests der vorliegenden Arbeit wurde aus dem Grund die inverse de Boer Skala verwendet, um mittels Fragebögen die psychologische Blendung von den Probanden in Erfahrung zu bringen.

2.3.3 Stand des Wissens

Aus den vorherigen Absätzen zur psychologischen und physiologischen Blendung lässt sich zusammenfassen, dass durch Blendung drei Effekte hervorgerufen werden: Einschränkung der Sehleistung, Ablenkung der Aufmerksamkeit sowie Unwohlsein. Die Effekte entstehen im Wesentlichen unabhängig voneinander und als Folge dessen können psychologische und physiologische Blendung als unabhängige Erscheinungen betrachtet werden, obwohl sie häufig gemeinsam auftreten. Im Folgenden werden bisherige Forschungsthemen zum Thema Blendung vorgestellt, die in drei Gruppen aufgeteilt werden: Laboruntersuchungen, statische und dynamische Kfz Feldtestuntersuchungen.

2.3.3.1 Laboruntersuchungen

Forschungen zum Thema Blendung im Allgemeinen und im Automobilbereich haben in den letzten Jahren an Wichtigkeit gewonnen, insbesondere nach der Einführung von neuen Leuchtmitteln wie beispielsweise HGL, HID, LED und Laser aber auch nach der Einführung von neuen Technologien wie es die blendfreien Fernlichtsysteme sind. Hierbei wurden Methoden erforscht, die beiden Blendungsarten zu quantifizieren und Korrelationen abzuleiten.

Beginnend mit der psychologischen Blendung zeigte BOCKELMANN [71], dass diese nicht nur von der Leuchtdichte der Blendquelle abhängt, sondern auch von der Umgebungsleuchtdichte und von der Größe der jeweiligen Blendquelle. Die psychologische Blendung nimmt somit mit kleiner werdender Entfernung bzw. abnehmender Lichtaustrittsfläche zu. Eine Verringerung kann erzielt werden, indem der Kontrast zwischen Blendquelle und Umgebung reduziert wird und zwar entweder „indem die Leuchtdichte der Quelle verringert oder diejenige der Umgebung erhöht wird.“ Des Weiteren gelingt eine Reduzierung der psychologischen Blendung durch Vergrößerung der „Quellenabmessungen oder dadurch, dass die Blendquelle aus der Sichtlinie fortbewegt wird.“ [71]

Neben der Abhängigkeit der psychologischen Blendung von der Größe und der Umgebungsleuchtdichte fanden SIVAK et al. [72] einen Zusammenhang der psychologischen Blendung in Form der de Boer Bewertung mit der Beleuchtungsstärke. Hierbei wurde festgestellt, dass für Blenddauern zwischen 0,125 s und 2 s, eine höhere Korrelation auftritt. Ebenfalls bestätigten SIVAK et al. die Ergebnisse von BOCKELMANN [71], dass eine Vergrößerung der Blendquelle zu einem höheren Komfort beiträgt und erklärte dies durch geringere Leuchtdichten bei konstant bleibenden Beleuchtungsstärken. Gleichzeitig wurde aber auch festgestellt, dass eine Vergrößerung der Blendquelle im Bereich von 0,3° bis 0,6° einen geringen Einfluss auf die de Boer Bewertungen hat, wobei eine geringere Fläche zu einer größeren psychologischen Blendung beiträgt und somit als unangenehmer empfunden wird. [72]

Solange Position und Größe der Blendquelle unverändert bleiben, führen Maßnahmen zur Reduzierung der psychologischen Blendung, gleichzeitig auch zu einer Reduzierung der physiologischen Blendung. Allerdings verringert sich bei gleichbleibendem Lichtstrom und veränderter Größe der Quelle, die psychologische Blendung bei gleichbleibender physiologischer Blendung. Demzufolge sollten Kfz-Scheinwerfer eine möglichst große lichtaustretende Fläche aufweisen. Diese Aussage beruht auf einer Untersuchung, in der MANZ [73] feststellte, dass HID-Scheinwerfer eine höhere psychologische Blendung verursachen als vergleichbare HGL-Scheinwerfer, da die Austritts- bzw. Reflektorfläche bei HID-Scheinwerfern kleiner ist. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass „zur Erzielung gleicher Lichtstärken ein kleinerer Scheinwerfer, eine größere Beleuchtungsstärke besitzen muss“ und damit auch mit einer höheren psychologischen Blendung verbunden ist. [73]

SCHMIDT-CLAUSEN und BINDELS [74] fanden heraus, dass die de Boer Bewertungen bis 20 lx mit dem Logarithmus der Blendbeleuchtungsstärken korrelieren. Ebenfalls wurde festgestellt, dass die psychologische Blendung bei großen Winkeln zwischen 1° und 20° und höheren Umgebungsleuchtdichten im Bereich bis 15 cd/m² abnimmt. Die psychologische Blendung nach de Boer verändert sich um zwei Stufen, wenn sich die Blendbeleuchtungsstärken um eine Zehnerpotenz verändern. Für eine gegebene Blendbeleuchtungsstärke wurde von SCHMIDT-CLAUSEN [74] eine Gleichung entwickelt, die den psychologischen Blendeindruck W nach de Boer wie folgt wiedergibt. [74]

$$\text{Psychologische Blendung nach SCHMIDT-CLAUSEN} \quad W = 5 - 2 \cdot \log \frac{E_B}{0,003 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{L_U}{0,04}}\right) \cdot \theta^4} \quad (2-8)$$

Durch die Gleichung von SCHMIDT-CLAUSEN wurde eine Berechnungsmethode für die psychologische Blendung auf der de Boer Skala bereitgestellt und gleichzeitig ein Zusammenhang zwischen der physiologischen und psychologischen Blendung aufgezeigt. Allerdings wurde die Gleichung für ein bestimmtes Szenario und ein bestimmtes Lampenspektrum entwickelt und kann nicht ohne weiteres verallgemeinert werden.

Bislang existieren nur wenige Studien, die einen Zusammenhang zwischen psychologischer und physiologischer Blendung belegen. So haben beispielsweise THEEUWES und ALFERDINCK [75] herausgefunden, dass die Gleichung (2-8) nach SCHMIDT-CLAUSEN und BINDELS, in einer zu hohen Blendungsbewertung resultiert. Ein Zusammenhang zwischen den beiden Blendungsarten konnte über die Beleuchtungsstärke zwar festgestellt werden, allerdings nur bis zu einem Wert von 1,1 lx. Hierbei ist zu beachten, dass bei Blendungsbewertungen, die Schwierigkeit der jeweiligen Aufgabe einen maßgeblichen Einfluss hat und die Umgebungsleuchtdichte eine wichtige Rolle spielt. [75]

Ein weiterer bedeutsamer Unterschied in den beiden Blendungsarten besteht nach VOS [76] darin, dass bei geringen Hintergrundleuchtdichten, eine physiologische Blendung auftreten kann, während keine psychologische Blendung bemerkt wird. Andererseits kann ab einer ausreichend großer Umgebungsleuchtdichte, eine Blendquelle ein unangenehmes Empfinden hervorrufen, ohne dass eine physiologische Blendung eintritt. [76]

VOS [77] geht bei seinen Beschreibungen der physiologischen Blendung ausschließlich von Streueffekten aus, weshalb die Vermutung naheliegt, dass diese Blendungsart wellenlängenunabhängig ist. Bei der Kfz-Lichttechnik wurde schon lange vor der Einführung der HID-Scheinwerfer

die Frage gestellt, inwieweit die spektrale Leistungsverteilung der Scheinwerfer einen Einfluss auf die physiologische Blendung hat. So verglich SCHREUDER [78] im Jahr 1956 weiße und gelbe Scheinwerfer und fand einen geringen Unterschied hinsichtlich deren Blendung. Da ein blau beleuchtetes Objekt schwer scharf gesehen werden kann und blaues Licht in Kombination mit Wasser, das Sehen auf der Straße erschwert, wurde jahrelang bei französischen Fahrzeugen der blaue Anteil des Lichtspektrums selektiv herausgefiltert, um somit gelbes Licht zu erhalten. Durch die Filterung reduzierte sich die Strahlungsleistung um etwa 12 %, weshalb der von SCHREUDER [78] durchgeführte Vergleich kritisch zu betrachten ist. BULLOUGH et al. [79] verglichen HGL mit Entladungslampen und fanden, dass letztere eine höhere Blendung verursachen und gleichzeitig weniger blenden als blau gefilterte HGL.

Im Hinblick auf die psychologische Blendung kommt dem Spektrum eine größere Bedeutung zu. Dies wurde bereits 1936 von BOUMA [80] festgestellt, wonach blau mehr als gelb beeinträchtigt. FLANNAGAN et al. [81] fanden, dass Lichtquellen mit Wellenlängen von 480 nm und 505 nm als psychologisch höher blendend bewertet wurden als solche bei 577 nm und 600 nm. Bei den gesättigten Farben fand BULLOUGH [82], dass rot und grün als weniger komfortabel bewertet wurden als gelbe Lichtquellen gleicher Lichtstärke.

FLANNAGAN [83] fand keinen Unterschied in der Schwelle bezüglich der physiologischen Blendung zwischen HGL- und HID-Scheinwerfern, allerdings konnte ein Einfluss des Blickwinkels ermittelt werden. Hinsichtlich der psychologischen Blendung wurden HID-Scheinwerfer deutlich unangehmer bewertet und dies bei gleichen Beleuchtungsstärken. Ebenfalls fand FLANNAGAN [83] heraus, dass blaugetönte HGL-Scheinwerfer bei geringen Beleuchtungsstärken besser bewertet werden als nicht getönte. Demzufolge beeinflusst das Spektrum die psychologische Blendung und der Betrachtungswinkel die physiologische Blendung. [83]

VÖLKER [58] beschäftigte sich mit dem Phänomen der Blendung, vor allem auf die Wirkungen der Verkehrssicherheit im nächtlichen Straßenverkehr. Durch Analyse bestimmender Faktoren für das Blendurteil zeigt VÖLKER [58], dass „es proportional zu einer mittleren Blendleuchtdichte und der Größe der blendenden Fläche, sowie umgekehrt proportional zu der Umgebungsleuchtdichte und der Position der Blendquelle ist.“ Dieser Ansatz wird auch im UGR-Modell (engl. Unified Glare Rating-Modell Abk.: UGR-Modell) wiedergefunden, dass für die Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern allgemeingültig umgeformt wird und wie folgt lautet.

$$\begin{array}{l} \text{Psychologische Blendung nach VÖLKER} \end{array} \quad UGR_{car} = c_1 \cdot \frac{L_g \cdot E_g}{L_{ad} \cdot \theta} + c_2 + x \quad (2-9)$$

Neben der Blendbeleuchtungsstärke E_g wird in der Gleichung die mittlere Blendleuchtdichte L_g , sowie die Adaptationsleuchtdichte L_{ad} verwendet. Die Variablen c_1 und c_2 sind so zu wählen, dass der UGR_{car} -Wert zwischen 1 und 9 liegt. Hinsichtlich der physiologischen Blendung bestätigt VÖLKER [58] das CIE-Modell für statische Beobachtungen.

LOCHER [84] untersuchte in einem Laborversuch den Einfluss verschiedener Beleuchtungssysteme von Kfz-Scheinwerfern hinsichtlich physiologischer Blendung. Als Detektionsobjekt wurde ein Landoltring verwendet, um die Schwellkontraste nach auftretender Blendung zu quantifizieren. Ein Vergleich ohne Blendung erfolgte nicht. Ein Einfluss des Spektrums auf die Schwellkontraste konnte nicht festgestellt werden. [84]

OLSON und SIVAK [85] untersuchten den Einfluss des Alters auf die psychologische Blendung von Kfz-Scheinwerfern. Hierfür wurden 16 Personen in einem Altersbereich von 19 bis 41 Jahren und 24 Personen in einem Altersbereich von 63 bis 78 Jahren untersucht, die vor einer homogen beleuchteten Leinwand saßen und unter einem Winkel von 2° durch eine Blendquelle geblendet wurden. Ein signifikanter Unterschied konnte festgestellt werden, der zeigt, dass alte Probanden sensibler auf Blendung reagieren als junge, allerdings sind die Unterschiede sehr klein, außer bei hohen Blendungswerten [85].

Aus den gezeigten Untersuchungsergebnissen geht hervor, dass die beiden Blendungsarten unterschiedlich von den Umgebungsbedingungen beeinflusst werden. Die physiologische Blendung scheint nicht von der Größe der Quelle abzuhängen, wird allerdings durch den Lichtstrom und den Winkel zur Lichtquelle beeinflusst. Die psychologische Blendung wird dagegen vom Spektrum geprägt.

Während die gezeigten Laboruntersuchungen gut geeignet sind, um verschiedene Faktoren isoliert zu betrachten, decken sie jedoch die Komplexität einer realen Verkehrssituation nicht ab. Aus diesem Grund wird im nächsten Absatz zunächst auf statische Feldversuche eingegangen, bevor die dynamischen folgen. Statische Feldversuche bilden eine Zwischenstufe, bei denen reale Verkehrssituation nachempfunden werden, um eine erste Abschätzung der Parameter zu erhalten.

2.3.3.2 Statische Feldtestuntersuchungen

FLANNAGAN [86] untersuchte in einer statischen Begegnungssituation die Blendung von Scheinwerfern mit HID- und HGL. Es stellte sich heraus, dass die Versuchsteilnehmer HID-Scheinwerfer als höher blendend empfunden haben als HGL-Scheinwerfer, und zwar dann, wenn beide Scheinwerferarten einen gleichen Lichtstrom liefern. In einer abschließenden Berechnung zeigten SIVAK et al. [87], dass eine um Faktor 1,66 höhere Beleuchtungsstärke erforderlich ist, um gleiche psychologische Blendung zu verursachen. Insbesondere der höhere Blauanteil der Entladungslampen führt zu einer erhöhten psychologischen Blendung, wobei in der physiologischen Blendung keine Unterschiede gefunden werden.

BULLOUGH [88] führte im Jahr 2004 einen statischen Feldtest durch, bei dem der Einfluss der Scheinwerfergröße, -spektrum und -intensität auf die Blendung und Detektion untersucht wurden. Hierbei wurden ungefilterte und blaugefilterte HGL- sowie HID-Scheinwerfer verwendet, die Blendungswerte zwischen 0,2 lx und 5 lx am Auge des Probanden erzeugten. Die Blendungswerte reichen nach BULLOUGH [88] von üblichen Nachtsituationen, bis hin zu falsch eingestellten Scheinwerfern. Ebenfalls wurde die Größe des HID-Scheinwerfers zwischen 9 cm und 77 cm variiert. Die Ergebnisse zeigen, dass Objekte, die sich nahe der Blendquelle und in einem großen peripheren Winkel befinden, am schwersten zu detektieren sind. Dies bestätigt das Vorhandensein einer physiologischen Blendung, bei der die Sehleistung reduziert wird. [88]

Mit der Einführung der LED-Scheinwerfer entstand eine ähnliche Diskussion, die von SIVAK [89] aufgeklärt werden sollte. Hierfür wurde in einem statischen Feldtest die psychologische Blendung von entgegenkommenden Fahrzeugen mit unterschiedlichen Scheinwerfern untersucht. Verwendet wurden HGL-, HID-, und LED-Scheinwerfer mit unterschiedlichen Farbtemperaturen, die in einem Abstand von 40 m, eine Blendbeleuchtungsstärke zwischen 0,3 lx und 1 lx am Auge des

Probanden erzeugten. Die Ergebnisse zeigen, dass mit steigender Farbtemperatur, auch eine höhere psychologische Blendung eintritt, wodurch doppelt so helle HGL-Scheinwerfer besser bewertet werden als LED-Scheinwerfer. Dies belegt die Abhängigkeit der psychologischen Blendung vom Spektrum. [89]

SCHILLER [90] untersuchte den Einfluss der Lichtquelle, des Adaptationsspektrums und der Scheinwerferoptik auf die psychologische Blendung unter realen Bedingungen. Hierfür adaptierten die Probanden auf HGL- bzw. HID-Scheinwerfer und bewerteten im Anschluss die psychologische Blendung eines Blendfahrzeuges mit HGL- bzw. HID-Scheinwerfern in 50 m Entfernung auf der Gegenfahrbahn. Die Ergebnisse zeigen, dass „die Blendung für ein mit HID-Scheinwerfer ausgestattetes Fahrzeug, der Testperson im Durchschnitt um 0,25 Bewertungspunkte geringer empfunden wird“ und dem zufolge eine höhere Blendung verursacht. Ein signifikanter Unterschied konnte allerdings nicht nachgewiesen werden, auch nicht in den zusätzlich durchgeführten Berechnungen. [90]

LOCHER [91] untersuchte mit 89 Probanden die physiologische Blendung von HGL-, HID- und LED-Scheinwerfern, die sich in 50 m Entfernung auf der Gegenfahrbahn befinden. Die Probanden adaptierten auf Licht der HGL, das den Bereich vor den Probanden beleuchtete. Die Scheinwerfer wurden so eingestellt, dass alle eine Blendbeleuchtungsstärke von 0,4 lx am Auge des Probanden erzeugten. Darüber hinaus wurde ein HGL-Scheinwerfer zu hoch eingestellt, sodass eine Blendbeleuchtungsstärke von 1,5 lx erreicht wurde. In einem Abstand von 25 m von den Probanden wurden auf einem Monitor, Landoldringe mit unterschiedlichen Kontrasten gezeigt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Scheinwerfer mit der geringen Blendbeleuchtungsstärke nur geringe Unterschiede in der Kontrastwahrnehmung aufweisen. Beim HGL-Scheinwerfer mit den hohen Blendbeleuchtungsstärken, verdoppelt sich dagegen der notwendige Kontrast. Dies bestätigt die gezeigten Ergebnisse, dass die physiologische Blendung nicht vom Spektrum abhängig ist, sondern von der Beleuchtungsstärke abhängt. [91]

Die gezeigten Untersuchungen bestätigen größtenteils die Ergebnisse der Laboruntersuchungen, dass die psychologische Blendung vom Spektrum der Blendquelle abhängig ist und die physiologische Blendung vom Winkel und von der Beleuchtungsstärke bestimmt wird.

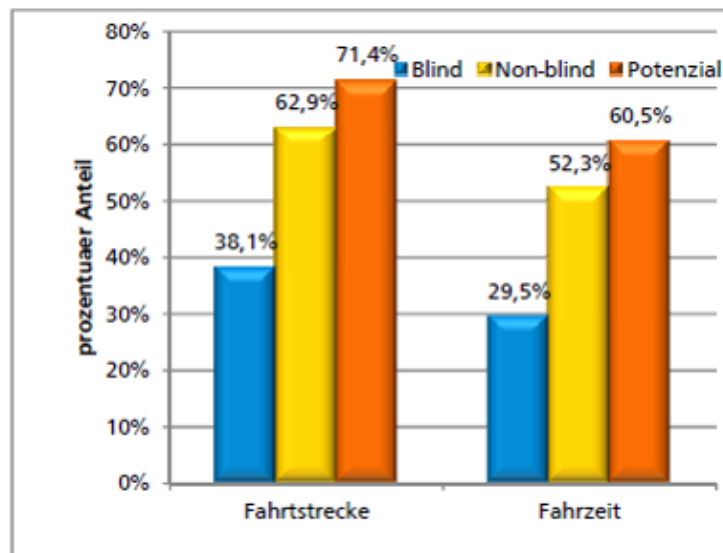
Ein Nachteil der statischen Untersuchungen ist die ungestörte und sichere Situation in der sich der Proband befindet, d.h. die Versuchsperson hat nichts Weiteres zu tun, außer der Aufgabe die ihm aufgetragen wird. Dies ändert sich allerdings in dynamischen Verkehrssituationen, so dass höhere Anforderungen an Wahrnehmung und visuelle Orientierung auftreten. Da die Komplexität von realen Verkehrssituationen und die damit verbundene Aufmerksamkeit des Fahrers in statischen Felduntersuchungen nicht nachempfunden werden kann, wird im Folgenden auf dynamische Feldtests eingegangen.

2.3.3.3 Dynamische Feldtestuntersuchungen

Im Gegensatz zu den statischen Feldtestuntersuchungen hat der Fahrer bzw. Proband bei den dynamischen Untersuchungen eine Fahraufgabe, die seine Aufmerksamkeit beansprucht und eine verändernde Adaptation bewirkt, wodurch realitätsnahe Untersuchungen möglich sind. Im Folgenden werden einige der aktuellsten Forschungen vorgestellt, die Blendungsuntersuchungen unter dynamischen Bedingungen durchgeführt haben.

BÖHM und LOCHER [92] untersuchten die psychologische Blendung in einer Begegnungssituation, indem ein Testfahrzeug u.a. mit einem Photometer zur Bestimmung der Blendbeleuchtungsstärke ausgestattet wurde. Bei einem Abstand von 50 m zwischen den Fahrzeugen wurden die Probanden angewiesen, die psychologische Blendung anhand der de Boer Bewertung zu bewerten. Die Auswertung der Daten ergab eine mittlere Blendbeleuchtungsstärke von 0,43 lx, ohne auf die Unterschiede zwischen HGL- und HID-Scheinwerfern näher einzugehen. Eine Korrelation zwischen der de Boer Bewertung und der Blendbeleuchtungsstärke wurde mit einer linear fallenden Trendlinie gezeigt, die ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,203$ aufweist. [92]

Das Potential adaptiver Lichtverteilungen und deren nutzen wurde von SPRUTE [13] analysiert. Hierzu wurde die Fernlichtnutzung auf realen Straßen aufgezeichnet, indem Probanden eine vorher festgelegte Strecke zweimal befahren haben. Bei der ersten Fahrt sind die Probanden so gefahren „wie sie es gewohnt sind“ und bei der zweiten wurden sie instruiert, „das Fernlicht so häufig wie möglich zu betätigen“. Die Ergebnisse zeigen, dass bei der ersten Fahrt lediglich 38 % der Fahrtstrecke das Fernlicht verwendet wurde und bei der zweiten 63 %, während das theoretische Maximum bei 71 % der Fahrtstrecke liegt (vgl. *Abbildung 2-10*).



*Abbildung 2-10: Anteil der Fernlichtnutzung auf Landstraßen **blau**: Probanden benutzen das Fernlicht wie sie es gewohnt sind, **gelb**: Probanden werden angewiesen, das Fernlicht so häufig wie möglich zu verwenden, **orange**: Potential der Fernlichtnutzung [13]*

Aus den Ergebnissen schließt SPRUTE [13], dass „das Fernlicht zu wenig genutzt wird und eine Automatisierung dieser Funktion unbedingt geboten sein sollte“. Bei einem Begegnungsabstand von 400 m wird bei Fernlichtnutzung ein Zustand erreicht, der einer Blendung bei Abblendlicht in 50 m entspricht. Aus dem Grund wird empfohlen, entgegenkommende Fahrzeuge ab dieser Entfernung zu entblenden. [13]

In einer weiteren Studie von SPRUTE [93] wurde die Reduzierung der Blendung durch automatisch abblendende Fernlichtassistenten untersucht. Hierfür wurde die physiologische Blendung durch eine Kontrastsehfähigkeit und die psychologische Blendung durch die de Boer Skala in einem Feld-

test aufgezeichnet. Ebenfalls wurde in einer Laborstudie die rückwärtige physiologische und psychologische Blendung untersucht, die durch die beiden Rückspiegel und den Innenspiegel auf das Fahrerauge treffen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass bei einer Begegnungsentfernung von 400 m, die physiologische Blendung durch Fernlicht der von Abblendlicht bei 50 m entspricht. Die Ergebnisse der psychologischen Blendung führen „zu einem ähnlichen Ergebnis“ des Begegnungsabstandes. Beim statischen Versuchsaufbau hat bereits eine Beleuchtungsstärke von 1,4 lx am Auge zu einer Verschlechterung des Kontrastsehvermögens geführt. Zu beachten ist dabei allerdings, dass bei der Übertragung auf den Straßenverkehr, die Aufmerksamkeit des Fahrers durch das Fahren beansprucht wird, wodurch sich der Wert verändern wird. Abschließend schlägt SPRUTE [93] vor, die Beleuchtungsstärke am Auge unter 2 lx zu halten, um höhere Blendungen zu vermeiden. [93]

TOTZAUER [64] untersuchte die Wahrnehmung verschiedener Lichtfunktionen von blendfreien Fernlichtsystemen hinsichtlich Lückenbreite und potentiell auftretende Irritationen durch das Schaltverhalten solcher Systeme. Je größer die Lückenbreite gewählt wird, desto seltener werden blendende Lichtpulse wahrgenommen und „umso ruhiger wurde das System wahrgenommen“. Allerdings bietet eine schmale Lückenbreite die beste Fahrbahnausleuchtung. Als optimaler Abstand zwischen einem erkannten Verkehrsteilnehmer und dem ersten aktiven Segment, wird ein Wert von einem Grad vorgeschlagen. [64]

ZYDEK [15] untersuchte die physiologische und psychologische Blendung, sowie die Detektionsdistanz von blendfreien Fernlichtsystemen bei einer Begegnungssituation. Eine Begegnung mit Fernlicht führt unabhängig von der Art der Lichtquelle zu einer störenden bis unerträglichen psychologischen Blendung. Dagegen ist ein signifikanter Unterschied in der physiologischen Blendung zwischen HGL- und HID-Fernlicht zu erkennen. Diesen erklärt ZYDEK [15] durch den „deutlich höheren Lichtstrom“ der HID-Scheinwerfer. Bei Abblendlicht kann dagegen kein signifikanter Unterschied bei der physiologischen und psychologischen Blendung der beiden Lichtverteilungen festgestellt werden. Es werden allerdings signifikant höhere Detektionsdistanzen bei HID-Scheinwerfern gemessen, die im Mittel 30 m betragen. Ebenfalls konnte kein signifikanter Unterschied in beiden Blendungsarten zwischen blendfreien Fernlichtsystemen und HID-Abblendlicht festgestellt werden. Allerdings erhöht sich die Detektionsdistanz um 32 m und erreicht dadurch Werte, die vergleichbar mit Fernlicht sind. [15]

Neben der zuvor angesprochenen Laboruntersuchung führten OLSON und SIVAK [85] einen Vergleich zwischen Labor- und Felddaten, hinsichtlich Blendung von Kfz-Scheinwerfern durch. Hierfür wurde das Verhältnis zwischen der Beleuchtungsstärke (in einem Bereich von 0,003 lx bis 10,8 lx) und der de Boer Bewertung von der Laboruntersuchung mit denen aus einem Feldtest verglichen. Geachtet wurde dabei, dass die maximale Beleuchtungsstärke beim Passiervorgang, mit der des Laborversuchs übereinstimmte, indem einerseits die Spannung der HGL-Scheinwerfer angepasst wurde und andererseits indem Neutralfilter vor den Scheinwerfern montiert wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Werte der Laboruntersuchung geringer sind und somit einer höheren Blendung im Feld entsprechen. Ergebnisse aus Laboruntersuchungen sind laut den Autoren zu konservativ [85].

SCHMIDT-CLAUSEN [94] führte ebenfalls einen Vergleich zwischen Labor- und Feldtestuntersuchungen durch, indem Kontraste der Straßenmarkierungen untersucht wurden. SCHMIDT-CLAUSEN [94]

folgerte, dass die Tendenzen bei beiden Untersuchungen zwar gleich sind, allerdings sind die Laborergebnisse zu gering und es gestaltet sich nicht möglich, exakte Anforderungen abzuleiten. Ein Faktor kann bestimmt werden, der die Unterschiede zwar beschreibt, jedoch ist dieser vom Versuchsaufbau und dem Realitätsgrad abhängig. [94]

Demzufolge sind dynamische Felduntersuchungen notwendig, um die Komplexität von realen Verkehrssituationen näherungsweise abzudecken und für realitätsnahe Blendungsbewertungen beizutragen. Aus den Ergebnissen der Labor- und Felduntersuchungen kann zusammengefasst werden, dass der Haupteinfluss auf die beiden Blendungsarten die Beleuchtungsstärke am Fahrerauge ist. Die physiologische Blendung scheint nicht von der Größe der Blendquelle abzuhängen, wird allerdings durch die Beleuchtungsstärke am Auge und den Winkel zur Lichtquelle beeinflusst, der sich bei einem sich näherndem Fahrzeug ändert. Die psychologische Blendung wird dagegen vom Spektrum und bei den dynamischen Felduntersuchungen zusätzlich von der Beleuchtungsstärke geprägt. Somit kann über eine lichttechnische Größe, ein möglicher Zusammenhang der psychologischen und physiologischen Blendung ermittelt werden.

3 Anforderungen an die dynamische Leuchtweitenregelung

Wie bereits beschrieben, federt ein Fahrzeug bei Beladung an der Hinterachse ein, sodass sich der Nickwinkel zur Straße verändert. Dadurch wird auch die HDG vertikal nach oben verschoben, wodurch andere Verkehrsteilnehmer geblendet werden können (vgl. *Abbildung 2-6*). Systeme wie beispielsweise die aLWR verhindern dies, indem sie die Neigungsänderung registrieren und die Neigung des Lichtkegels entsprechend anpassen. Die dLWR gleicht zusätzlich zu den Beladungsneigungen auch die Neigungen aus, die durch die Fahrzeugdynamik auftreten können. Hierzu gehören Neigungsänderungen die z.B. durch Beschleunigungsmanöver und durch Fahrbahnunebenheiten auftreten können. Diese Neigungsänderungen werden in diesem Kapitel hinsichtlich Blendung genauer untersucht.

Diesem Kapitel liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE Nr. 82.0611/2014 durchgeführten Forschungsarbeiten zugrunde [95].

3.1 Stand der Forschung

Im Folgenden wird auf einige Untersuchungen eingegangen, die sich mit der Fahrzeugdynamik hinsichtlich lichttechnischer Aspekte und Blendung unter möglichst realistischen Bedingungen beschäftigt haben.

HUHN [37] analysierte im Jahr 1999 die Fahrzeugdynamik und betrachtete dabei insbesondere die Veränderungen der Lichtverteilung im Bereich der HDG [37]. Hierfür wurden die Nickwinkel von acht Fahrzeugen von vier verschiedenen Herstellern untersucht. Diese Fahrzeuge wurden sowohl im realen Straßenverkehr als auch auf einem Testgelände beschleunigt und wieder abgebremst. Für die Ermittlung der Nickwinkel verwendete HUHN [37] jeweils einen an Fahrzeugfront und -heck angebrachten Abstandssensor auf Basis der Laser-Triangulation. Als maximaler Nickwinkel wurde auf dem Testgelände beim Beschleunigen ein Winkel von $\beta_{\max} = +1,49^\circ$ bzw. beim Bremsen $\beta_{\min} = -1,81^\circ$ ermittelt. Weiterhin absolvierte jedes der acht Fahrzeuge im realen Straßenverkehr eine Fahrstrecke von 175 km jeweils gleichverteilt auf Stadt, Landstraße und Autobahn. Hierbei ergaben sich erwartungsgemäß geringere Nickwinkel, da nur sehr selten voll beschleunigt bzw. eine Vollbremsung eingeleitet wird. Beim Beschleunigen ergab sich ein maximaler Nickwinkel von $\beta_{\max} = 1,20^\circ$ in der Stadt und auf der Landstraße (Bremsen: $\beta_{\min} = -0,56^\circ$). Auf der Autobahn verringerte sich der Winkel auf $\beta_{\max} = 1,09^\circ$. Ebenfalls wurde der kumulierte Blendanteil je Stunde ermittelt, bei dem sich der linke Teil der HDG über dem Horizont befindet. Dieser Wert schwankt sehr stark bei den verschiedenen Fahrzeugen und wird durch die „Getriebeübersetzung der unteren Gänge und einer insgesamt forcierten Fahrweise während der Messung“ begründet. „Besonders große Nickwinkel und damit auch die größten Blendanteile wurden bei Fahrzeugen mit großer Motorleistung, kleinem Radstand und weicher Fahrwerksabstimmung nachgewiesen, wobei der Einfluss der Fahrwerksabstimmung überwog“. [37]

LEHNERT [96] untersuchte den Effekt von Blendreizen auf das Sehvermögen des Menschen. Dies ist wichtig, da die vertikale Fahrzeugdynamik Blendpulse z.B. bei einem entgegenkommenden Fahrzeug verursachen kann. Aus diesem Grund führte LEHNERT [96] eine Laboruntersuchung durch, bei der die Auswirkungen von Blendpulsen mit einer Länge zwischen 0,3 und 10 Sekunden auf die menschliche Wahrnehmung untersucht wurden. Der Fokus der Studie richtete sich dabei auf die Readaptationszeit nach temporärer Blendung. Diese wurde basierend auf verschiedene Modelle rechnerisch ermittelt und statistisch ausgewertet. Zusätzlich wurde noch eine Probandenuntersuchung durchgeführt, bei der die psychologische Blendung erfasst und mit der rechnerisch bestimmten Readaptationszeit verglichen wurde. Hierbei saßen die Probanden in einem Fahrzeug und wurden von speziell umgebauten Scheinwerfern geblendet, die es ermöglichten, schnelle vertikale Bewegungen zu vollziehen. Die dadurch entstehenden Blendpulse wurden mit realen Fahrzeugdynamikbewegungen verglichen. LEHNERT [96] fand eine Korrelation zwischen der Dauer des Blendreizes und der psychologischen Blendung. Allerdings hängt diese Korrelation vom Maximum der Blendreizdauer ab, da eine zeitliche Verlängerung des Blendreizes in einem stärkeren Gefühl des Unwohlseins führt. Bei einer Blendreizdauer über 0,3 Sekunden erhöhte sich die Readaptationszeit signifikant. Ebenfalls konnte eine lineare Korrelation zwischen der logarithmisch abnehmenden maximalen Blendbeleuchtungsstärke und der Bewertung der psychologischen Blendung ermittelt werden. [96]

FLANNAGAN [97] untersuchte unter anderem die Vorteile der LWR für aktuelle Abblendlichter in den USA. Diese Untersuchung ist besonders interessant, da in den USA eine LWR für kein Fahrzeug vorgeschrieben ist. Der Grund hierfür ist, dass in der amerikanischen Regulierung hohe Sichtweiten favorisiert werden und Blendung eher eine sekundäre Rolle spielt. Allerdings gab es hier in letzter Zeit mehrere wesentliche Änderungen, bei denen Blendungsaspekte immer mehr an Bedeutung gewannen (vgl. z.B. [98]). In der Untersuchung von FLANNAGAN [97] wurden eine Familienlimousine, ein Minivan und ein Geländewagen getestet. Die drei Fahrzeuge wurden im vollbeladenen sowie im leeren Zustand untersucht, um die dynamischen Effekte zu bestimmen. Hierzu wurden zwei Laser an der Fahrzeugfront und am Heck befestigt und der Abstand zur Straße mit einer Abtastrate von 100 Hz gemessen. FLANNAGAN [97] stellte fest, dass beladene Fahrzeuge einen höheren Neigungswinkel verursachen als unbeladene Fahrzeuge. Ebenfalls stellte FLANNAGAN [97] einen Zusammenhang zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit und dem Neigungswinkel fest. Bei Geschwindigkeiten unter 50 km/h sind die Schwankungen der Fahrzeugneigung um ein vielfaches größer als bei Geschwindigkeiten über 50 km/h. [97]

ZYDEK [99] führte einen Feldtest durch, bei dem der Einfluss der Fahrzeugbeladung auf die Blendung untersucht wurde. Hierfür hat ZYDEK [99] 25 unterschiedliche Serienfahrzeuge mit unterschiedlichen Scheinwerfersystemen und drei unterschiedlichen Beladungszuständen (0 %, 50 % und 100 %) untersucht. 0 % entspricht hierbei dem Fahrzeugleergewicht und 100 % dem zulässigen Gesamtgewicht des jeweiligen Fahrzeuges. In der Untersuchung wurden die Beleuchtungsstärke, die Leuchtdichte und die psychologische Blendung der unterschiedlich beladenen Fahrzeuge untersucht. Hierbei wurden die Bewertungen der psychologischen Blendung von Fahrer und Beifahrer zusammengefasst, da sich kein signifikanter Zusammenhang ergeben hat. ZYDEK [99] konnte eine Abhängigkeit zwischen der de Boer Bewertung und der Beladung feststellen. Bei den Beladungszuständen 0 % und 50 % wurde eine de Boer Bewertung größer 5 ermittelt, eine Bewertung die einer geringeren Blendung entspricht. Bei 100 % Beladung wurde dagegen ein de Boer

Wert von 2,7 ermittelt. Bereits ein Wert von 3 entspricht dabei einer als störend empfundenen Blendung. Ebenfalls wurde bei den de Boer Bewertungen für 0 % und 50 %, sowie für 50 % und 100 % ein signifikanter Unterschied festgestellt. Die Beladung der Fahrzeuge hat somit einen signifikanten Einfluss auf die Blendungsbewertung der Probanden. Zusätzlich konnte eine Abhängigkeit der de Boer Bewertung vom Nickwinkel der HDG ermittelt werden, die bei steigendem Nickwinkel eine zunehmende Blendung aufweist. Es konnte festgestellt werden, dass bei gleicher Beladung der unterschiedlichen Fahrzeuge, starke Unterschiede in den auftretenden Nickwinkeln der HDG aufgetreten sind. Dies führt zu der Annahme, dass zusätzlich zur Beladung auch das Fahrwerk einen entscheidenden Einfluss auf das Blendungsempfinden aufweist. Nach Auswertung der photometrischen Daten stellte ZYDEK [99] fest, dass die mittlere Beleuchtungsstärke und die maximale Leuchtdichte die geeignetsten Größen sind, „um anhand dieser eine möglichst genaue Aussage über die Blendung von Scheinwerfern zu treffen“. Allerdings werden durch die Bildung des Mittelwertes die Beleuchtungsstärkedaten geglättet und sind somit für die Betrachtung der Fahrzeugdynamik nur als Richtwert geeignet. Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Lichtquellen - Halogenglühlampe, Xenon-Entladungslampe und LED - konnte kein signifikanter Unterschied ermittelt werden. ZYDEK [99] schlussfolgerte in seiner Untersuchung, dass die aktuell gültige Kopplung der LWR an einen bestimmten Lampenlichtstrom oder an den Lampentyp LED nicht zielführend ist. [99]

ROSENHAHN [51] untersuchte die Adaptationsstörungen, die während einer Begegnungssituation von den Scheinwerfern eines entgegenkommenden Fahrzeuges auftauchen. Die Scheinwerfer des Begegnungsverkehrs erzeugen am Auge des Fahrers eine temporäre Erhöhung der Adaptationsleuchtdichte, die zu einer Adaptationsstörung im Auge führt und erst nach einer gewissen Readaptationszeit wieder ursprünglich adaptiert. Während dieser Zeitspanne ist die Unterschiedsempfindlichkeit reduziert, wodurch Objekte schlechter bzw. später erkannt werden, obwohl keine Blendquelle mehr im Gesichtsfeld vorhanden ist. Der Versuch fand in einem Labor statt, bei dem jeder Proband eine zweispurige Straße mit einer rechteckförmigen Blendquelle in Position des Gegenverkehrs dargeboten wurde. Gemessen wurde die Readaptationszeit, die die Probanden benötigten, um ein geringfügig überschwelliges Sichtziel auf dem eigenen Fahrstreifen wieder wahrzunehmen. Die Ergebnisse zeigen, dass mit steigender Dauer der Blendung, für alle Blendbeleuchtungsstärken, die Readaptationszeit ebenfalls steigt (vgl. *Abbildung 3-1*).

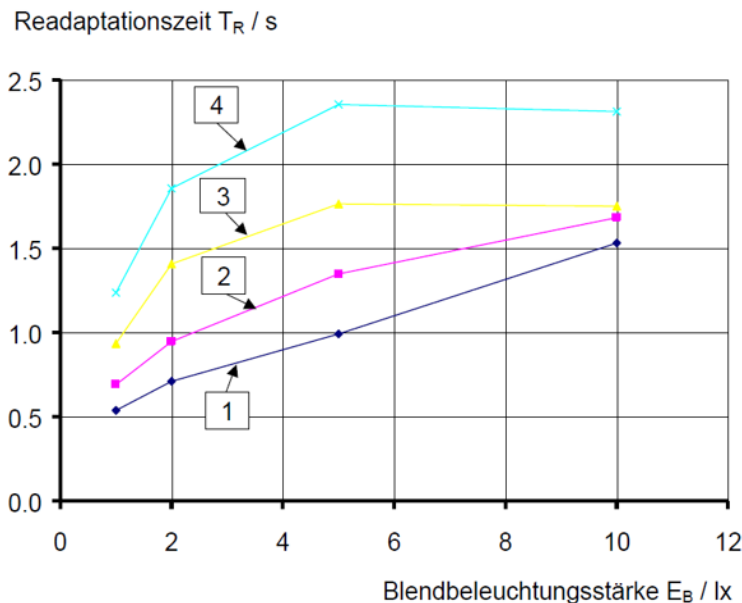


Abbildung 3-1: Readaptationszeit in Abhängigkeit der Blendbeleuchtungsstärke für unterschiedliche Blenddauern 1: $T = 0,125$ s, 2: $T = 0,5$ s, 3: $T = 2$ s, 4: $T = 8$ s [51]

Für kurze Blenddauern von unter 0,5 s zeigt sich ein stetiger Anstieg der Readaptationszeit mit der Blendbeleuchtungsstärke. Für größere Blenddauern über 2 s ist ebenfalls eine Zunahme der Readaptationszeit zu beobachten, jedoch bleibt sie ab einer Blendbeleuchtungsstärke von etwa 5 lx auf einem konstant hohem Wert. [51]

JEBAS et al. [38] untersuchten, wie Fahrzeugführer mit Freiheiten bei der Einstellung ihrer eigenen Lichttechnik umgehen und führten eine Umfrage durch, bei der die Einstellung der LWR ermittelt wurde. In etwa die Hälfte der Befragten stellen die LWR auf mittlere Reichweite ein, unabhängig vom Beladungszustand ihres Fahrzeuges und „viele verändern diese Einstellung so gut wie nie“. Somit ist das Potential der LWR und demnach auch des Scheinwerfers an sich kaum ausgeschöpft. Dies hat zur Folge, dass bei Beladung andere Verkehrsteilnehmer geblendet werden oder der Fahrer eine zu geringe Sicht hat. [38]

Es stellt sich somit die Frage, ob die Einstellung der Leuchtweitenregelung nicht mehr dem Fahrer überlassen werden sollte und eine aLWR oder sogar dLWR dies übernehmen sollte. Zusätzlich stellt sich die Frage, welche Anforderungen an die dLWR zu richten sind, da anhand der aktuellen Gesetzgebung, die aLWR und die dLWR mit dem Lichtstrom der Lichtquellen verbunden sind, so dass Scheinwerfer mit Halogenglühlampen und 25 W HID-Leuchtmittel keine aLWR bzw. dLWR besitzen müssen [33]. Das abschließende Ziel dieser Untersuchung ist, die möglichen Anforderungen für die dLWR zu finden und zu benennen.

Der Überblick zum Stand der Forschung zeigt, dass schon wichtige Erkenntnisse zum Thema Fahrzeugdynamik hinsichtlich lichttechnischer Aspekte und Blendung erarbeitet wurden. Er zeigt aber auch, dass speziell hinsichtlich aLWR bzw. dLWR keine Untersuchung durchgeführt wurde. Es zeigt sich demnach, dass eine Untersuchung fehlt, die unter möglichst realistischen Bedingungen, die Anforderungen an eine dynamische Leuchtweitenregelung charakterisiert. Aus diesem Grund wurde der in diesem Kapitel vorgestellte Feldtest entwickelt und durchgeführt.

3.2 Methodik

Die Untersuchungen wurden auf dem Versuchsgelände der Technischen Universität Darmstadt, dem August-Euler-Flugplatz in Griesheim bei Darmstadt durchgeführt. Das Testgelände des Flugplatzes ist unterteilt in eine ca. 1200 m lange Start- und Landebahn und einen parallel dazu verlaufenden Taxiway. Die Untersuchung wurde auf der Start- und Landebahn durchgeführt, da realistische Asphaltbedingungen und keine störenden Lichtquellen, wie beispielsweise Straßenbeleuchtungen in unmittelbarer Nähe vorhanden sind.

Bei der Gestaltung des Feldtests wurde besonderes Augenmerk auf eine möglichst realistische Abbildung der Fahrzeugdynamik gelegt, weshalb zwei unterschiedliche Arten von Fahrzeugen verwendet wurden – Test- und Messfahrzeuge. Testfahrzeuge sind diejenigen Fahrzeuge, bei denen die unterschiedlichen Einflussparameter der Scheinwerfer und der Fahrdynamik untersucht werden und die Messfahrzeuge sind diejenigen Fahrzeuge, in denen die Blendungseigenschaften des Testfahrzeuges gemessen und untersucht werden. Hierbei handelt es sich um folgende Parameter die im Messfahrzeug untersucht wurden:

- Physiologische Blendung (vgl. 3.3.3)
- Psychologische Blendung (vgl. 3.3.2)
- Beleuchtungsstärke (vgl. 3.3.4)

Um vergleichbare Bedingungen zu gewährleisten, wurden alle oben genannten Parameter gleichzeitig untersucht. Hierbei fuhr ein Testfahrzeug nach der Beschleunigung auf 80 km/h mit konstanter Geschwindigkeit entlang der Start- und Landebahn. Währenddessen hatten Probanden in statisch positionierten Messfahrzeugen im Gegenverkehr die Aufgabe, die physiologische und psychologische Blendung des sich nähernden Testfahrzeuges zu bewerten. Ein solcher Vorgang bzw. Ablauf wird nachfolgend als „Durchlauf“ bezeichnet. Vor jedem Durchlauf wurde die Scheinwerfereinstellung kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert. In *Abbildung 3-4* ist der Versuchsaufbau zu sehen.

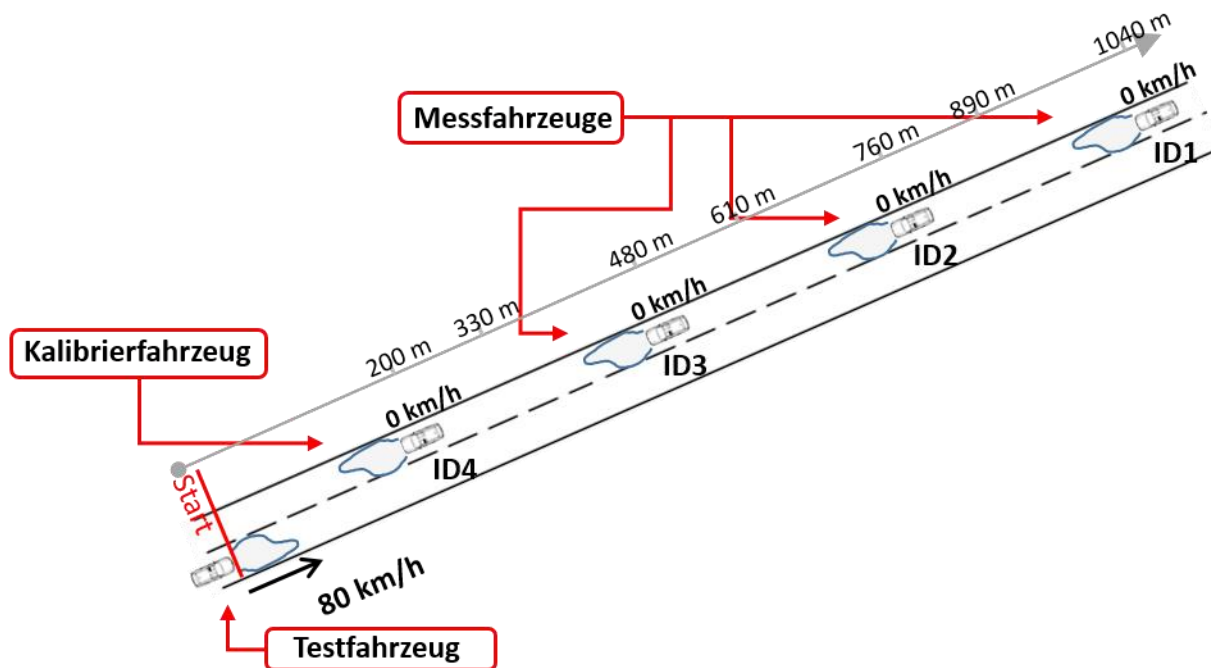


Abbildung 3-2: Versuchsaufbau nach [15] bei dem das Testfahrzeug, die drei Messfahrzeuge (ID1 bis ID3) und das Kalibrierfahrzeug (ID4) zu sehen sind

Durch die drei stehenden Messfahrzeuge (ID1 bis ID3) konnten mehrere Probanden gleichzeitig ihre Blendungsbewertung abgeben. Die Messfahrzeuge waren hierbei mit je zwei Probanden besetzt, welche die psychologische, als auch die physiologische Blendung des jeweiligen Testfahrzeuges bewerteten. Messfahrzeug ID4 diente als Orientierung für die Probanden in Messfahrzeug ID3, damit diese genau wie alle anderen Probanden ihren Blick auf die Heckleuchten eines vor ihnen befindlichen Fahrzeuges richten konnten. Durch diese Bedingung wurde sichergestellt, dass die Adaptation der Probanden in den verschiedenen Messfahrzeugen identisch ist. Weiterhin wurde in ID4 die theoretische Blendbelastung durch den Beschleunigungsvorgang der entgegenkommenden Testfahrzeuge in Form der Beleuchtungsstärke messtechnisch erfasst.

Bei den Testfahrzeugen wurde der Beladungszustand und falls vorhanden und technisch möglich, die Einstellung der LWR verändert. Eine Deaktivierung der dLWR ist anhand der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (Abk.: StVZO) § 50 [100] im Straßenverkehr nicht zulässig und wird lediglich aus Vergleichsgründen durchgeführt. Um die Auswirkungen der Beladung auf die Fahrzeugdynamik der unterschiedlichen Testfahrzeuge zu überprüfen und sie miteinander vergleichen zu können, wurden alle Testfahrzeuge mit dem gleichen Gewicht beladen. Bei der Beladung handelte es sich um ein Gesamtgewicht von 250 kg, das im Kofferraum der Testfahrzeuge positioniert wurde und entspricht etwa drei Personen inklusiv Gepäck. Zusätzlich zur Beladung wurden auch die unterschiedlichen Scheinwerferarten (Halogenleuchtampen, HID und LED) und unterschiedlichen Fahrwerksabstufungen untersucht.

In den folgenden Absätzen wird zunächst auf die Auswahl und Einteilung der Testfahrzeuge eingegangen, bevor die Messtechnik der Messfahrzeuge beschrieben wird.

3.2.1 Auswahl und Einteilung der Testfahrzeuge

Für den Feldtest wurden Serienfahrzeuge ausgesucht, deren Scheinwerfer mit Lichtquellen ausgestattet waren, die sowohl unterhalb als auch oberhalb der 2000 lm Grenze liegen. Für unterhalb kommen Scheinwerfer mit Halogenglühlampen zum Einsatz und für oberhalb Scheinwerfer mit HID sowie LED. Durch einen direkten Vergleich der beiden Lichtquellen kann die Frage geklärt werden, ob die Verknüpfung der LWR mit dem Lichtstrom sinnvoll ist oder nicht. So wurde bei einem Fahrzeug sowohl Halogen-Scheinwerfer als auch HID-Scheinwerfer verwendet, um den Einfluss der Lichtverteilung bzw. Lichtquelle auf die Blendung isoliert zu betrachten. Durch die Verwendung von ein und demselben Fahrzeug ist sichergestellt, dass die Fahrzeugdynamik identisch ist. Zum Einsatz ist ein Opel Insignia gekommen, der serienmäßig mit HID-Scheinwerfern und einer dLWR ausgestattet ist.

Neben dem Einfluss der Lichtverteilung wurde auch der Einfluss des Fahrwerks untersucht, indem zwei Fahrzeuge mit gleichen Scheinwerfern und demzufolge gleicher Lichtverteilung aber mit unterschiedlich harten Fahrwerksabstimmungen zum Einsatz kamen. Eine Marktrecherche hat gezeigt, dass bei den Fahrzeugen Audi A3 und Audi S3 unterschiedlich harte Fahrwerke und gleichzeitig identische Scheinwerfertypen verbaut sind. Durch die isolierte Betrachtung der einzelnen Parameter kann deren Einfluss bestimmt werden und anhand der beobachteten Auswirkungen, Schlüsse über deren Blendungsbeeinflussung gezogen werden.

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Fahrzeugen wurde als Vertreter der Kleinwagen ein Peugeot 208 mit Halogenglühlampen-Scheinwerfern verwendet. Als Fahrzeug mit LED-Scheinwerfer wurde der VW Polo ausgewählt, der in der Kompaktklasse die meisten Neuzulassungen hat [101]. Dieser stand allerdings zum Zeitpunkt des Feldtestes lediglich in der Sport Ausführung (GTI) mit den LED-Scheinwerfern zur Verfügung.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse von ZYDEK [99], dass bei gleicher Beladung der unterschiedlichen Fahrzeuge, starke Unterschiede in den auftretenden Nickwinkeln aufgetreten, folgte eine Klassifizierung der verbauten Fahrwerke im statischen Zustand. Hierbei wurde der Nickwinkel der Fahrzeuge ohne Beladung und bei einer Beladung von 250 kg gemessen, indem der Abstand zwischen einer nivellierten Laserlinie und dem hinteren Kotflügel für beide Beladungszustände gemessen wurde. Durch Differenzbildung zwischen beladenem und unbeladenem Fahrzeug, kann mit Kenntnis des Radstandes, die Winkeldifferenz bestimmt werden und die Fahrwerke in drei Gruppen unterteilt werden. Zu beachten ist hierbei, dass diese Messung lediglich die Federeigenschaften des Fahrzeuges beschreibt, nicht aber die Dämpfereigenschaften. Diese Messung wurde gewählt, da der Regelbereich der LWR auf statischen Beladungsänderungen basiert und somit ebenfalls die Federeigenschaften berücksichtigt. In *Tabelle 3-1* ist eine Übersicht der getesteten Fahrzeuge zu sehen, sowie deren verwendete Lichtquellen, die Klassifizierung der Fahrwerke und die Art der verbauten LWR. Der Wert „Winkel bei Beladung“ gibt dabei den ermittelten relativen Winkel an, den das Fahrzeuges nachdem es beladen wurde annimmt. Die Klassifizierung der Fahrwerke erfolgt dabei relativ in Abhängigkeit des Beladungswinkels der untersuchten Fahrzeuge.

Tabelle 3-1: Übersicht der getesteten Fahrzeuge, deren Lichtquelle, Fahrwerkseigenschaften und LWR-Art

Fahrzeug	Lichtquelle	Winkel bei Belastung	Fahrwerkseigenschaft	LWR
Peugeot 208	HGL	4,06°	Weich	Manuell
Opel Insignia	HGL	2,26°	Mittel	Keine
Opel Insignia	HID	2,26°	Mittel	Dynamisch
Audi A3	HID	2,09°	Mittel	Dynamisch
Audi S3	HID	1,40°	Hart	Dynamisch
VW POLO GTI	LED	1,43°	Hart	Dynamisch

3.2.2 Messtechnik zur Ermittlung der Fahrzeugdynamik

In den nachfolgenden Abschnitten werden die für die vorliegenden Untersuchungen verwendete Messtechnik zur Ermittlung der Fahrzeugdynamik vorgestellt. Aus den Erkenntnissen der beschriebenen Literatur wurde ein eigenes System entwickelt, mit dem die Lage des Fahrzeuges zur Straße messtechnisch bestimmt werden kann.

Zum Einsatz kam, ähnlich wie bei KASABA [40], ein Neigungssensor, mit dessen Hilfe der Winkel α des Fahrzeuges zur Horizontalen, mit einer zeitlichen Auflösung von 255 Hz, bestimmt werden kann. Zusätzlich kamen wie bei HUHNS [37] und FLANNAGAN [97] zwei Abstandssensoren zum Einsatz, die an der Front und am Heck des Fahrzeuges befestigt wurden. Durch Kenntnis der Länge des Fahrzeuges kann über den Tangenssatz der Nickwinkel bestimmt werden. Die Abstandssensoren können mit einer zeitlichen Auflösung von 30 Hz ausgelesen werden. Eine Charakterisierung der Sensoren fand unter Labor- und Realbedingungen statt und zeigte eine Genauigkeit von ± 3 mm in einem Arbeitsbereich zwischen 20 cm und 60 cm. Der Fehler der sich dadurch auf die Berechnung des Nickwinkels ergibt, befindet sich in einem Bereich von $0,07^\circ$ bis $0,09^\circ$ abhängig von der Länge des Fahrzeuges. *Abbildung 3-3* zeigt einen schematischen Aufbau der Positionierung der Messtechnik am Fahrzeug.

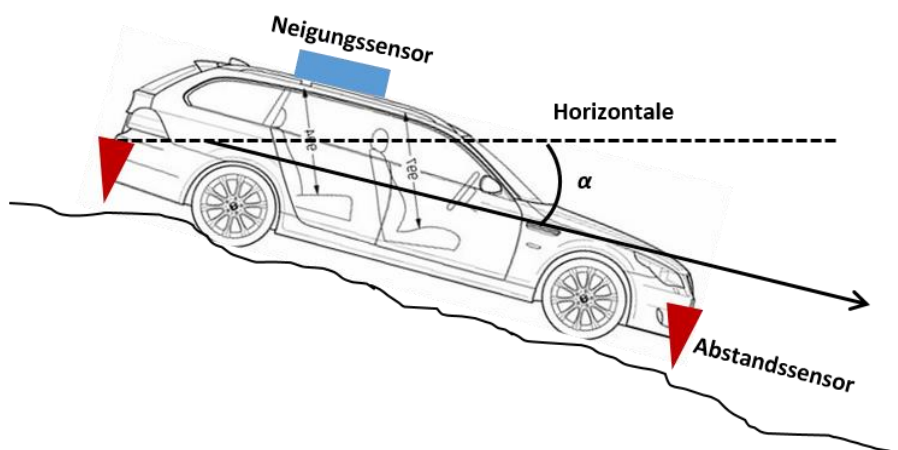


Abbildung 3-3: Positionierung der verwendeten Sensoren am Fahrzeug: In blau ist der Neigungssensor an der Karosserie des Fahrzeuges und in rot sind die beiden Abstandssensoren, jeweils an der Front und am Heck dargestellt

Die Positionierung der Abstandssensoren an der Front und am Heck des Fahrzeuges basiert dabei auf den Untersuchungen zur Bestimmung der Fahrzeugneigung von HUHNER [37], FLANNAGAN [97] und LEHNERT [102]. Durch die gleichzeitige Verwendung von Abstands- und Neigungssensoren ist es möglich, die Lage des Fahrzeuges in Bezug zur Straße zu bestimmen und dadurch die Fahrzeugdynamik zu ermitteln. Die Abstandssensoren arbeiten auf Basis der Triangulation und liefern ein analoges Ausgangssignal, das mit einem Analog-Digital-Wandler digitalisiert und an einen Mikrocontroller gesendet wird.

Um das Regelverhalten der dLWR ermitteln zu können, wurde ein zusätzlicher Neigungssensor direkt am Projektionsmodul des Scheinwerfers befestigt. Dies ist aus Platzgründen nur für Fahrzeuge mit HID-Scheinwerfern möglich, da die Scheinwerferhersteller zum Tausch der Xenon-Entladungslampe eine Wartungsklappe vorgesehen haben. Scheinwerfer mit Halogenleuchtampen besitzen zwar auch eine solche Klappe, allerdings ist wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben, bei diesen Scheinwerfern keine aLWR bzw. dLWR vorgeschrieben. Durch diese Klappe wurde ein zweiter Neigungssensor direkt an der Halterung der Entladungslampe befestigt, der sich bei jeder Bewegung des Lichtkegels durch die Regelung der LWR mitbewegt. Da die Daten des Neigungssensors temperaturabhängig sind, wird aufgrund der hohen Temperaturen der Entladungslampe zusätzlich die Temperatur überwacht. Durch die beiden Neigungssensoren, an der Entladungslampe und an der Karosserie des Fahrzeuges ist es möglich, sowohl die Regelgeschwindigkeit, als auch die Winkeländerungen des Lichtkegels zu erfassen.

3.2.3 Messtechnik zur Bestimmung der Blendung

In *Abbildung 3-4* ist aus Fahrerperspektive des Messfahrzeuges eine Übersicht der verbauten Messtechnik zu erkennen, auf die im Folgenden genauer eingegangen wird.

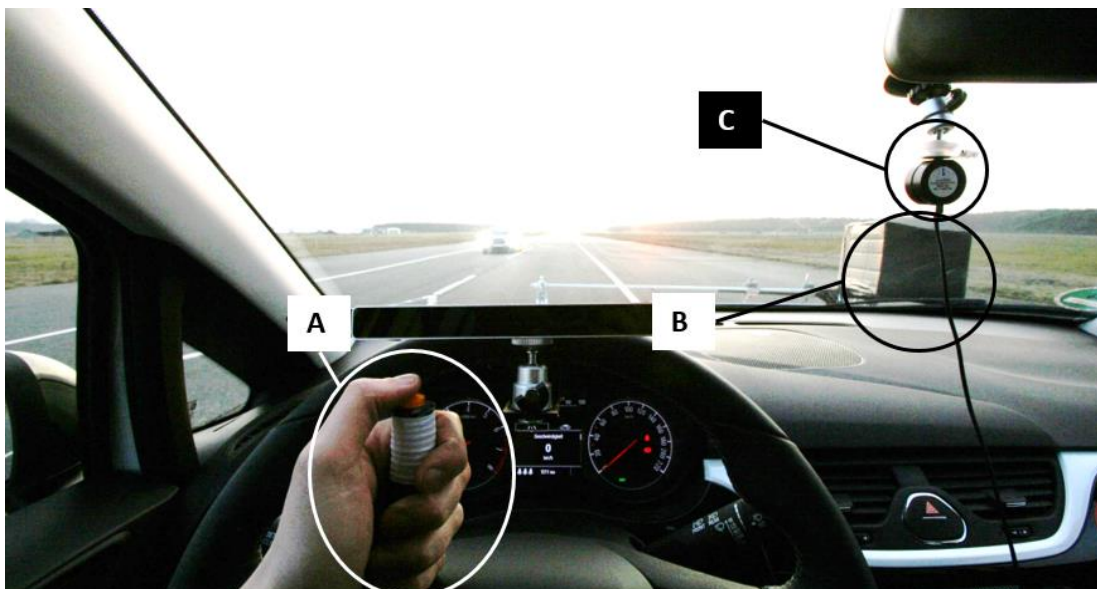


Abbildung 3-4: Eingesetzte Messtechnik im Messfahrzeug: A: Blendungsknopf, B: Kontrastbox und C: Beleuchtungsstärkemesskopf

Bei jedem Messfahrzeug wurde die Beleuchtungsstärke auf der Innenseite der Frontscheibe zwischen Fahrer- und Beifahrersitz gemessen (vgl. *Abbildung 3-4 C*). Diese Position hat sich in ersten Vorversuchen bewährt, da eine Positionierung direkt neben Fahrer oder Beifahrer bereits bei kleinen Bewegungen der jeweiligen Probanden zu einer Schattenbildung auf dem Messkopf geführt hat. Das eingesetzte Beleuchtungsstärkemessgerät vom Typ X-11 der Firma Gigahertz-Optik kann in einem Bereich von 0,1 lx bis 15 lx mit einer Toleranz von $\pm 0,3 \%$ und einer zeitlichen Auflösung von 50 ms (20 Hz) Daten aufzeichnen.

Zusätzlich zur Beleuchtungsstärke wurde mit einem „Blendungsknopf“ der Zeitpunkt erfasst, zu dem die Probanden auf dem Fahrersitz eine Blendung empfunden haben (vgl. *Abbildung 3-4 A*). Die Probanden waren aufgefordert diesen Knopf zu drücken, sobald sie sich geblendet fühlten. Der Knopf bewirkt ein Interrupt im Messsystem und der Zeitpunkt wird abgespeichert, so dass später alle aufgezeichneten Daten synchronisiert werden können. Da der Blendungsknopf bei einer subjektiv gefühlten Blendung gedrückt werden sollte, wird hierdurch die psychologische Blendung aufgezeichnet.

Zur Bestimmung der physiologischen Blendung (vgl. Abschnitt 2.3.1) wurde wie bereits in früheren Untersuchungen von ZYDEK [15], eine Kontrastbox eingesetzt (vgl. *Abbildung 3-4 B*). Mit dieser ist es möglich, den Schwellenkontrast, also den gerade noch wahrnehmbaren Kontrast, dynamisch zu bestimmen. Hierzu war in einer schwarzen Box eine weiße LED hinter einer kreisförmigen Streuscheibe angebracht. Während des Versuchs wurde die Helligkeit der LED automatisch um ca. 1 % für jede 20 ms gesteigert. Sobald die LED durch den Probanden vor dem dunklen Umfeld in der Box wahrgenommen werden konnte, hatten die Probanden die Aufgabe einen Knopf zu drücken. Das Drücken des Knopfes führte zu einer Reduzierung der Helligkeit der LED um ca. 1,5 %. Durch wiederholtes Drücken des Knopfes sollte die Helligkeit der LED immer genau auf der Schwelle zu „gerade noch wahrnehmbar“ gehalten werden. Diese Kontrastanpassung durch die Probanden erfolgte kontinuierlich während jedes Durchlaufs. Dies hat zur Folge, dass die Kontrastschwelle bei einem sich nähernden Testfahrzeug ansteigt. Die LED musste demzufolge immer heller eingestellt werden, bis das entgegenkommende Fahrzeug vollständig passiert war. Für den Fall, dass Lichtpulse durch das Testfahrzeug entstanden, wurde dem Probanden die Möglichkeit gegeben, über einen weiteren Knopf die Helligkeit der LED sprunghaft um ca. 3 % zu erhöhen. Die angegebenen Werte wurden in mehreren Vorversuchen ermittelt. *Abbildung 3-5* zeigt den schematischen Aufbau, wie der Schwellenkontrast während eines Durchlaufs dynamisch ermittelt wird.

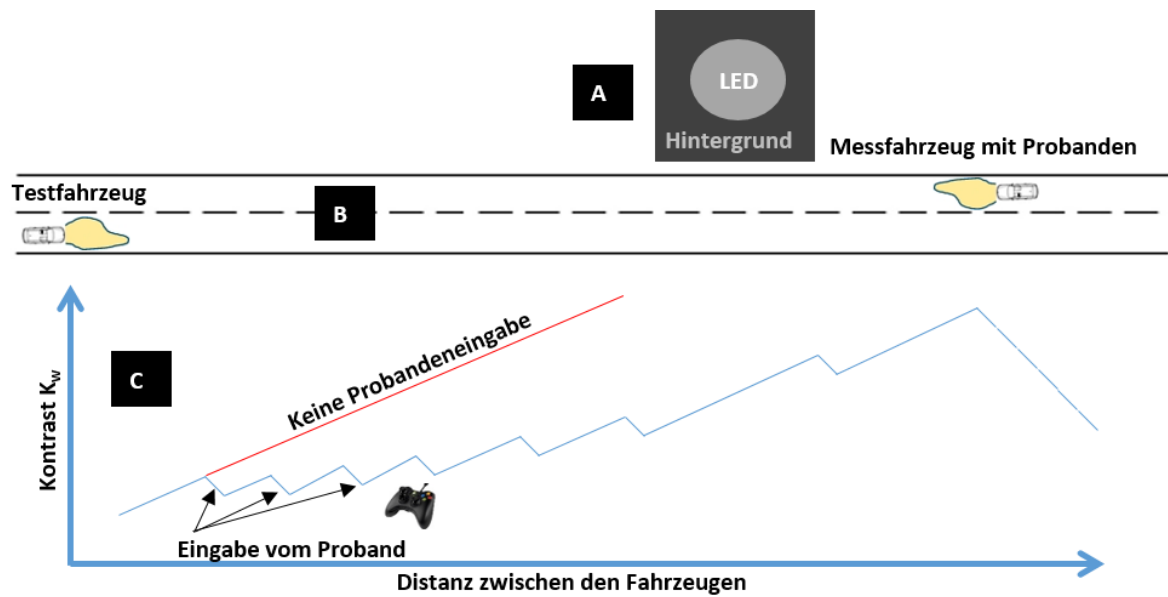


Abbildung 3-5: Ermittlung des dynamischen Schwellenkontrastes nach [15] während eines Durchlaufs **A**: Kontrastbox, **B**: Messstrecke, **C**: grafische Darstellung des Kontrastes in Abhängigkeit des Abstandes

Die Kontrastbox wurde nur für den Beifahrer eingesetzt und so positioniert, als ob der Proband auf dem Beifahrersitz ein Objekt in 50 m Entfernung auf der rechten Straßenseite detektieren würde (vgl. ZYDEK [15]).

Insgesamt haben 47 Probanden ihre Blendungsbewertungen abgegeben. 28 Personen waren unter 30 Jahre alt und werden im Folgenden als „jüngere Probanden“ bezeichnet. 19 Probanden waren über 40 Jahre alt. Auf Basis der Daten von LERMAN [61] werden diese Probanden aufgrund der ab dem 40. Lebensjahr deutlich auftretenden Vergilbung der Augenlinse im Folgenden als „ältere Probanden“ bezeichnet. Der jüngste Proband war 20 Jahre alt und der älteste 66 Jahre alt. Ein Histogramm mit der Altersverteilung der Probanden ist im Anhang zu sehen (vgl. *Abbildung A-2*).

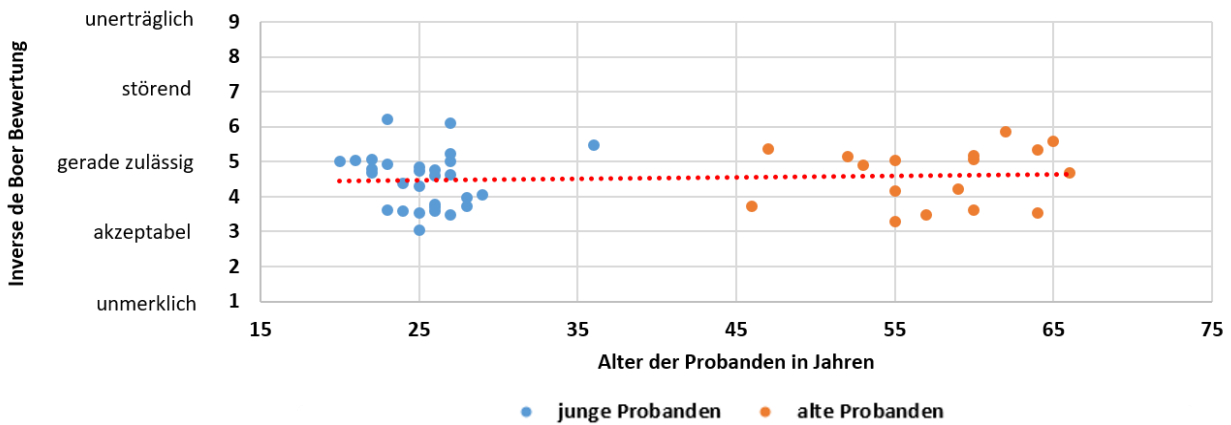
3.3 Ergebnisse

Dieses Kapitel gibt einen Überblick der Ergebnisse, die in diesem Feldtest generiert wurden. Sie sind unterteilt in Ergebnisse der psychologischen und physiologischen Blendung sowie in die photometrischen Ergebnisse gefolgt vom Fazit.

3.3.1 Probandenbewertungen

Der vorliegende Feldtest wurde mit 47 Probanden durchgeführt, die 2538 Blendungsbewertungen auf Basis der de Boer Bewertungsskala abgegeben haben. Diese große Bewertungsanzahl wird im Folgenden dahingehend untersucht, inwieweit das Probandenalter, die Sitzposition (Fahrer-, Beifahrersitz) oder eine Sehhilfe, Einfluss auf die Blendungsbewertung haben.

Da die de Boer Skala eine Ordinalskala ist, werden in *Abbildung 3-6* die Mediane der psychologische Blendung jedes einzelnen Probanden in Abhängigkeit dessen Alter dargestellt. Demnach besteht die Abbildung aus 47 Datenpunkten, wobei jeder Datenpunkt aus dem Median aller de Boer Bewertungen eines Probanden entspricht. Zusätzlich ist in Rot eine lineare Regressionsgerade dargestellt.



*Abbildung 3-6: Psychologische Blendung in Abhängigkeit des Alters **Blau:** junge Probanden, **Orange:** alte Probanden*

Die Abbildung zeigt die psychologische Blendung in Form der inversen de Boer Bewertung. Die blauen Punkte zeigen die jungen Probanden und die orangenen die alten Probanden ab einem Alter von 40 Jahren. In rot ist die Regressionslinie dargestellt, die mit einer Steigung von $m = 0,0042$ einen leichten Anstieg aufweist. Dies deutet auf einen minimalen Einfluss des Alters auf die psychologische Blendung. Die jungen Probanden weisen eine mediane inverse de Boer Bewertung von 4,6 ($\sigma = 0,8$) und die alten Probanden eine mediane inverse de Boer Bewertung von 4,9 ($\sigma = 0,8$) auf, eine Steigerung die den minimalen Einfluss unterstreicht. Eine Signifikanzanalyse mit Hilfe des Friedman-Tests zeigt allerdings keine signifikante Abhängigkeit der de Boer Bewertung mit dem Alter der Probanden. Dies könnte mit der Auslegung des Feldtestes zu tun haben, bei dem lediglich Abblendlichtverteilungen untersucht wurden. Zusätzlich zum Alter wird in der folgenden *Abbildung 3-7* ein Vergleich der medianen psychologischen Blendung zwischen Fahrer und Beifahrer, sowie zwischen Probanden mit und ohne Sehhilfe gezeigt. Insgesamt haben am Feldtest 19 Probanden mit einer Sehhilfe teilgenommen und haben 1029 Blendungsbewertungen abgegeben. Die Fehlerbalken zeigen die einfache Standardabweichung.

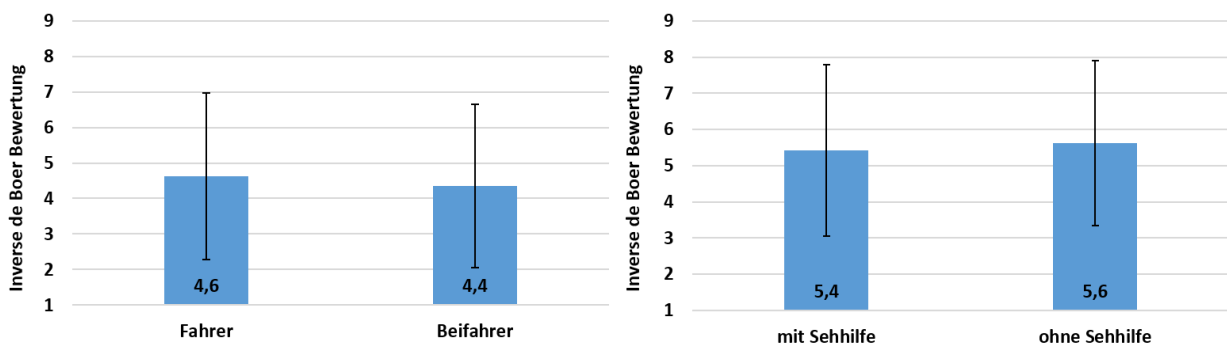


Abbildung 3-7: Vergleich der psychologischen Blendung *links*: für Fahrer und Beifahrer, *rechts*: mit und ohne Sehhilfe

Die dargestellten Mediane vom Beifahrer und der Probanden mit Sehhilfe sind im Vergleich etwas geringer, da sich die Standardabweichung allerdings deutlich überschneidet, kann höchstens von einer Tendenz die Rede sein. Der Friedman-Test bestätigt diese Aussage, weshalb die de Boer Bewertungen in der folgenden Auswertung zusammen betrachtet werden.

3.3.2 Psychologische Blendung

In *Abbildung 3-8* sind die Mediane der psychologischen Blendung anhand der de Boer Bewertung aufgetragen. Die statistische Auswertung der Bewertungen im vorherigem Kapitel hat gezeigt, dass die Daten normalverteilt sind und kein signifikanter Unterschied zwischen Fahrer, Beifahrer und den beiden Altersgruppen besteht. Die abgebildeten Daten sind in die drei Fahrwerkskategorien unterteilt - weich, mittel und hart. Die Fehlerbalken zeigen die einfache Standardabweichung. Eine hohe inverse de Boer Bewertung bedeutet eine hohe Bewertung der psychologischen Blendung.

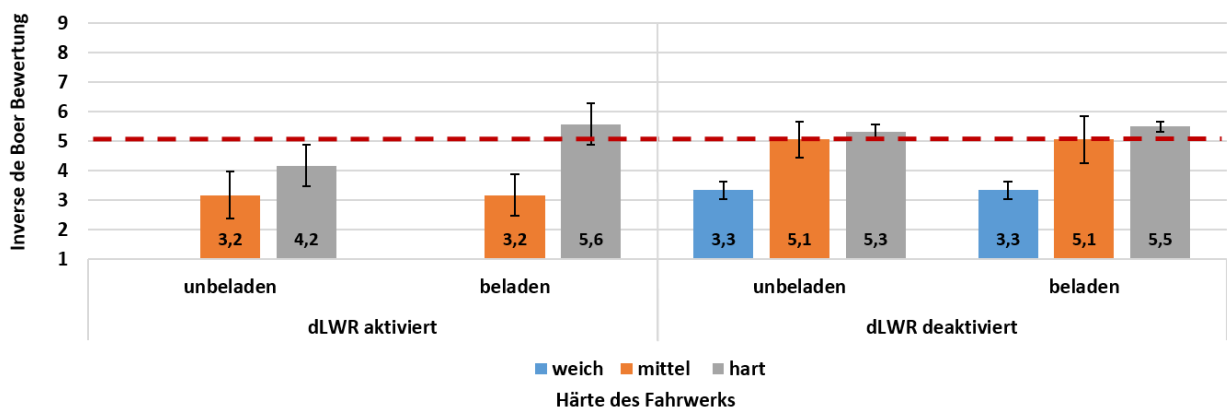


Abbildung 3-8: Psychologische Blendung: Unterteilt in beladen und unbeladen, dLWR aktiviert und deaktiviert und Fahrwerkshärte

Auf der linken Seite der Abbildung sind die Daten für die aktivierter dLWR aufgetragen. Hier ist zu erkennen, dass bei einer mittleren Fahrwerkshärte (orange), die psychologische Blendung für

beide Beladungszustände keine Unterschiede aufweist. Eine Deaktivierung der dLWR führt zu einem signifikanten Anstieg der Blendungsbewertung von 3,2 auf 5,1. Dies bedeutet einen Anstieg von „akzeptabel“ auf „gerade zulässig“.

Bei den harten Fahrwerken führt eine Beladung ebenfalls zu einer signifikanten Erhöhung der Blendung von 4,2 auf 5,6. Ähnliche Bewertungen werden auch nach Deaktivierung der dLWR ermittelt (unbeladen 5,3 und beladen 5,5). Somit verursacht ein beladenes Fahrzeug mit hartem Fahrwerk, vergleichbare Blendungsbewertungen wie mit deaktivierter dLWR. Der Grund hierfür liegt in der Fahrzeugdynamik, auf die in den nachfolgenden Unterkapiteln näher eingegangen wird.

Bei den weichen Fahrwerken ist im Falle einer Beladung keine signifikante Veränderung der psychologischen Blendung zu beobachten (unbeladen und beladen 3,3). Zu bemerken ist hierbei, dass das Fahrzeug mit dem weichen Fahrwerk, Scheinwerfer mit Halogenglühlampen verbaut hat und somit auch keine dLWR hat, weshalb keine Daten für aktivierter dLWR vorhanden sind.

Um den Einfluss der Fahrzeugdynamik auszuschließen, wurden bei einem Fahrzeug, dem Opel Insignia, die Scheinwerfer von HGL auf HID getauscht. Die mediane psychologische Blendung dieses Fahrzeuges mit den unterschiedlichen Scheinwerfern ist in *Abbildung 3-9* zu sehen.

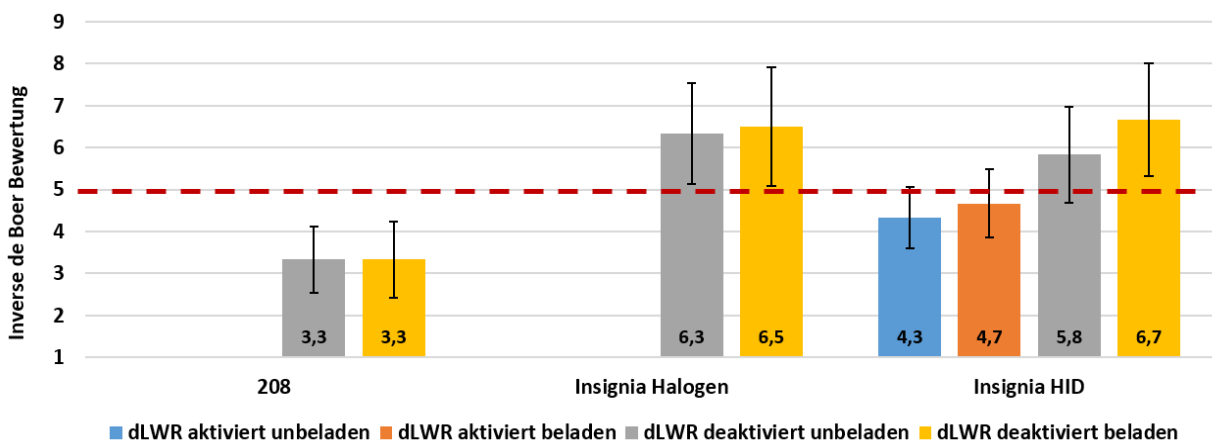


Abbildung 3-9: Psychologische Blendung von dem Fahrzeug, bei dem die HGL-Scheinwerfer auf HID-Scheinwerfer getauscht wurden (Insignia Halogen, Insignia HID) und dem zweiten Fahrzeug mit Halogen-Scheinwerfern (Peugeot 208)

Aus der Grafik geht hervor, dass beim Insignia mit den HID-Scheinwerfern bei aktivierter dLWR und beiden Beladungszuständen (blau und orange), die psychologische Blendung in einem Bereich von „gerade noch zulässig“ bewertet wird. Bei Deaktivierung der dLWR steigt die psychologische Blendung an und weist, sowohl im beladenem als auch im unbeladenem Zustand keine signifikanten Unterschiede zum Halogenscheinwerfer auf (Halogen 6,3 HID 5,8). Somit haben Halogenscheinwerfer und HID-Scheinwerfer mit deaktivierter dLWR dieselbe psychologische Blendung zur Folge. Bei einem Vergleich der psychologischen Blendung des Peugeot 208 und Opel Insignia, beide mit Halogen-Scheinwerfern und H7-Leuchtmittel, ist eine signifikant niedrigere Bewertung zu erkennen. Der Grund hierfür liegt in der unterschiedlichen Lichtverteilung, auf die im Kapitel 3.3.4.1 näher eingegangen wird.

Zur statistischen Auswertung wurde in diesem Abschnitt der Wilcoxon-Test verwendet, da die de Boer Bewertungen als unabhängige Stichproben betrachtet werden. Unabhängig heißt in diesem Sinne, dass die Messungen sich nicht gegenseitig beeinflussen und untereinander austauschbar sind.

Neben den de Boer Bewertungen, wurden auch Daten mit dem Blendungsknopf aufgezeichnet, die die psychologische Blendung beschreiben. Der Blendungsknopf wird von den Probanden betätigt, falls ein Lichtpuls des entgegenkommenden Testfahrzeuges während eines Durchlaufs als blendend empfunden wurde (de Boer > 5). Da jeder Proband eine individuelle Schwelle für das Drücken des Blendungsknopfes hat, werden vor einem Vergleich der Ergebnisse, alle Daten standardisiert. Bei der Standardisierung werden die Daten in z-Werte umgerechnet. Die Werte nach der Transformation werden dann in Vielfachen der Standardabweichung gemessen und weisen einen Mittelwert von null auf [103]. Durch die z-Transformation ist es möglich die Daten von allen Probanden miteinander zu vergleichen und die Anzahl der Betätigungen auf Signifikanz zu untersuchen. Die Fehlerbalken zeigen die einfache Standardabweichung. Vereinfacht gesagt, bedeutet ein z-transformierter Wert von Null, eine durchschnittliche Häufigkeit der „Blendungsknopf-Betätigungen“ bzw. blendenden Lichtpulsen und ein positiver Wert, eine überdurchschnittlich hohe Anzahl an Lichtpulsen.

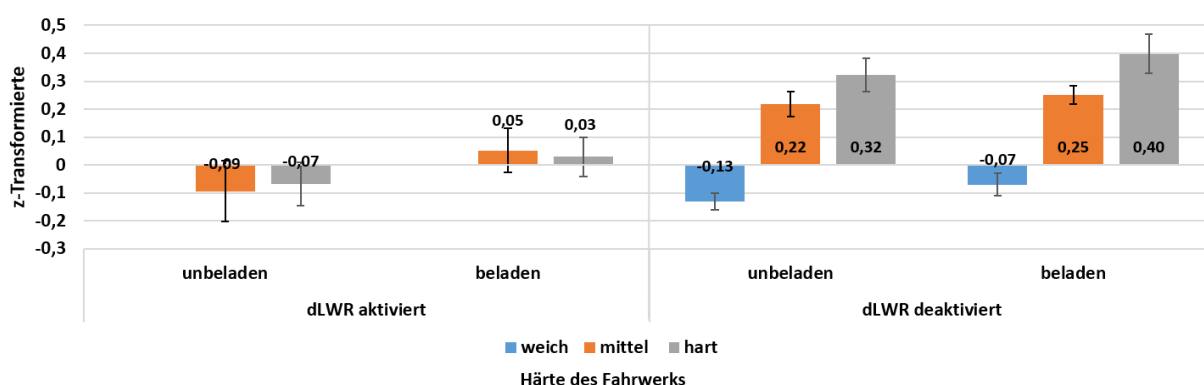


Abbildung 3-10: z-Transformation der „Blendungsknopf-Betätigungen“: Unterteilt in beladen und unbeladen, dLWR aktiviert und deaktiviert und Fahrwerkshärte

Die z-transformierten Werte wurden anhand des Shapiro-Wilk-Tests positiv auf Normalverteilung überprüft und im Anschluss mit dem t-Test auf Signifikanz überprüft.

Es ist ersichtlich, dass bei aktivierter dLWR die z-transformierten Werte, sich um den Null Wert bewegen, unabhängig des Beladungszustandes und der Härte des Fahrwerks. Bei deaktivierter dLWR dagegen weisen weiche Fahrwerke sowohl im unbeladenem als auch im beladenen Zustand eine unterdurchschnittliche Anzahl an Blendpulsen auf (unbeladen -0,13 und beladen -0,07). Bei den Werten für mittlere und harte Fahrwerke, werden dagegen überdurchschnittlich viele Blendpulse registriert und es ist ein leichter Anstieg zwischen beladen und unbeladen zu erkennen. So kommt es bei den mittleren Fahrwerken zu einer Steigerung von 0,22 im unbeladenem Fall auf 0,25 im beladenen und bei den harten Fahrwerken von 0,32 auf 0,4. Zwischen den beladungszuständen konnte anhand des t-Tests kein signifikanter Unterschied festgestellt werden ($p \approx 0,1$).

Allerdings ist ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Fahrwerksabstimmungen zu sehen ($p = 0,03$).

3.3.3 Physiologische Blendung

Um die physiologische Blendung und damit die messbare Reduzierung der Sehleistung zu quantifizieren, wurde bei jedem Durchlauf der dynamische Schwellenkontrast $K_{w,th}$ in Abhängigkeit des Abstandes zwischen dem jeweiligen Testfahrzeug und der Messfahrzeuge bestimmt. Der in *Abbildung 3-11* gezeigte Kontrast wurde nach Gleichung (2-4) bestimmt und zeigt die Mittelwerte für den Distanzbereich von 400 m bis 0 m. Die Fehlerbalken zeigen die einfache Standardabweichung. Ein hoher Schwellenkontrast bedeutet eine hohe physiologische Blendung, wodurch die Sehleistung beeinträchtigt wird. Die gezeigten Daten basieren hierbei ausschließlich auf Probandenantworten, die kausal sind. Eine Analyse der Messdaten hat gezeigt, dass einige Probanden den verwendeten Messaufbau nicht richtig verwendet haben. So ist beispielsweise bei einigen Probanden der Schwellenkontrast gesunken, obwohl die Blendbelastung gestiegen ist.

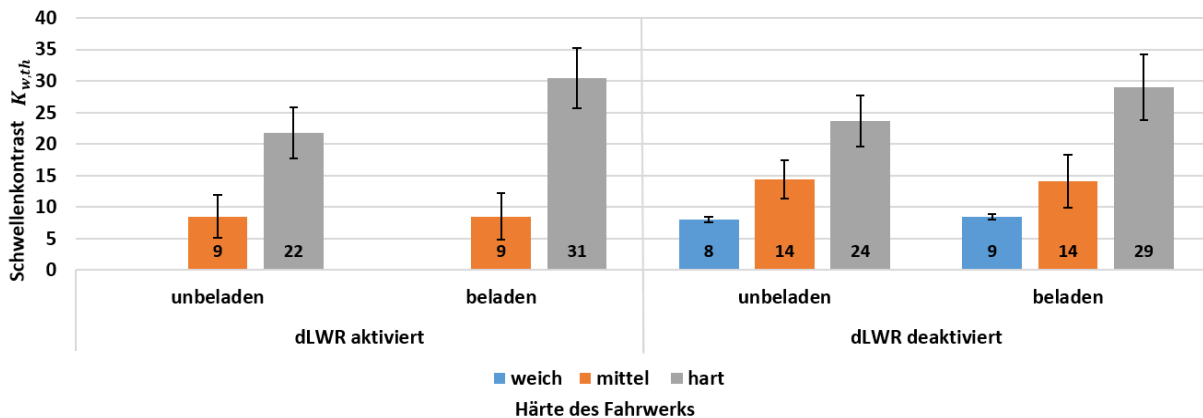


Abbildung 3-11: Mittlerer Schwellenkontrast: Unterteilt in beladen und unladen, dLWR aktiviert und deaktiviert und Fahrwerkshärte

Die Ergebnisse der physiologischen Blendung sind vergleichbar mit denen der psychologischen. Zu erkennen ist, dass mit mittlerer Fahrwerkshärte und aktivierter dLWR, eine Beladung zu keinem signifikantem Anstieg der physiologischen Blendung führt (unladen und beladen 9). Harte Fahrwerke sind dagegen auf Beladung anfälliger und weisen einen Anstieg des Schwellenkontrastes auf (unladen 22 und beladen 31). Für den Fall, dass die dLWR deaktiviert wird, weisen mittlere und harte Fahrwerke bei Beladung ebenfalls einen gesteigerten Schwellenkontrast auf, der im Vergleich zu aktivierter dLWR signifikant ist und eine Reduzierung der Sehleistung zur Folge hat. Bei weichen Fahrwerken ist bei Beladung kein signifikanter Unterschied zu beobachten. Ein exemplarischer Verlauf der Kontrast-Box LED in Abhängigkeit des Abstandes ist im Anhang zu sehen (siehe *Abbildung A-3*).

Da die Daten des Schwellkontrastes anhand des Shapiro-Wilk-Test normalverteilt vorliegen, wird zur statistischen Auswertung der t-Test verwendet, bei dem abhängige Stichproben getestet wer-

den. Abhängig heißt, dass dieselben Probanden zwei oder mehr unterschiedliche Situationen bewerten, die im vorliegenden Feldtest die unterschiedlichen Beladungszustände und dLWR Einstellungen sind. Eine Übersicht der verwendeten Statistik kann im Anhang gelesen werden (siehe Anhang: Statistik auf S. 145).

3.3.4 Photometrische Ergebnisse

Nachdem in den vorherigen Abschnitten die Blendungsbewertungen gezeigt wurden, wird in diesem Abschnitt auf die photometrischen Daten eingegangen. Diese sind unterteilt in Ergebnisse der Belichtung und der Fahrzeugdynamik.

3.3.4.1 Belichtung

Durch die gemessene Beleuchtungsstärke ist es möglich die Belichtung zu bestimmen. Diese ist die Integration der gemessenen Beleuchtungsstärke über die Zeit. SPRUTE zeigte, dass ein Entblenden des Gegenverkehrs bei einem Begegnungsabstand von 400 m erfolgen sollte [13], weshalb die Belichtung für diesen Abstandsbereich nach (3-1) berechnet wird.

$$\text{Belichtung} \quad H_{0 \text{ bis } 400 \text{ m}} \left(80 \frac{\text{km}}{\text{h}} \right) = \int_{0 \text{ s}}^{18 \text{ s}} E(t) dt \quad (3-1)$$

Bei einer konstanten Geschwindigkeit von 80 km/h werden für eine Distanz von 400 m, 18 s benötigt. Somit ergibt sich die Belichtung die in *Abbildung 3-12* gezeigt wird. Die Fehlerbalken zeigen die einfache Standardabweichung.

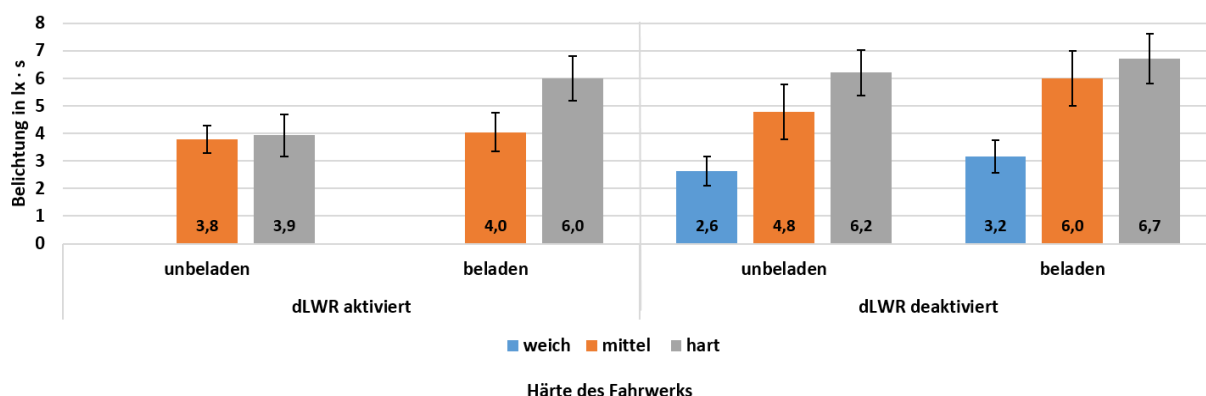


Abbildung 3-12: Ermittelte Belichtung: Unterteilt in beladen und unbeladen, dLWR aktiviert und deaktiviert und Fahrwerkshärte

Auch diese Ergebnisse zeigen ähnliche Tendenzen wie die zuvor bei der physiologischen und psychologischen Blendung. Für mittelharte Fahrwerke und aktivierter dLWR, ist kein signifikanter Unterschied zwischen beladenem und unbeladenem Zustand zu erkennen (unladen 3,8 lx · s und beladen 4,0 lx · s) ($p \approx 0,2$). Bei harten Fahrwerken dagegen, ist der Unterschied signifikant und steigt von 3,9 lx · s auf 6 lx · s ($p = 0,01$). Harte Fahrwerke haben bei deaktivierter dLWR ähnlich hohe Belichtungen, wie im beladenen Zustand und aktivierter dLWR. Es konnten keine signifikanten Unterschiede bei Beladung für mittlere und harte Fahrwerke festgestellt werden ($p \approx 0,4$). Bei

weichen Fahrwerken führt eine Beladung zu keinem signifikantem Anstieg in der Belichtung ($p = 0,2$). Allerdings fällt auf, dass die Belichtung hier die niedrigsten Werte aufweist, weshalb von einem geringen Lichtstrom der Scheinwerfer ausgegangen werden kann. Zur statistischen Auswertung wurde auch hier der t-Test verwendet, da die Beleuchtungsstärke und die daraus resultierende Belichtung normalverteilt vorliegen.

3.3.4.2 Fahrzeugdynamik

Um die Anforderungen an die dLWR zu bestimmen ist es nötig, Informationen über die Fahrzeugdynamik zu erlangen. Wie schon beschrieben, wird durch zwei Abstandssensoren die sich an Fahrzeugfront und -heck befinden, sowie durch einen Neigungssensor der Nickwinkel des Fahrzeuges bestimmt. In *Abbildung 3-13* sind die gemessenen Fahrzeugwinkel beim Beschleunigen (links) und bei konstanter Fahrt (rechts) dargestellt. Bei der Darstellung handelt es sich um einen Boxplot, bei dem fünf Punkte einer Verteilung gezeigt werden. Diese sind:

1. Antennen
2. 75 % Quartil – oberer Rand der dargestellten Box
3. Median – horizontaler Strich in der Box
4. 25 % Quartil – unterer Rand der dargestellten Box
5. Minimum und Maximum

Die Box begrenzt demzufolge das 25 % und das 75 % Quartil und beinhaltet somit 50 % aller Datenpunkte und wird auch als Interquartilsabstand (Abk.: IQA) bezeichnet. Dieser gibt die Länge der Antennen an, die um den Faktor 1,5 länger sind als der IQA. Daten die außerhalb des Antennenbereichs liegen, werden mit roten Kreuzen gekennzeichnet und werden häufig als Ausreißer bezeichnet (vgl. [104], [105]).

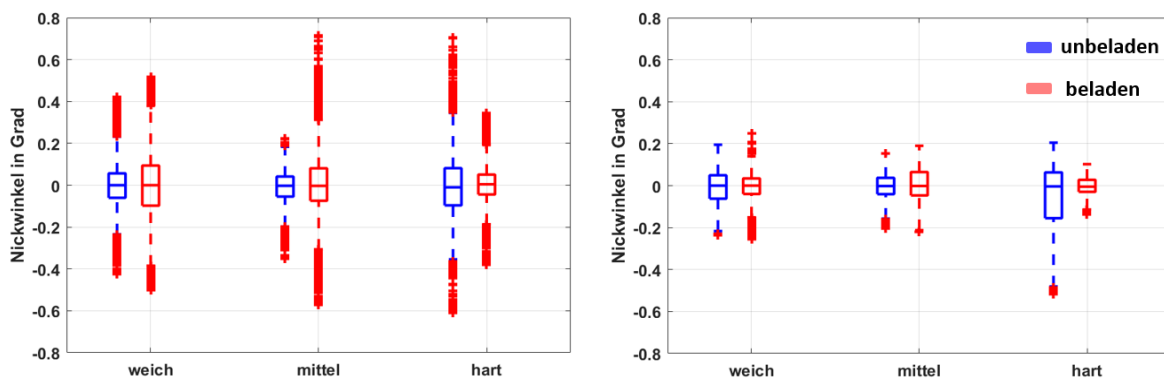


Abbildung 3-13: Boxplot-Darstellung des Fahrzeugwinkels: **Links:** beim Beschleunigen und **rechts:** bei konstanter Fahrt

Zur besseren Vergleichbarkeit der Fahrzeugwinkel zwischen beladen und unbeladen, wurden die Daten auf den Ursprung (0°) verschoben. In einem direkten Vergleich der beiden Abbildungen fällt auf, dass bei konstanter Fahrt (rechts) kleinere Fahrzeugwinkel und weniger Ausreißer auftreten, als bei der Beschleunigungsfahrt (links). Alle Winkel mit Ausnahme von unbeladenen harten Fahrwerken, befinden sich in einem Wertebereich zwischen $\pm 0,2^\circ$. Beim Beschleunigen kommt es bei Fahrwerken mit mittlerer Härte im beladenem Zustand zu den meisten Ausreißern, die im Maxi-

mum einen Winkel von $0,75^\circ$ erreichen. Dieser Winkel ist größer als der Nickwinkel der Scheinwerfer, der bei den untersuchten Fahrzeugen $0,57^\circ$ beträgt, wodurch andere Verkehrsteilnehmer ohne den Eingriff einer dLWR geblendet wären.

3.3.4.3 Latenzzeit der dLWR

Zusätzlich zum Neigungssensor an der Fahrzeugkarosserie, wurde ein zweiter direkt am Scheinwerfermodul angebracht, der von der dLWR geregelt wird. Der Neigungssensor konnte allerdings bei drei der getesteten Fahrzeuge angebracht werden, die einerseits eine dLWR und andererseits eine Wartungsklappe am Scheinwerfer hatten (vgl. 3.2.2). Durch Kombination der Fahrzeugneigungswinkel mit den Winkeln des Neigungssensors am Scheinwerfer, kann die Latenzzeit der dLWR ermittelt werden, die vom System benötigt wird, um die Scheinwerferneigung der Fahrzeugneigung anzupassen. In *Abbildung 3-14* sind die Daten der drei Fahrzeuge, für den beladenen und unbeladenen Zustand, in einem Boxplot zu sehen.

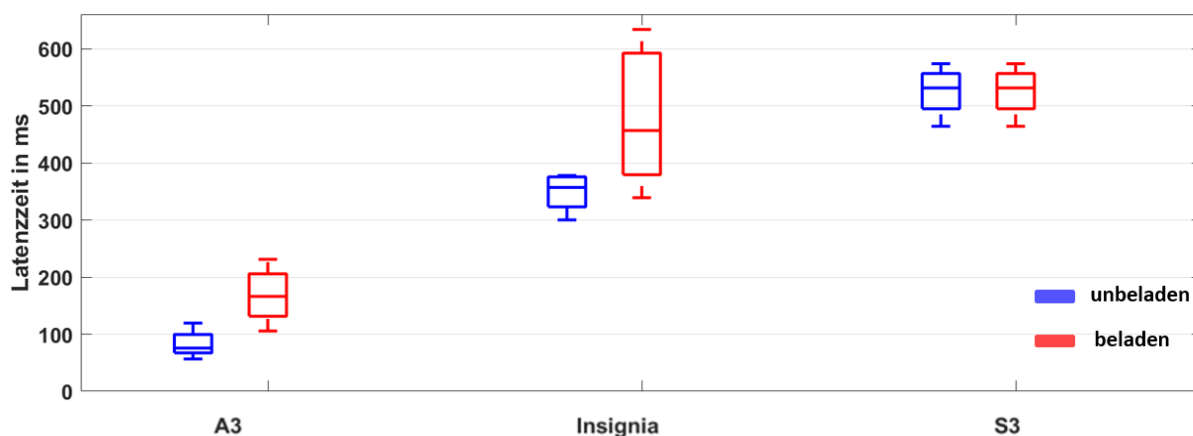


Abbildung 3-14: Latenzzeit der dLWR bei den drei Fahrzeugen bei denen ein Neigungssensor im Scheinwerfer montiert werden konnte

Bei Betrachtung der Daten fällt auf, dass beim S3, der ein hartes Fahrwerk hat, kein Unterschied bei Beladung zu erkennen sind. Hier treten, im Vergleich zu den anderen beiden Fahrzeugen mit den mittleren Fahrwerken, die höchsten Latenzzeiten auf. Beim A3 und Insignia dagegen sind signifikante Unterschiede im Falle einer Beladung zu beobachten, wodurch höhere Latenzzeiten sowohl im Median als auch im Maximum zu erkennen sind. Beim Insignia fällt außerdem auf, dass im beladenen Zustand, ein im Vergleich großes IQA gemessen wird. Dies bedeutet, dass 50 % der Daten eine große Streuung aufweisen, die sich im Bereich von 380 ms bis 600 ms bewegt.

Um eine Aussage treffen zu können, ob die steigende Latenzzeit im Falle einer Beladung bei den mittleren Fahrwerken und die hohe Latenzzeit bei dem harten Fahrwerk die psychologische Blendung beeinflusst, wird die Latenzzeit in Abhängigkeit der de Boer Bewertung in *Abbildung 3-15* dargestellt. Hierbei bestehen die Daten aus den Medianen von Fahrer und Beifahrer und den jeweils drei durchgeführten Wiederholungen. Die rote, gepunktete Linie ist eine logarithmische Regressionskurve, die das Verhalten der Parameter Latenzzeit und de Boer Bewertung beschreibt.

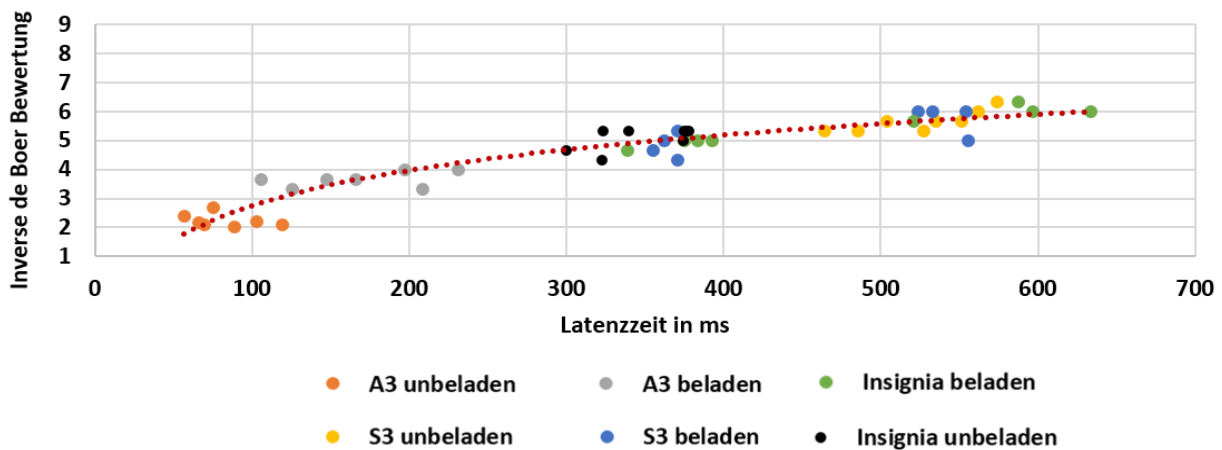


Abbildung 3-15: Korrelation zwischen der Latenzzeit und der inversen de Boer Bewertung bei den drei Fahrzeugen bei denen ein Neigungssensor im Scheinwerfer montiert werden konnte für den beladenen und unbeladenen Zustand ($R^2 = 0,91$)

In Abbildung 3-15 wird das Verhältnis zwischen der Latenzzeit und der psychologischen Blendung gezeigt. Die Regressionslinie weist eine erhöhte Güte von $R^2 = 0,91$ auf, weshalb von einer Korrelation der beiden Parametern ausgegangen werden kann. Dies bedeutet, dass mit steigender Latenzzeit der dLWR, die empfundene psychologische Blendung der Probanden ebenfalls steigt. Somit hat der S3 in beiden Beladungszuständen und der beladene Insignia eine annähernd „störende“ Bewertung der Blendung. Andererseits weisen Fahrzeuge mit einer geringen Latenzzeit eine geringe psychologische Blendung auf. Bei einer konservativen Betrachtung führt eine mittlere Latenzzeit von über 220 ms zur Blendung.

3.3.5 Fazit

Der beschriebene Feldtest hatte das Ziel, die Anforderungen für die dLWR zu quantifizieren und gleichzeitig zu überprüfen, ob eine Verknüpfung der dLWR mit dem Lichtstrom sinnvoll ist oder nicht. Hierzu wurde der Einfluss der Fahrzeugdynamik auf die Blendung untersucht, indem vier Parameter variiert wurden – Beladung (unbeladen und beladen), dLWR (aktiviert und deaktiviert), Fahrwerkseigenschaften (weich, mittel und hart) und Lichtquelle im Scheinwerfer (Halogen, HID und LED). Abbildung 3-8 zeigt, dass mit zunehmender Härte des Fahrwerkes auch die psychologische Blendung steigt. Dies wird auch durch die Ergebnisse der physiologischen Blendung und der photometrischen Ergebnisse bestätigt. Eine mögliche Ursache hierfür wird in Abbildung 3-15 gezeigt, in der die Korrelation der psychologische Blendung mit der Latenzzeit der dLWR veranschaulicht wird. Harte Fahrwerke haben eine erhöhte Latenzzeit und verursachen demzufolge überdurchschnittlich viele blendende Lichtpulse beim Gegenverkehr, wie auch in Abbildung 3-10 zu sehen ist. Der Einfluss der Lichtverteilung wird in Abbildung 3-9 verdeutlicht, in der unter anderem die psychologische Blendung des Opel Insignia mit Halogen- und HID-Scheinwerfern verglichen wird. Zu erkennen ist eine signifikant höhere psychologische Blendung beim Halogen-Scheinwerfer im Vergleich zum HID-Scheinwerfer unter StVZO konformen Bedingungen (aktivierte dLWR). Andererseits ist beim Peugeot 208 eine geringere psychologische Blendung gemes-

sen worden, obwohl beide Halogen-Scheinwerfer mit H7-Lichtquellen ausgestattet sind. Dies bestätigt auch die geringere gemessene Belichtung, sowie die Anzahl der blendenden Lichtpulse des Peugeot 208 Scheinwerfers. Demzufolge beeinflusst sowohl die Härte des Fahrwerkes als auch die Lichtverteilung bzw. die verwendeten Lichtquellen die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer. Durch die Verwendung einer dLWR kann die psychologische Blendung um 2 Bewertungspunkte und die physiologische Blendung um etwa 35 % gesenkt werden. Da es Halogen-Scheinwerfer auf dem Markt gibt die eine vergleichbare Blendung verursachen, wie HID-Scheinwerfer, kann die bestehende Anforderung, die dLWR mit dem Lichtstrom bzw. der verwendeten Lichtquelle zu verknüpfen, nicht bestätigt werden. Viel wichtiger um Blendung des Gegenverkehrs zu vermeiden, ist zumindest eine aLWR in jedem Fahrzeug zu verbauen, da wie JEBAS et al. [38] gezeigt haben, die manuelle LWR so gut wie nie verwendet wird. Zusätzlich sollte bei Verwendung einer dLWR, die Regelung des Systems mit einer Latenzzeit unter 220 ms erfolgen.

3.4 Abgeleitete Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse zunächst mit den Ergebnissen aus der Literatur verglichen und im Anschluss mögliche Korrelationen präsentiert.

3.4.1 Vergleich mit Ergebnissen der Literatur

Die Ergebnisse des vorliegenden Feldtests zeigen einen deutlichen Einfluss des Fahrwerkes auf die Nickbewegungen des Fahrzeuges und damit auf die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer. Beim Beschleunigen wurden maximale Nickwinkel η , in einem Bereich von $-0,57^\circ$ bis $+0,71^\circ$ gemessen, die mit den ermittelten Nickwinkeln von HUHNER [37] in der Stadt und auf der Landstraße, im Allgemeinen übereinstimmen. Eine Beladung führt zu noch höheren Nickwinkeln, wobei ein positiver Nickwinkel gleichzeitig zu einer Erhöhung der HDG führt, wodurch das Blendungsrisiko anderer Verkehrsteilnehmer steigt. Diese Aussage deckt sich mit den Ergebnissen von FLANNAGAN [97]. Bei positiven Nickwinkeln, ist eine erhöhte psychologische Blendung zu beobachten, wobei gleichzeitig harte Fahrwerke eine erhöhte physiologische Blendung zur Folge haben. Dies bestätigt die Aussage von ZYDEK [99], der eine hohe psychologische Blendung bei Beladung des Fahrzeuges ermittelt hat.

Ebenfalls bei Beladung und vor allem bei harten Fahrwerken treten Lichtpulse auf, deren Dauer, laut LEHNERT [96] mit der psychologischen Blendung korrelieren und längere Lichtpulse laut ROSENHAHN [51] zu einer längeren Readaptationszeit führen. Ein Histogramm mit der Dauer der in diesem Feldtest gemessenen Lichtpulse ist im Anhang zu sehen (vgl. *Abbildung A-4*). Zu erkennen ist, dass etwa 80 % der auftretenden Lichtpulse eine Dauer von unter 0,5 s aufweisen und somit laut ROSENHAHN [51] eine Readaptationszeit von etwa 1 s zur Folge haben. Bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h entspricht dies einer gefahrenen Strecke von etwa 22 m, bei dem der Fahrer wegen der erhöhten Adaptationsleuchtdichte, eine verringerte Wahrnehmung hat, da sich der Kontrast zwischen einem potentiell auftretenden Objekt und seiner Umgebung verringert.

Neben der Fahrzeugdynamik kann aus den gewonnenen Daten die psychologische Blendung von Halogen-, HID- und LED-Scheinwerfern abgeleitet werden. Hierzu werden die Fahrzeuge im unbeladenen Zustand und falls vorhanden mit aktivierter dLWR betrachtet, sodass ein Vergleich mit den Literaturergebnissen möglich ist. Bei dem Vergleich werden drei Fahrzeuge mit HID-Scheinwerfern untersucht, deren de Boer Bewertung, wie in Kapitel 3.3.2 gezeigt, keinen signifikanten Unterschied aufweisen und deswegen zusammen ausgewertet werden. Ebenfalls haben zwei Fahrzeuge mit Halogen-Scheinwerfern am Feldtest teilgenommen, deren de Boer Bewertungen, einen signifikanten Unterschied aufweisen ($p = 2,3 \cdot 10^{-14}$). Ein Boxplot mit dem Vergleich der de Boer Bewertungen der beiden Halogen-Fahrzeuge ist im Anhang zu sehen (vgl. *Abbildung A-5*). In *Abbildung 3-16* ist ein Boxplot mit den de Boer Bewertungen der drei Scheinwerferarten zu erkennen.

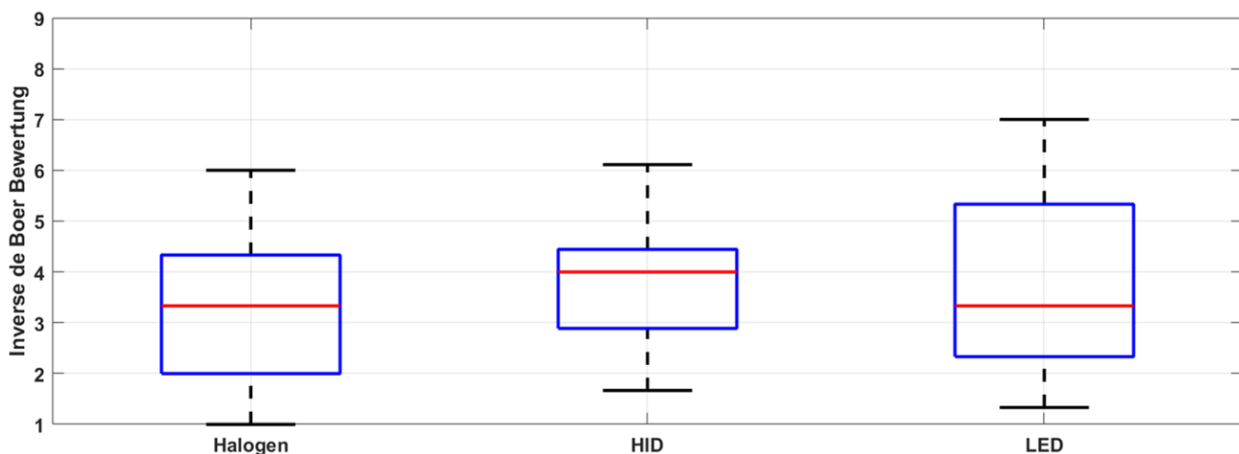


Abbildung 3-16: Vergleich der inversen de Boer Bewertungen von Halogen-, HID- und LED-Scheinwerfern

Für den Fall, dass das Fahrzeug mit Halogenscheinwerfern aus der Betrachtung ausgeschlossen wird, ist kein signifikanter Unterschied bei den drei betrachteten Scheinwerferarten zu erkennen ($p = 0,8$). Dies entspricht den Ergebnissen von ZYDEK [15] und SCHILLER [90], widerspricht allerdings den Angaben von beispielsweise FLANNAGAN [83] der eine spektrale Abhängigkeit der psychologischen Blendung in seinen Ergebnissen zeigt. Dies gilt allerdings nur, wenn beide Scheinwerferarten einen gleichen Lichtstrom liefern. Die Tatsache, dass zwei Fahrzeuge mit demselben Leuchtmittel, signifikant unterschiedliche Blendung verursachen, untermauert die Aussage dieses Feldtests, dass neben dem Lichtstrom auch andere Parameter wie beispielsweise die Lichtverteilung und die Fahrwerkseigenschaften, einen maßgeblichen Einfluss auf die psychologische Blendung haben kann.

3.4.2 Weiterführende Ergebnisse

Da in dem beschriebenen Feldtest, Blendpulse sowohl messtechnisch in Form der Beleuchtungsstärke, als auch durch das Drücken eines Knopfes aufgezeichnet wurden, ist es möglich, diese genauer zu betrachten und einen möglichen Zusammenhang zur Blendung herzuleiten. Als Ursache für Blendung wird in den meisten Fällen eine ungeeignete Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld genannt (vgl. Kapitel 2.3), die im Verhältnis zur Adaptation des menschlichen Auges durch hohe Leuchtdichten bzw. Kontraste verursacht wird. Demzufolge ist die Adaptation eine maßgebliche

Größe, von der das Blendempfinden abhängig ist. Für den in diesem Feldtest untersuchten Fall eines entgegenkommenden Fahrzeuges, adaptiert das Auge auf die Leuchtdichte der Scheinwerfer des entgegenkommenden Fahrzeuges. Auftretende Lichtpulse, die durch die Fahrzeugdynamik entstehen, erhöhen die Leuchtdichte im Gesichtsfeld, wodurch der Fahrer potentiell geblendet wird. Durch das Drücken des Blendungsknopfes wird der Zeitstempel gespeichert, der es ermöglicht, die für den Probanden blendenden Lichtpulse zu identifizieren und mit der gemessenen Beleuchtungsstärke zu vergleichen. Dies kann allerdings erst passieren, wenn vom Zeitpunkt des Drückens des Blendungsknopfes die Reaktionszeit des jeweiligen Probanden abgezogen wird. Da diese nicht mitaufgezeichnet wurde, wird von einer mittleren Reaktionszeit von einer Sekunde ausgegangen [106]. Somit wird in einem Zeitfenster von einer Sekunde vor dem Drücken nach Pulsen im Beleuchtungsstärkeverlauf gesucht. Sobald ein Puls identifiziert ist, wird das Adaptationsniveau durch den gleitenden Mittelwert der Beleuchtungsstärke von fünf Sekunden vor dem Puls gesetzt. Der Bereich von fünf Sekunden wurde in einer Voruntersuchung festgestellt und gibt einen ungefähren Wert an, nachdem die Pupille wieder readaptiert ist. In *Abbildung 3-17* ist die Korrelation zwischen dem Puls- und der Adaptations-Beleuchtungsstärke dargestellt.

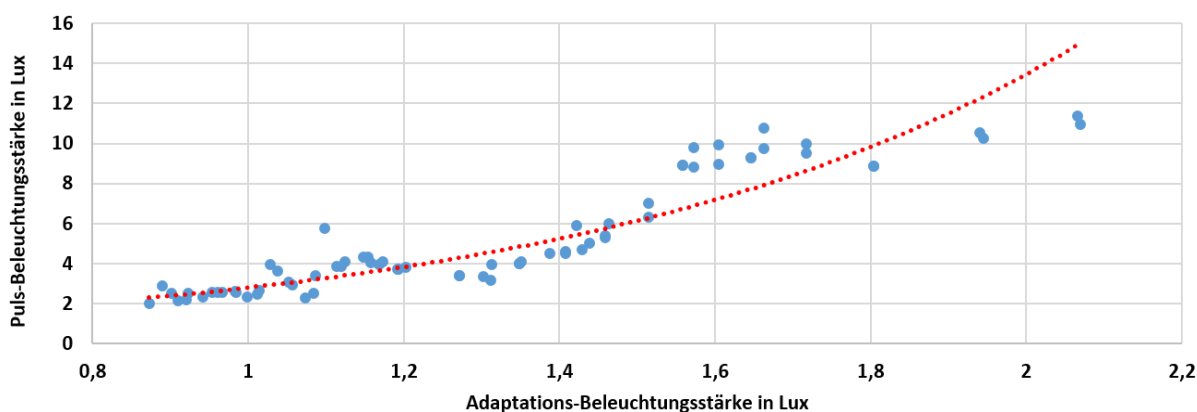


Abbildung 3-17: Verhältnis zwischen Puls- und Adaptations-Beleuchtungsstärke ($R^2 = 0,87$)

Bei der Betrachtung der in Rot dargestellten Regressionslinie der Puls- und Adaptationsbeleuchtungsstärke, ist ein exponentieller Verlauf mit einer Güte von $R^2 = 0,87$ zu beobachten, weshalb von einer Korrelation der beiden Parameter ausgegangen werden kann. Die Regressionslinie markiert gleichzeitig die Grenze zwischen nicht blendend und blendend, da die Daten auf denen des Blendungsknopfes basieren. Der exponentielle Verlauf zeigt, dass bei geringer Adaptation, schon geringfügige Lichtpulse zu einer Blendung führen können, wohingegen je heller das Auge adaptiert ist, desto unempfindlicher reagiert es auf Lichtpulse. Da bei der vorliegenden Untersuchung Abblendlichtverteilungen untersucht wurden, weist die maximale Puls-Beleuchtungsstärke einen Wert von etwa 11 lx auf.

Neben der psychologischen Blendung, wurde im beschriebenen Feldtest auch die physiologische Blendung bestimmt. Durch die mathematische Verknüpfung der beiden Blendungsarten wird im Folgenden versucht, eine Verbindung herzustellen. Als Werte für die physiologische Blendung wurden die Mittelwerte des Schwellkontrastes $K_{w,th}$, für einen Abstandsbereich von 0 m bis 400 m verwendet und mit den zugehörigen Medianen der inversen de Boer Bewertungen in *Abbildung*

3-18 aufgetragen. Eine hohe inverse de Boer Bewertung bedeutet hierbei eine hohe auftretende psychologische Blendung.

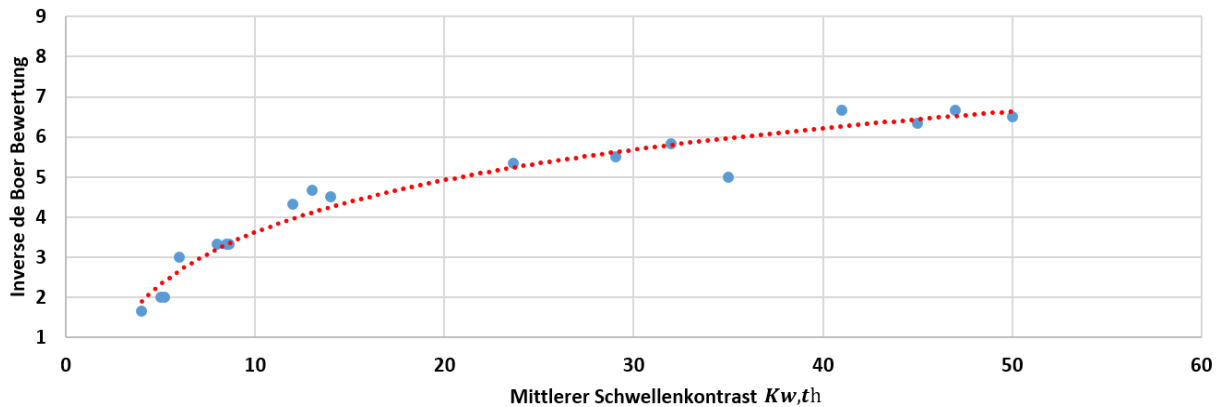


Abbildung 3-18: Physiologische zur psychologische Blendung in Form der inversen de Boer Bewertung und des mittleren Schwellkontrastes ($R^2 = 0,96$)

Die sich ergebene rote logarithmische Regressionslinie weist einen Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,96$ auf und gibt die Korrelation zwischen physiologischer und psychologischer Blendung wieder. Wie zu erwarten, erhöht sich mit steigender psychologischer Blendung der mittlere Schwellenkontrast. Die Aussage beschränkt sich hierbei auf der Blendung von sechs Abblendlichtscheinwerfern in einem Abstandsbereich von 0 m bis 400 m. Aus diesem Grund ist die vorgestellte Verknüpfung der physiologischen und psychologischen Blendung, schwer mit den in Kapitel 2.3.3 gezeigten Blendungsmodellen vergleichbar. Der Vergleich in *Abbildung 3-18* zeigt allerdings, dass physiologische und psychologische Blendung unter realen Feldtestbedingungen mathematisch korrelieren.

4 Einfluss der Verschmutzung auf blendfreie Fernlichtsysteme

In *Abbildung 4-1* ist ein Vergleich zwischen einem sauberen und schmutzigen Scheinwerfer dargestellt. Im verschmutzten Zustand verursachen die Schmutzpartikel auf der Streuscheibe ein Streuen des Lichtes in alle Richtungen, weshalb es vorkommen kann, dass die Sichtweite des Fahrers reduziert wird und es zu einer erhöhten Blendung anderer Verkehrsteilnehmern kommen kann.

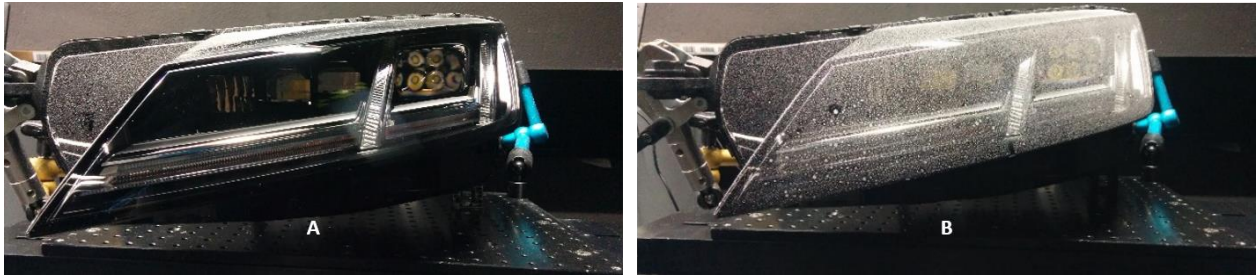


Abbildung 4-1: Vergleich zwischen sauberen und schmutzigen Scheinwerfer A: sauber und B: schmutzig

Um eine Verschmutzung der Scheinwerfer vorzubeugen, wird von der UNECE in der Regelung NR. 48 eine SRA vorgeschrieben. Diese ist verpflichtend für alle Abblendlicht-Scheinwerfer mit einer Lichtquelle über 2000 lm [33]. Durch die Einführung der 25 W Xenon-Entladungslampe, sowie durch LED-Module mit einem Lichtstrom unter 2000 lm, ist es möglich, die SRA nicht mehr zu verbauen. Einige Fahrzeughersteller verzichten deshalb auf den Einbau und berufen sich auf Gründe wie beispielsweise Reduzierung der Kosten, mehr Platz im Motorraum sowie eine erhöhte Effizienz wegen eines geringeren Fahrzeuggewichtes [17]. In der UNECE Nr. 45 [34], ist eine SRA lediglich für den Abblendlichtbereich des Scheinwerfers vorgesehen, weshalb der Fernlichtbereich nicht direkt gereinigt wird. In Kombination mit den sehr hohen Beleuchtungsstärken in unmittelbarer Nähe anderer Verkehrsteilnehmer, kann eine Verschmutzung bei blendfreien Fernlichtsystemen zu einer hohen Blendung führen. Die Ergebnisse des Feldtests wurden teilweise in der „Automobiltechnischen Zeitschrift“ (Abk.: ATZ) Ausgabe 06/2018 [107] veröffentlicht, weshalb Teile dieses Kapitels aus den Berichten übernommen sind.

4.1 Stand der Forschung

Im Folgenden wird auf einige Untersuchungen eingegangen, die sich mit dem Einfluss der Verschmutzung auf die Lichtverteilung beschäftigt haben. Die aufgeführten Untersuchungen sind chronologisch geordnet und reichen von Laboruntersuchungen bis hin zu Feldtests bei denen reale Verschmutzungen untersucht wurden.

LINDAE [108] hat im Jahre 1968 Scheinwerfer aus dem Fahrbetrieb entnommen und den Lichtstromverlust im Vergleich zu sauber in einer Ulbrichtkugel vermessen. Eine Ulbricht-Kugel ist ein innen diffus reflektierender Hohlkörper, der mittels der mehrfach auftretenden lambertschen Reflexionen, zur Messung des Lichtstromes verwendet wird, weshalb es nicht empfehlenswert ist,

gerichtete Lichtquellen wie Scheinwerfer in einer Ulbricht-Kugel zu vermessen. Die Ergebnisse der Messung ergaben, dass ein Lichtstromverlust von 10 % kaum und von 22 % leicht wahrgenommen wird. Erst ab einem Lichtstromverlust von 50 % wird der Verlust vom Fahrer realisiert und der Scheinwerfer gereinigt. Durch die Verschmutzung kommt es zu einer geringeren Sicht und zu einem höheren Blendpotential, verursacht durch Absorption und Streuung der Lichtstrahlen. LINDAE [108] schlussfolgerte, dass eine geringe Verschmutzung „gefährlicher“ sei, da der Fahrer den Sichtverlust nicht wahrnimmt und empfahl, den Scheinwerfer in regelmäßigen Intervallen zu reinigen und nicht erst wenn der Fahrer es bemerkt. [108]

RUMAR [109] untersuchte in Schweden schmutzige Scheinwerfer auf drei unterschiedlichen Methoden. Bei der ersten Methode wurden 200 km mit zwei Testfahrzeugen gefahren und die Verschmutzungsgrade systematisch gesammelt. Hierbei befestigte RUMAR [109] zusätzliche Scheiben vor den Scheinwerfern, um deren Transmission im Labor zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigten, dass Feuchtigkeit auf der Straße maßgeblich für die Verschmutzung verantwortlich ist, wodurch der höchste Verschmutzungsgrad erreicht wird. Bei der zweiten Methode wurden die Scheinwerfer von etwa 150 Fahrzeugen an einer Tankstelle untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass bei höheren Temperaturen, eine erhöhte Schmutzansammlung zu beobachten ist, wobei selbst bei trockenen Bedingungen eine Lichtabnahme von etwa 10 – 20 % gemessen wurde. Bei schlechtem bzw. nassem Wetter steigt die Lichtabnahme sogar auf 50 %. Bemerkenswert ist, dass die Fahrer erst bei einer Lichtabnahme von 60 % einen Reinigungsbedarf erkennen. Bei der dritten Methode wurde ein Zusammenhang zwischen der erwähnten Lichtabnahme und der nächtlichen Sichtweite untersucht. Es stellte sich heraus, dass eine Lichtabnahme von 60 % mit einer um etwa 20 % reduzierten Sichtweite gleichzusetzen ist und ab einer Lichtabnahme von etwa 20 % stets mit einer geringeren Sichtweite zu rechnen ist. Ähnlich wie LINDAE [108] stellte RUMAR [109] fest, dass schon gering verschmutzte Scheinwerfer zu einer erhöhten Blendung bei Abblendlicht und zu einer reduzierten Sichtweite des Fahrers führt. [109]

SCHMIDT-CLAUSEN [110] untersuchte bei Fahrversuchen den axialen Lichtstärkeverlust im Fernlicht, der dem Fahrer als gerade sichtbar erscheint. Hierbei wurde im statischen Fall ein Verlust von 20 % ermittelt, der sich im Fahrbetrieb auf etwa 50 % erhöht. Dies unterstützt die Annahme, dass statische Fahrversuche mit dynamischen und damit realitätsnäheren Bedingungen wenige Gemeinsamkeiten aufweisen. Ein weiteres Ergebnis der Studie zeigte, dass mit steigendem Verschmutzungsgrad, die Beleuchtungsstärke beim entgegenkommenden Verkehr zunächst steigt und damit zu einer höheren Blendung führt. Bei einem Verschmutzungsgrad von 45 - 50 % wird die maximale Beleuchtungsstärke erreicht, die anschließend mit weiter steigender Verschmutzung wieder fällt. Ebenfalls analysierte SCHMIDT-CLAUSEN [110] die Daten von RUMAR [109] aus Schweden und stellte eine Vergleichbarkeit mit seinen eigenen Daten aus Deutschland fest, die als „Stichproben bezüglich der Verschmutzung der Streuscheiben“ beschrieben wurden. [110]

VAN LAARHOVEN [111] untersuchte im Rahmen eines GRE² Berichts den Einfluss der Verschmutzung auf die Lichtverteilung, die als Grundlage für die Ausrüstungspflicht von HID-

² GRE ist eine Institution, die Regulierungsvorschläge zur aktiven Sicherheit, insbesondere zur Fahrzeugbeleuchtung und Lichtsignalisierung erarbeitet.

Scheinwerfern mit einer Scheinwerferreinigungsanlage dient. Hierbei wurden drei unterschiedliche Scheinwerfer verwendet, die eine runde und „aerodynamische“ Abschluss­scheibe mit Halogenglühlampen verbaut hatten sowie ein HID-Scheinwerfer. Gemessen wurde die Beleuchtungsstärke an bestimmten UNECE Messpunkten, die für die Blendung und Sichtbarkeit verantwortlich sind. Messpunkte zur Bestimmung der Blendung, wie beispielsweise der B50L-Punkt, befinden sich oberhalb der HDG und Messpunkte repräsentativ für die Sichtbarkeit (75R) unterhalb. Im Rahmen der Untersuchung wurde der Scheinwerfer mit Normschmutz nach UNECE manuell beschmutzt, bis die Beleuchtungsstärke bei Punkt 75R unter eine bestimmte Schwelle gefallen ist, die sich bei 80 %, 60 %, 40 %, 20 % und 8 % befindet. Im Anschluss wurde die Beleuchtungsstärke bei allen in der UNECE angegebenen Messpunkten erneut gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl bei Halogen- als auch bei HID-Scheinwerfern, die Beleuchtungsstärke oberhalb der HDG mit steigender Verschmutzung zunächst steigt und bei einem Verschmutzungsgrad ab etwa 40 % wieder fällt. Beim Scheinwerfer mit Halogenglühlampe steigt die Beleuchtungsstärke am B50L Punkt um den Faktor 3 im Vergleich zum sauberen Scheinwerfer und beim HID-Scheinwerfer sogar um den Faktor 4 und erreicht ein Maximum von 1,7 lx (0,4 lx im sauberen Zustand). Unterhalb der HDG ist ein umgekehrtes Verhalten zu beobachten, eine Tatsache die zum Schluss führt, dass die Lichtstrahlen von unterhalb der HDG nach oberhalb der HDG gebrochen werden und somit eine geringere Sichtweite und gleichzeitig eine erhöhte Blendung verursachen. [111]

Im Gegensatz zu VAN LAARHOVEN [111] untersuchten SIVAK et al. [112] den Einfluss von realistischem Schmutz auf die Lichtverteilung und verwendete ein Fahrzeug, mit dem eine Strecke von 482 km 3-mal gefahren wurde. Hierbei wurden die Straßenbedingungen in drei Kategorien unterteilt, die von sommerlich trocken, über sommerlich nass bis hin zu winterlich mit Salz bedeckten Straßen reicht. Das untersuchte Fahrzeug war mit Halogenglühlampen-Scheinwerfer ausgestattet, das einen Freiform-Reflektor und eine klare Abschluss­scheibe aufweist. Nach jeder Fahrt wurden die Scheinwerfer vom Fahrzeug demontiert und an einem Photogoniometer³ photometrisch in einem Bereich von $\pm 20^\circ$ horizontal und $\pm 5^\circ$ vertikal mit einer Abtastrate von $0,5^\circ$ vermessen. Bei den sommerlich trockenen und nassen Straßenbedingungen konnte im Allgemeinen kein Unterschied festgestellt werden, wobei unterhalb der HDG bis zu 25 % weniger Licht gemessen wurde. Bei den salzbedeckten Straßen dagegen wurde eine Lichtabnahme von mehr als 25 % verzeichnet, die in bestimmten Regionen sogar einen Wert von mehr als 50 % übersteigt, wodurch winterliche Straßenverhältnisse als worst-case Scenario betrachtet werden. In allen untersuchten Straßenbedingungen wurde mehr Licht nahe und über der HDG gemessen, wodurch die Blendung um etwa 25 % steigt. [112]

SÖLLNER et al. [113] untersuchten die Wirksamkeit und den Nutzen von Scheinwerferreinigungsanlagen unter realen Bedingungen, in dem die Scheinwerfer von 420 Fahrzeugen an einer Tankstelle vermessen wurden. Dadurch konnte die ursprüngliche Verschmutzung der Scheinwerfer festgestellt werden, wie diese auf der Straße unterwegs sind. Zusätzlich zum verschmutzten Zustand, wurden die Scheinwerfer falls vorhanden mit der SRA und schließlich von Hand gereinigt. Aus

³ Mit einem Photogoniometer wird der Lichtstärke-Verteilung-Körper (Abk.: LVK) gemessen, der den Lichtstrom des zu vermessenden Scheinwerfers in Abhängigkeit des Winkels angibt.

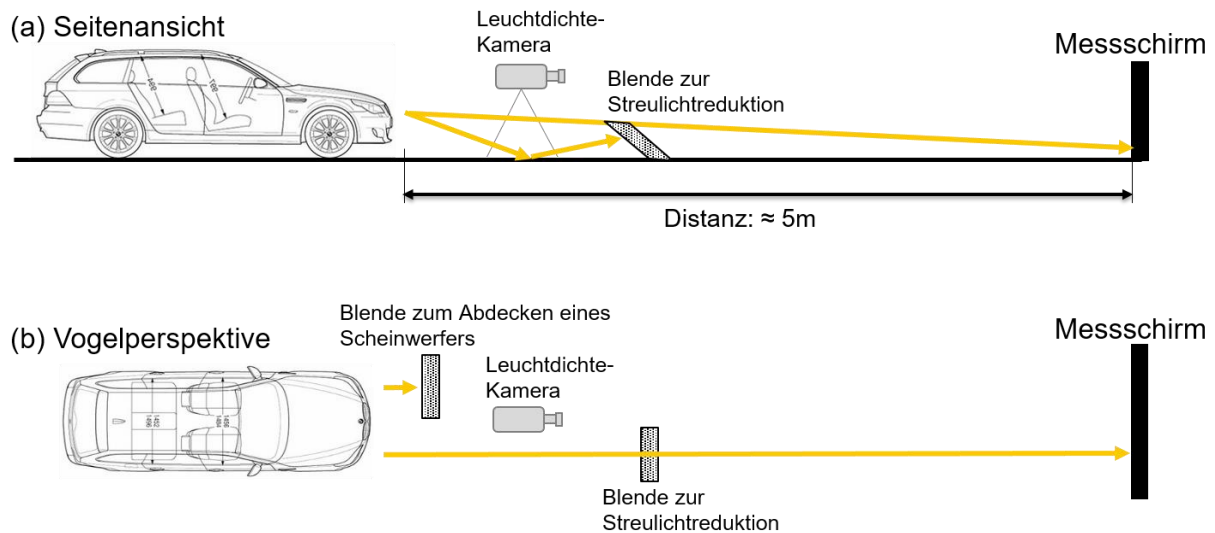
den Ergebnissen ergibt sich, dass bei winterlichen Straßenbedingungen ein höherer Verschmutzungsgrad auftritt als bei sommerlichen. Der Schmutz auf der Abdeckscheibe unterscheidet sich bei feuchten und trockenen Bedingungen maßgeblich voneinander, wobei im Winter ein feuchter und weicher Schmutz auftritt, der mit dem Normschmutz vergleichbar ist. Im Sommer dagegen tritt ein trockener und gleichzeitig harter Schmutz auf, der mit dem Normschmutz nicht vergleichbar ist, wodurch die SRA die lichttechnischen Eigenschaften im Winter verbessert, im Sommer jedoch nicht. Diese Tatsache hängt mit der Entwicklung der SRA zusammen, die anhand der UNECE Nr. 45 basierend auf Normschmutz entwickelt und validiert wird. Laut SÖLLNER [113] ist der Verschmutzungsgrad im Winter hoch, wodurch eine schlechtere Beleuchtungssituation resultiert, die aber durch die bessere Reinigungswirkung der SRA kompensiert wird. Die Reinigungswirkung beträgt im Mittel 56 % bei sehr großen Streuungen unter den untersuchten Systemen. Im Sommer tritt ein geringerer Verschmutzungsgrad auf, der nur geringe Auswirkungen auf die Ausleuchtung und Blendung der Scheinwerfer hat. Im Mittel sind Scheinwerfer, die mit einer SRA ausgestattet sind, um 33 % sauberer als Scheinwerfer ohne. Mit steigendem Verschmutzungsgrad erhöht sich auch die Blendung von entgegenkommenden Fahrzeugen durch Streulicht entlang der HDG. Die Ergebnisse ähneln denen von SIVAK wobei sich die gezeigten Ergebnisse allerdings auf die Abblendlichtverteilung mit lediglich einer HDG beschränken. [113]

Fasst man die vorgestellten Untersuchungen zusammen, kann festgehalten werden, dass in den vergangenen Jahren zahlreiche Forschungen zum Einfluss der Verschmutzung auf die Lichtverteilung durchgeführt worden sind. Diese wurden allerdings ausschließlich für die Abblendlichtverteilung gemacht, die eine horizontale Hell-Dunkel-Grenze besitzt. Moderne Scheinwerfersysteme wie beispielsweise blendfreie Fernlichtsysteme, weisen hingegen drei HDG auf, die sich in unmittelbarer Umgebung anderer Verkehrsteilnehmer befinden. Es stellt sich hierbei die Frage, inwieweit die Entscheidung von einigen Automobilherstellern die SRA trotz Verwendung von blendfreien Fernlichtsystemen nicht zu verbauen, die Sicherheit auf der Straße beeinträchtigt. Aus diesem Grund beschäftigt sich der nachfolgende Feldtest primär mit der Fragestellung, inwieweit eine Verschmutzung, die Lichtverteilung von blendfreien Fernlichtsystemen beeinflusst.

4.2 Methodik

Um den Einfluss der Verschmutzung auf blendfreie Fernlichtsysteme zu untersuchen, wurden vom Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt in den letzten Jahren eine Reihe von Voruntersuchungen durchgeführt, die im Labor und auf öffentlichen Straßen durchgeführt wurden (vgl. z.B. SCHILLER in [114] und [115]). Die gesammelte Erfahrung wurde in einem Feldtest verwendet, bei dem in einem abgesperrten Gelände unter Realitätsbedingungen der Einfluss der Verschmutzung auf die Lichtverteilung untersucht wurde. Die Untersuchung wurde auf einem abgesperrten Gelände durchgeführt, auf dem sich ein Rundkurs von ca. 400 m Länge und einer mittleren Fahrbahnbreite von 3,5 m befindet. Durch die Wahl eines abgesperrten Geländes sind im Vergleich zu Messungen auf öffentlichen Straßen, reproduzierbare und häufige Messungen möglich. SIVAK [112], SÖLLNER [113] und SCHILLER [115] zeigten, dass der winterliche Schmutz, bestehend aus einer Wasser-Salz Mischung, den größten Einfluss auf die Lichtverteilung hat. Aus diesem Grund wurde der Rundkurs vor jeder Messung manuell mit einer konstanten Salzwasserkonzentration von 25 g/l und einem Volumen von 1000 l „verschmutzt“. Eine Abbildung des Bewässerungssystems ist im Anhang

zu sehen (vgl. *Abbildung A-6*). Gemessen wurde die Leuchtdichte jedes einzelnen Scheinwerfers auf einem Messschirm, wobei zur Vermeidung von Streulichteeffekten durch z.B. Reflektionen des Straßenbelags, die Messungen mit einer Blende durchgeführt wurde, die dafür sorgt, dass lediglich der direkte Lichtanteil des Scheinwerfers auf dem Messschirm gelangt.



*Abbildung 4-2: Messaufbau zur Bestimmung der Leuchtdichte: **Oben:** Seitenansicht und **Unten:** Vogelperspektive*

Insgesamt wurden drei Fahrzeuge mit Halogen-Reflexion und LED-Projektion Scheinwerfern untersucht, wobei eins der Fahrzeuge, das LED Scheinwerfer besaß, mit einem blendfreien Fernlichtsystem ausgestattet war. Alle drei Fahrzeuge fuhren auf der verschmutzten Teststrecke mehrmals sehr dicht aneinander. Durch den geringen Abstand zwischen den Fahrzeugen und einer Höchstgeschwindigkeit von bis zu 80 km/h verschmutzte jedes Fahrzeug das nachfolgende Fahrzeug hinter sich. Um auch das erste Fahrzeug zu verschmutzen, fuhr ein viertes Fahrzeug voraus. Alle drei getesteten Fahrzeuge waren mit einer SRA ausgestattet und verwendeten die gleiche Reinigungsflüssigkeit. Um unterschiedliche Verschmutzungsgrade der Scheinwerfer zu realisieren, wurden mehrere Durchläufe durchgeführt, die eine bestimmte Anzahl an gefahrenen Runden auf der Teststrecke entsprechen. Insgesamt wurden vier Durchläufe mit 3, 6, 12 und 24 Runden gefahren, die einer Messdistanz von 1,2 km bis 9,6 km entsprechen (vgl. *Abbildung 4-3*).



Abbildung 4-3: Rundkurs und Messplatz auf dem die Untersuchung durchgeführt wurde nach [115]

Jeder Durchlauf wurde zwei Mal an den drei Messtagen wiederholt und vor jedem Durchlauf wurde erneut gestreut und bewässert. Nach jedem Durchlauf wurde die Leuchtdichte jedes einzelnen Scheinwerfers wie folgt vermessen – schmutzig, durch die SRA gereinigt und von Hand gereinigt. Nach dem Reinigen des Scheinwerfers mit der SRA wurde zwei Minuten gewartet, bis die Reinigungsflüssigkeit vom Scheinwerfer abließ bzw. durch die Wärme des Scheinwerfers trocknete.

Insgesamt entstanden mehr als 800 Leuchtdichteaufnahmen, die automatisiert mit MATLAB verarbeitet werden. Als Referenz dient bei jeder Leuchtdichteaufnahme die Position der HDG, die den Sichtbarkeitsbereich (unterhalb der HDG) und den Blendungsbereich (oberhalb der HDG) abgrenzt (vgl. *Abbildung 4-4*). Ihre Position wird nach jedem Durchlauf bei der handgereinigten Leuchtdichteaufnahme, durch geeignete Bildverarbeitungsalgorithmen, sowie das Bilden von vertikalen Gradienten errechnet und auf die verschmutzte, sowie die mit der SRA gereinigte Leuchtdichteaufnahme übertragen. In *Abbildung 4-4* ist exemplarisch eine saubere (oben) und eine schmutzige (unten) Leuchtdichteaufnahme dargestellt, bei denen die errechnete HDG (grüne Linie) aufgetragen ist, sowie die beiden untersuchten Bereiche – Sichtbarkeits- und Blendungsbereich.

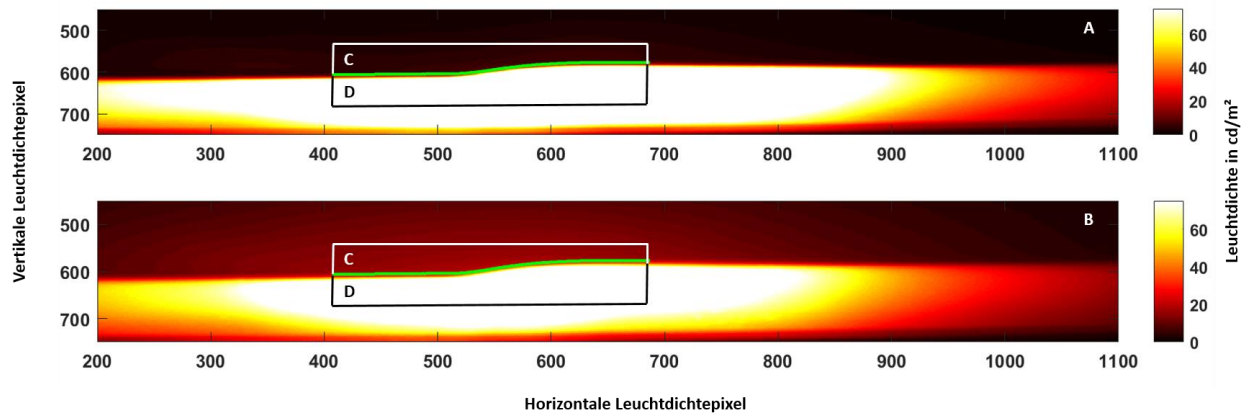


Abbildung 4-4: Leuchtdichteaufnahmen der Abblendlichtverteilung: **A**: saubere (oben), **B**: schmutzige (unten) Abblendlichtverteilung, **C**: Bereich oberhalb der HDG (Blendungsbereich) und **D**: Bereich unterhalb der HDG (Sichtbarkeitsbereich)

Eine Übertragung der HDG ist möglich, da während der Messung sich die Position des Fahrzeuges, der Leuchtdichtekamera, des Messschirms und die Umgebungsbedingungen nicht verändert haben. Beim blendfreien Fernlicht wird zusätzlich ein horizontaler Gradient gebildet, um den ausgeblendeten Bereich zu identifizieren. In *Abbildung 4-5* ist exemplarisch eine saubere (oben) und eine schmutzige (unten) Leuchtdichteaufnahme eines blendfreien Fernlichtsystems dargestellt, bei dem neben der HDG, auch der ausgeblendete und der Fernlichtbereich zu sehen sind.

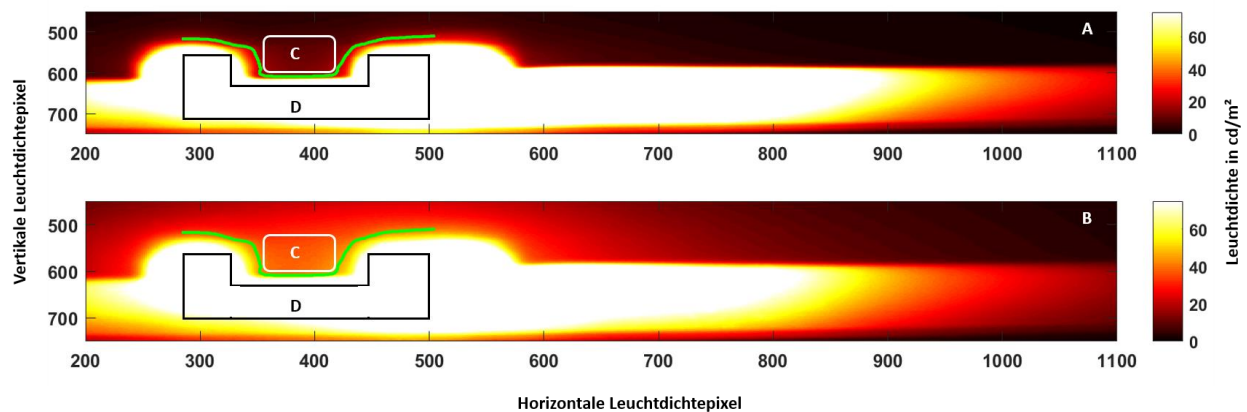


Abbildung 4-5: Leuchtdichteaufnahmen des blendfreien Fernlichts: **A**: saubere (oben), **B**: schmutzige (unten) Fernlichtverteilung, **C**: Ausgeblendeter Bereich oberhalb der HDG und **D**: Fernlichtbereich unterhalb der HDG

Zu beachten ist, dass beim blendfreien Fernlicht der abgedunkelte Bereich oberhalb der HDG liegt und der Fernlichtbereich unterhalb (vgl. *Abbildung 4-5*). In dieser Abbildung ist auch der Grund ersichtlich, weshalb die Methode gewählt wurde, die HDG von der sauberen Leuchtdichteaufnahme auf die schmutzige zu übertragen - bei der schmutzigen verwischt die HDG und eine reproduzierbare Ermittlung der HDG ist nicht mehr möglich. Der ausgeblendete Bereich wurde in der vorliegenden Untersuchung mit einer Breite von 3° gewählt und entspricht einem vorausfahrenden bzw. entgegenkommenden Fahrzeug in einem Abstand von etwa 50 m.

4.3 Ergebnisse

Dieses Kapitel gibt einen Überblick der Ergebnisse, die in diesem Feldtest erzeugt wurden. Sie sind unterteilt in Ergebnisse über den Einfluss der Verschmutzung auf Abblendlicht und blendfreies Fernlicht sowie den Einfluss der Scheinwerferreinigungsanlage auf die Verschmutzung der Scheinwerfer. Am Ende dieses Kapitels folgt ein Fazit, bei dem die Ergebnisse zusammengefasst und gedeutet werden.

4.3.1 Einfluss der Verschmutzung auf die Abblendlichtverteilung

In *Abbildung 4-6* ist für den linken und rechten Scheinwerfer (in der folgenden Abbildungen als „Sw“ abgekürzt) der drei untersuchten Fahrzeuge, der prozentuale Verschmutzungsgrad der Lichtverteilung unterhalb (links) und oberhalb (rechts) der HDG zu erkennen. Der Verschmutzungsgrad VG wurde dabei nach (4-1) aus dem Verhältnis zwischen der sauberen und der schmutzigen Leuchtdichteaufnahme gebildet.

$$\text{Verschmutzungsgrad } VG = \frac{L_{\text{schmutzig}} - L_{\text{sauber}}}{L_{\text{sauber}}} \cdot 100 \% \quad (4-1)$$

Hierbei wurde lediglich ein Bereich von horizontal $\pm 4^\circ$ und vertikal $\pm 1^\circ$ um den HV Punkt betrachtet, da sich in diesem Bereich, die für die Blendung und Detektion relevanten Messpunkte befinden. Die Ergebnisse des Verschmutzungsgrades ergeben sich aus den Daten der vier Messabende, sowie aus den jeweils zwei Messwiederholungen.

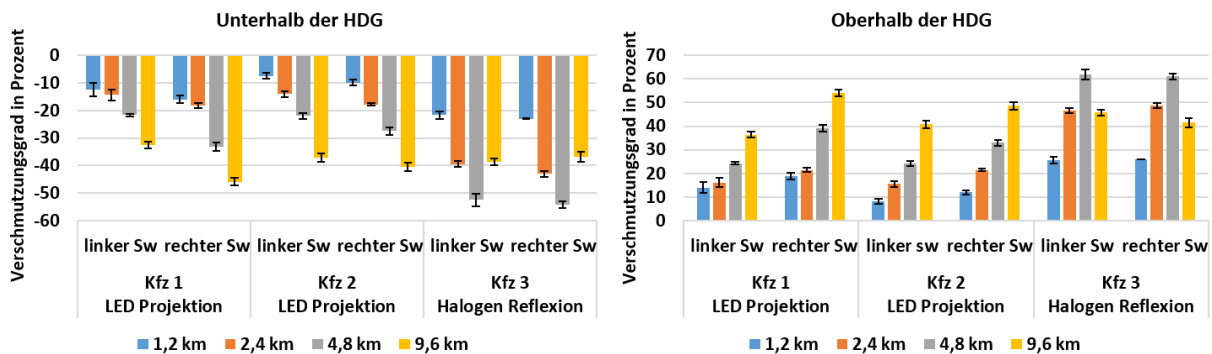


Abbildung 4-6: Verschmutzungsgrad unterhalb (links) und oberhalb (rechts) der HDG für die drei untersuchten Fahrzeuge, jeweils für den linken und rechten Scheinwerfer

Anhand von *Abbildung 4-6* ist mit zunehmender Verschmutzung eine Abnahme des Verschmutzungsgrades unterhalb bzw. Zunahme oberhalb der HDG zu erkennen. Dies bestätigt die Ergebnisse von LINDAE [108], RUMAR [109] und von VAN LAARHOVEN [111], dass die Verschmutzung zu einer erhöhten Blendung und gleichzeitig zu einer verringerten Sichtweite führt. Die Verschmutzungsgrade vom linken und rechten Scheinwerfer sind nicht normalverteilt und weisen anhand des Wilcoxon-Tests einen signifikanten Unterschied zueinander auf ($p = 0,001$), eine Tatsache die mit dem gefahrenen Rundkurs begründet werden kann, bei dem nur links Kurven auftauchten.

Ebenfalls kann die Aussage von SCHMIDT-CLAUSEN [110] bestätigt werden, dass der Verschmutzungsgrad mit steigender Verschmutzung erstmals steigt und anschließend wieder fällt. Dies kann beim Fahrzeug mit den Halogenglühlampen-Scheinwerfern beobachtet werden, bei denen der Verschmutzungsgrad am höchsten (oberhalb) bzw. am niedrigsten (unterhalb) Wert einen Wendepunkt aufweist. Auffällig ist, dass bei dem Fahrzeug mit den Halogen-Scheinwerfern, signifikant höhere bzw. niedrigere Werte gemessen werden, als bei den anderen beiden Fahrzeugen mit LED Scheinwerfern ($p = 0,009$). Eine mögliche Ursache dafür könnte in der Lichtverteilung liegen, die exemplarisch für das Projektions- (links) und Reflexionssystem (rechts) in *Abbildung 4-7* dargestellt sind. In den Abbildungen sind die Leuchtdichteaufnahmen der beiden Systeme zu erkennen und in schwarz zusätzlich auch die ermittelten HDG.

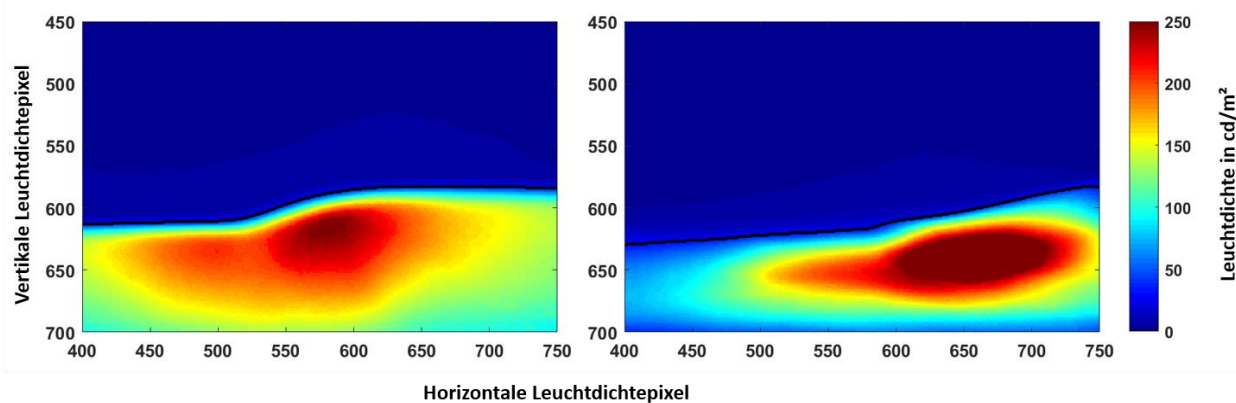


Abbildung 4-7: Vergleich zwischen Projektions- (links) und Reflexionssystem (rechts). Gezeigt ist eine LVK der beiden Scheinwerfer sowie die ermittelte HDG in schwarz

Zur besseren Vergleichbarkeit der beiden Systeme, wurden beide Aufnahmen auf das gleiche Maximum skaliert, wodurch ein visueller Unterschied der beiden Systeme ersichtlich wird. Beim Projektionssystem (links) erscheint der Hot-Spot kleiner als beim Reflexionssystem (rechts). Um die Aufnahmen messtechnisch vergleichen zu können, wird in *Abbildung 4-8* ein horizontaler Schnitt durch das Maximum des Hot-Spots (links) und durch den B50L Punkt (rechts) dargestellt. Neben dem Maximum, kann auch die Halbwertsbreite herangezogen werden, um die beiden Grafiken miteinander zu vergleichen. Die Halbwertsbreite gibt dabei die Breite der Verteilung bei halbem Maximalwert an.

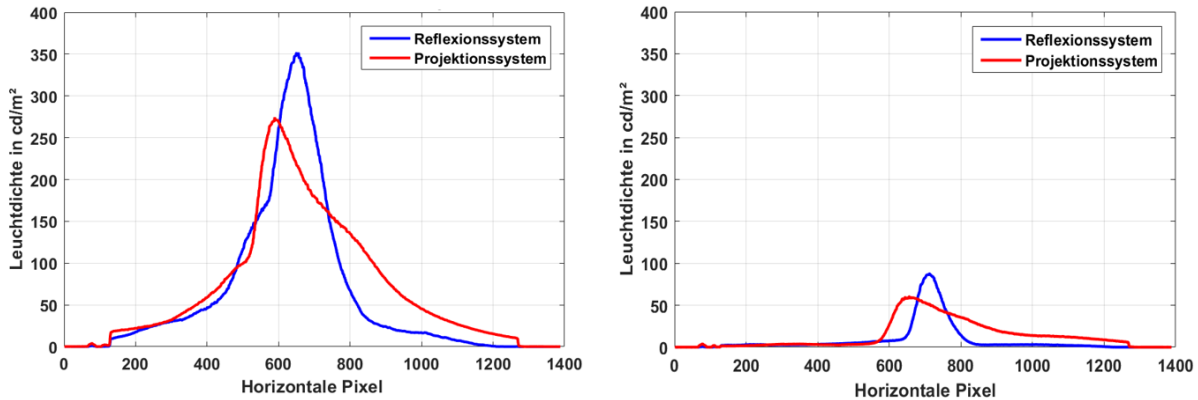


Abbildung 4-8: Horizontaler Schnitt durch den Hot-Spot (links) und durch B50L (rechts). Die blaue Datenkurve zeigt die Leuchtdichte des Reflexionssystems und die rote die des Projektionssystems

Bei Betrachtung des horizontalen Schnitts durch den Hot-Spot (links) ist zu erkennen, dass beim Reflexionssystem ein um 77 cd/m^2 (28 %) höheres Maximum erreicht wird und die Halbwertsbreite um 103 Pixel schmäler ist als beim Projektionssystem. Durch bekannten Abstand zwischen der Leuchtdichtekamera und dem Messschirm ist es möglich, die horizontale Pixelbreite zu bestimmen. In der vorliegenden Untersuchung weist ein Pixel eine horizontale Breite von $0,04^\circ$ auf, wodurch die Halbwertsbreite beim Reflexionssystem um $4,12^\circ$ schmäler als die des Projektionssystems ist, eine Tatsache die durch den oben geschilderten visuellen Eindruck bestätigt wird. Bei der rechten Abbildung ist ein vertikaler Verlauf der Leuchtdichte durch den B50L Punkt, über die HDG zusehen. Dieser weist beim Reflexionssystem ein um 27 cd/m^2 höheres Maximum auf (45 %), wobei die Halbwertsbreite um $5,68^\circ$ schmäler ist. Demzufolge weist das Reflexionssystem höhere Leuchtdichten an der HDG auf, wodurch auch mehr Streulicht entstehen kann. Eine weitere mögliche Ursache für die erhöhte Streuung des Reflexionssystems könnte die Tatsache sein, dass die Lichtstrahlen an der verschmutzten Abschlusscheibe wieder in den Reflektor hinein reflektiert und erneut hinausreflektiert werden. Beim Projektionssystem dagegen werden aufbaubedingt die in den Scheinwerfer hineinreflektierenden Lichtstrahlen größtenteils absorbiert.

4.3.2 Einfluss der Verschmutzung auf blendfreie Fernlichtsysteme

In *Abbildung 4-9* ist für den linken und rechten Scheinwerfer des untersuchten Fahrzeuges mit dem blendfreien Fernlichtsystem, der prozentuale Verschmutzungsgrad nach Gleichung (4-1) der Lichtverteilung im Fernlichtbereich (links) und im ausgeblendeten Bereich (rechts) zu erkennen. Als Fernlichtbereich wird in der vorliegenden Untersuchung der Bereich bezeichnet, der sich unterhalb der HDG befindet und für die Fernlichtausleuchtung zuständig ist (vgl. *Abbildung 4-5*). Der Verschmutzungsgrad wurde, ähnlich wie bei der Abblendlichtverteilung, aus dem Verhältnis zwischen der sauberen und der schmutzigen Leuchtdichteaufnahme gebildet. Der ausgeblendete Bereich hat eine Breite von etwa 3° und eine Höhe, die von der vertikalen und horizontalen HDG begrenzt wird (vgl. *Abbildung 4-5*).

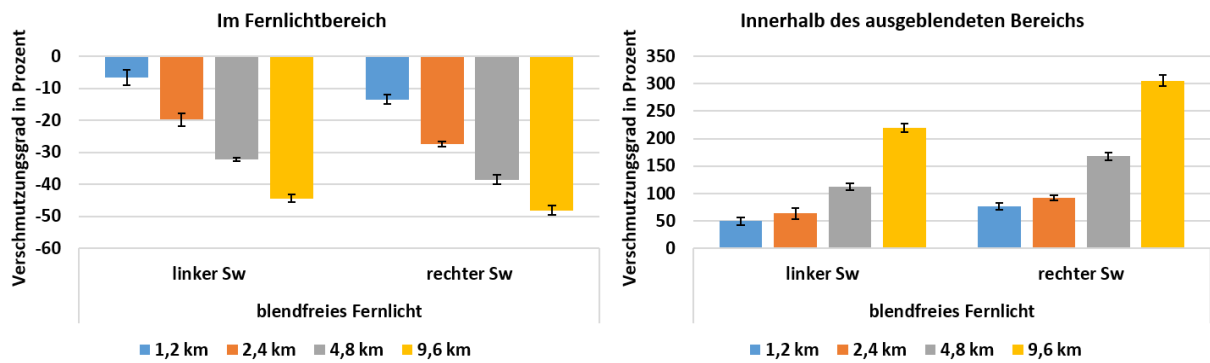


Abbildung 4-9: Verschmutzungsgrad im Fernlicht- (links) und im ausgeblendetem Bereich (rechts) für das Fahrzeug mit dem blendfreiem Fernlichtsystem in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke auf dem Rundkurs.

Im Fernlichtbereich ist ein stetiger Anstieg des Verschmutzungsgrades in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke zu beobachten. Nach 9,6 km wird das Minimum von ca. - 50 % erreicht, dies bedeutet, dass durch die Verschmutzung der Scheinwerfer nur halb so hell erscheint. Ähnlich wie bei den gezeigten Ergebnissen vom Abblendlicht, sind signifikante Unterschiede zwischen linkem und rechtem Scheinwerfer zu erkennen ($p = 0,007$). Im ausgeblendetem Bereich ist ebenfalls eine stetige Steigung des Verschmutzungsgrades in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke zu erkennen. Allerdings sind die Ergebnisse im Vergleich zu den Abblendlichtergebnissen um den Faktor 5 höher. Um den Grund dafür zu analysieren, werden Differenzleuchtdichtebilder von den schmutzigen und sauberen Leuchtdichteaufnahmen gebildet. In *Abbildung 4-10* ist exemplarisch das Differenzleuchtdichtebild vom linken Scheinwerfer von der sauberen Leuchtdichteaufnahme und der nach 9,6 km abgebildet, in dem zusätzlich auch die aus der sauberen Aufnahme ermittelte HDG (schwarze Linie) zu sehen ist.

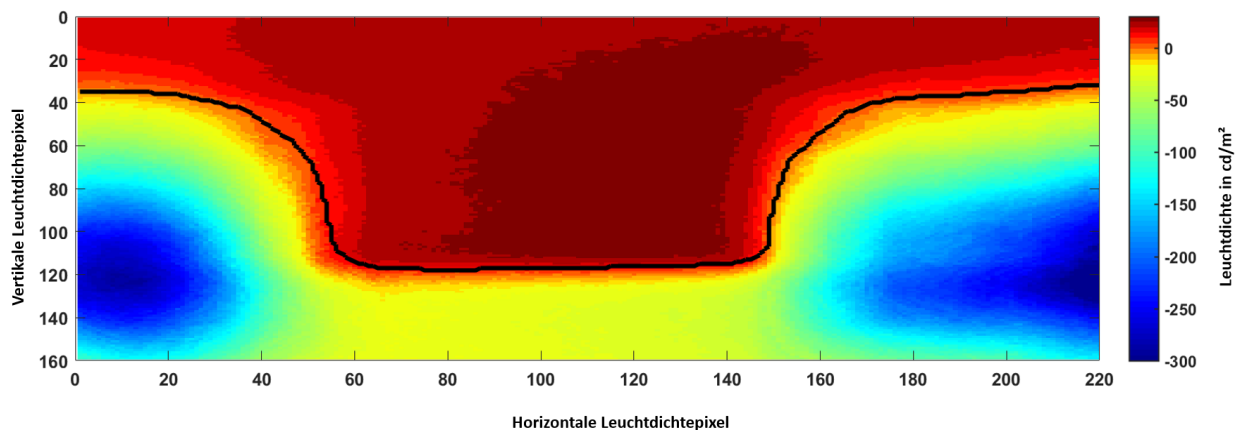
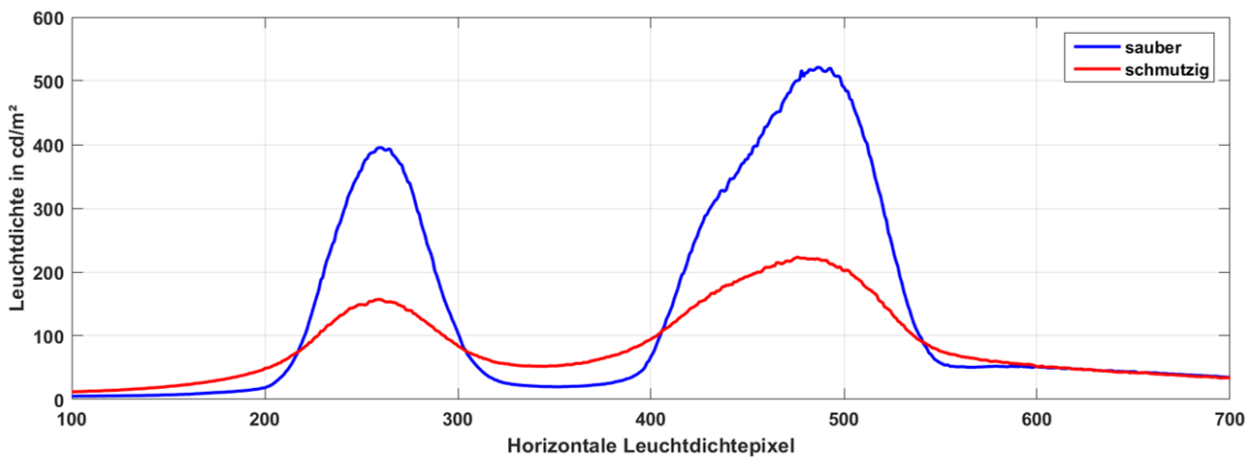


Abbildung 4-10: Differenzleuchtdichtebild des linken Scheinwerfers: Dieses besteht aus der Differenz zwischen der schmutzigen und der sauberen Leuchtdichteaufnahme. Zusätzlich ist auch in schwarz die ermittelte HDG zu erkennen

Zu erkennen ist, dass die HDG den Übergang zwischen höheren Leuchtdichten (Streulicht) und niedrigeren darstellt. Die höchsten Differenzen werden allerdings nicht um die HDG gemessen, sondern befinden sich unterhalb der HDG, jeweils seitlich versetzt der ausgeblendeten Region im

Hot-Spot der einzelnen fernlichterzeugenden LEDs. Hier ist eine Leuchtdichteabnahme von über 300 cd/m² im Vergleich zur sauberen Leuchtdichteaufnahme zu beobachten (dunkelblaue Region). Im sauberen Zustand wird in diesen Regionen eine maximale Leuchtdichte von ca. 680 cd/m² auf der linken Seite und 780 cd/m² auf der rechten Seite gemessen. Somit ergibt sich eine Leuchtdichteabnahme für den verschmutzten Fall von 44 % auf der linken bzw. 38 % auf der rechten Seite des abgedunkelten Bereichs. Die größte absolute Reduzierung der Leuchtdichte ergibt sich demzufolge in dem Bereich, in dem auch die höchsten Leuchtdichten auftreten. Im ausgeblendetem Bereich ist eine ähnliche Tendenz zu beobachten, nämlich, dass das meiste Streulicht nicht um die HDG auftritt, sondern eher im rechten Sektor des ausgeblendetem Bereichs. Um diese Aussage messtechnisch zu untermauern, wird die Leuchtdichte in einem horizontalen Querschnitt, der sich etwa 0,6° über der horizontalen HDG befindet, dargestellt. Dadurch ist es möglich, den Leuchtdichteverlauf sowohl im abgedunkeltem Bereich, als auch im Fernlichtbereich zu visualisieren. In *Abbildung 4-11* ist der beschriebene Leuchtdichteverlauf für die saubere Leuchtdichteaufnahme in blau und die nach 9,6 km (schmutzig) in rot, dargestellt.



*Abbildung 4-11: Querschnitt durch den ausgeblendetem Bereich des blendfreien Fernlichts: **blau:** saubere und **rot:** schmutzige Leuchtdichteaufnahme*

Sowohl bei dem sauberen als auch bei dem schmutzigen Leuchtdichteverlauf sind zwei Maxima zu erkennen, die den ausgeblendetem Bereich seitlich definieren. Da das rechte Maximum des sauberen Verlaufs ein um 30 % höheres Maximum aufweist als der linke, entsteht auf der Seite im ausgeblendetem Bereichs auch mehr Streulicht. Durch die Verschmutzung nimmt das Leuchtdichtemaximum um etwa 60 % ab, wodurch der Übergang zwischen ausgeblendetem und Fernlichtbereich zu verwischen scheint. Der Verlauf des Gradienten entlang des oben abgebildeten Querschnitts ist im Anhang zu sehen (vgl. *Abbildung A-7*).

Mit bekanntem Reflexionsgrad ρ der Leinwand und Abstand d zwischen Leinwand und Leuchtdichtekamera, kann nach Gleichung (4-2), aus der Leuchtdichte die Beleuchtungsstärke ermittelt werden.

Leuchtdichte in Beleuchtungsstärke

$$E = \frac{L * \pi}{\rho} \text{ mit } E = \frac{I}{d^2} \quad (4-2)$$

Nach der Umrechnung der Leuchtdichte in die Beleuchtungsstärke, wird das Verhältnis zwischen ausgeblendetem Bereich und Fernlichtbereich gebildet. Speziell für das im ausgeblendetem Bereich befindliche Maximum und die mittlere Beleuchtungsstärke im Fernlichtbereich, ist in *Abbildung 4-12* eine Korrelation zu erkennen. Die Daten sind zusätzlich farblich, in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke kodiert, wodurch die vier Verschmutzungsgrade ersichtlich werden.

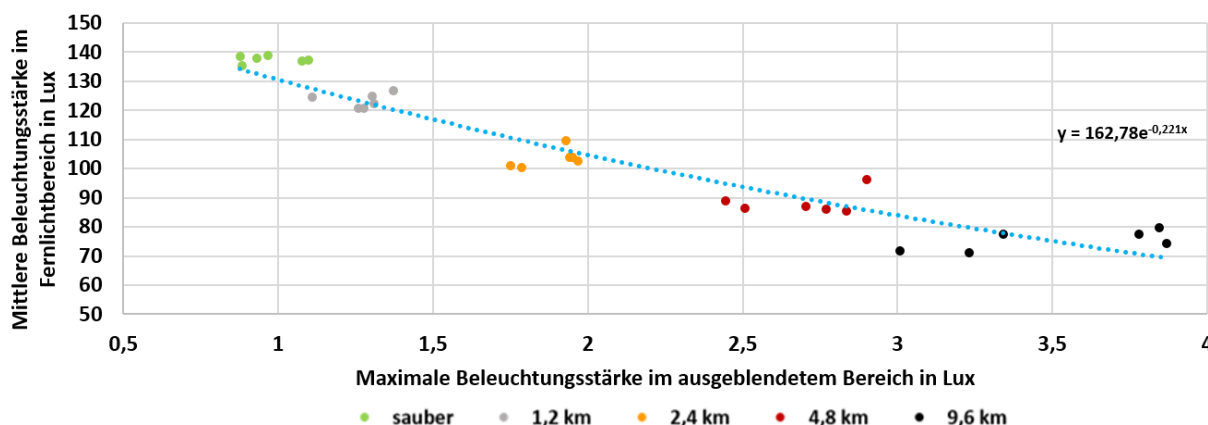


Abbildung 4-12: Verhältnis zwischen ausgeblendetem Bereich und Fernlichtbereich: Dieses besteht aus der maximalen Beleuchtungsstärke im ausgeblendetem und der mittleren Beleuchtungsstärke im Fernlichtbereich. Die gefahrenen Strecken bzw. der Verschmutzungsgrad sind farblich markiert.

Die Datenpunkte in *Abbildung 4-12* entsprechen den Beleuchtungsstärkewerten vom linken und rechten Scheinwerfer an allen Messtagen. Mit zunehmender Strecke steigt der Verschmutzungsgrad des Scheinwerfers, wodurch die maximale Beleuchtungsstärke im ausgeblendetem Bereich ebenfalls steigt. Bei der Betrachtung der in Blau dargestellten Regressionslinie, ist ein exponentieller Verlauf mit einer Güte von $R^2 = 0,94$ zu beobachten. Der exponentielle Verlauf zeigt, dass bei zunehmender Verschmutzung, mehr Licht in den abgedunkelten Bereich streut, als Lichtverluste im Fernlichtbereich auftauchen. Mit steigendem Verschmutzungsgrad fällt die Beleuchtungsstärke im Fernlichtbereich, wodurch der Fahrer eine geringere Sichtweite hat und gleichzeitig steigt die Beleuchtungsstärke im ausgeblendetem Bereich, wodurch andere Verkehrsteilnehmer geblendet werden können.

4.3.3 Einfluss der SRA auf die Verschmutzung von Scheinwerfern

In *Abbildung 4-13* ist die prozentuale Differenz δ_{SRA} für den Abblendlicht-Bereich oberhalb der HDG, zwischen der schmutzigen und der SRA gereinigten Leuchtdichteaufnahme zu erkennen, der anhand folgender Gleichung bestimmt wird.

$$\delta_{SRA} = \frac{L_{SRA} - L_{schmutzig}}{L_{schmutzig}} \cdot 100 \% \quad (4-3)$$

Differenz zwischen SRA
gereinigt und schmutzig
 δ_{SRA}

Die Daten sind unterteilt in linken und rechten Scheinwerfer, sowie die vier untersuchten Verschmutzungsgrade. Sie bestehen aus den Mittelwerten der drei Messtage sowie den zwei gefahrenen Wiederholungen. Die Fehlerbalken zeigen die einfache Standardabweichung.

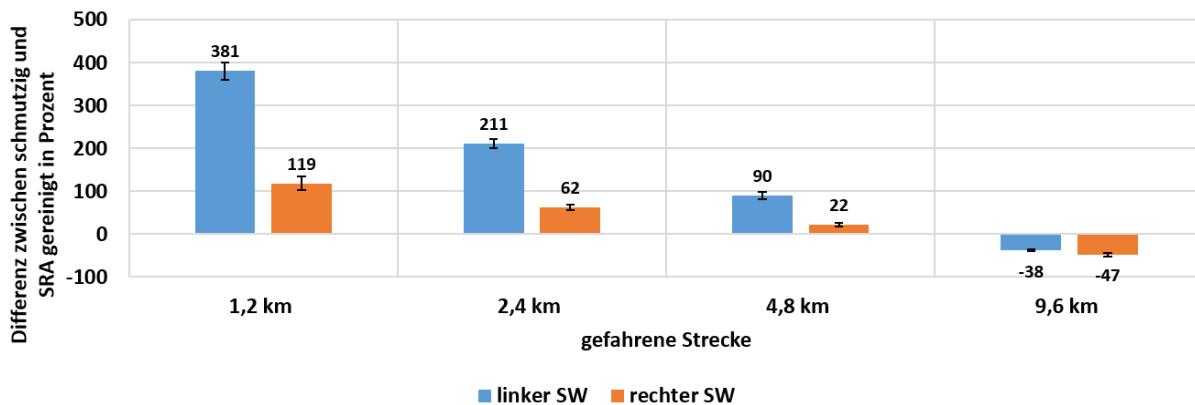


Abbildung 4-13: Prozentuale Differenz zwischen schmutzig und SRA gereinigt für den Bereich oberhalb der HDG (Abblendlicht)

In der Abbildung wird gezeigt, in welchem Maße die SRA die Verschmutzung der Scheinwerfer reinigt. Eine positive Differenz bedeutet, dass im untersuchten Bereich, die Scheinwerfer nach der Reinigung mehr Streulicht aufweisen als vor der Reinigung. Zu erkennen ist, dass bei Verschmutzungsgraden, die bis einschließlich 4,8 km entstehen, der Scheinwerfer nach der SRA Reinigung mehr Streulicht aufweist und somit das Blendverhalten verschlimmert wird. Je geringer der Verschmutzungsgrad ist, desto geringer wird die Differenz und somit auch die Erhöhung der Leuchtdichte nach der SRA Reinigung. Bei der in diesem Feldtest maximalen Verschmutzung nach 9,6 km, werden nach der Reinigung geringere Werte gemessen, als vor der Reinigung im verschmutzten Zustand, wodurch die Differenz zur schmutzigen Aufnahme negativ wird. Ebenfalls auffällig ist, dass zwischen linkem und rechtem Scheinwerfer ein signifikanter Unterschied zu erkennen ist ($p = 0,009$). Dieser ist auf die unterschiedlichen, absoluten Leuchtdichten zurückzuführen (vgl. *Abbildung 4-6* und *Abbildung 4-9*).

Bei einem Vergleich der absoluten Leuchtdichten fällt auf, dass diese einen Wert von $16,1 \text{ cd/m}^2$ aufnehmen und eine Standardabweichung von $\sigma = 0,3 \text{ cd/m}^2$ aufweisen (vgl. *Abbildung A-8*). Somit reinigt bzw. verschmutzt die SRA den Scheinwerfer, unabhängig vom Verschmutzungsgrad stets auf das gleiche Niveau. Eine potentielle Erklärung könnte in den getrockneten Resten der Reinigungsflüssigkeit auf der Abschlusscheibe des Scheinwerfers liegen, die ähnlich wie Schmutzpartikel, für die auftretende Streuung sorgen.

Bei der Betrachtung des Bereichs unterhalb der HDG ist ein ähnliches Verhalten zu beobachten, nämlich, dass die SRA den Scheinwerfer stets auf das gleiche Niveau reinigt bzw. verschmutzt (vgl. *Abbildung A-9*). Die Verwendung der SRA ist demzufolge beim Abblendlicht erst effektiv, wenn ein gewisser Verschmutzungsgrad erreicht wird.

In *Abbildung 4-14* ist für das blendfreie Fernlicht die prozentuale Differenz zwischen der schmutzigen und der SRA gereinigten Aufnahme dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung ist die Differenz des ausgeblendeten Bereichs und auf der rechten Seite die des Fernlichtbereichs zu sehen. Die Daten sind auch hier unterteilt in linken und rechten Scheinwerfer, da wie in den vorherigen Ergebnissen erkennbar war, ein signifikanter Unterschied in den Leuchtdichten gemessen wurde.

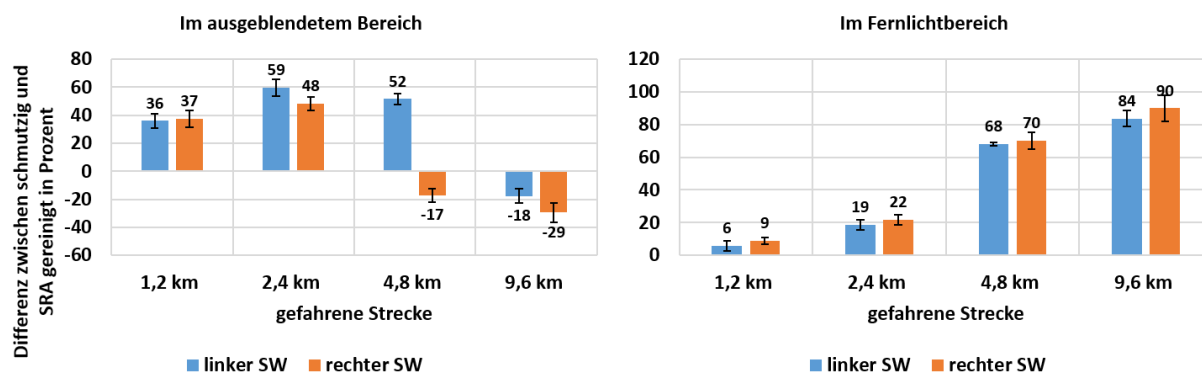


Abbildung 4-14: Verschmutzungsgrad des ausgeblendetem (links) und des Fernlichtbereichs (rechts): Abgebildet ist die prozentuale Differenz zwischen schmutzig und SRA gereinigt in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke für den linken und rechten Scheinwerfer (blendfreies Fernlicht)

Bei dem ausgeblendetem Bereich (links) ist ähnlich wie bei der Abblendlichtverteilung, bei geringen Verschmutzungsgraden, ein Anstieg des Streulichtes zu beobachten. Dieser Anstieg erreicht ein Maximum beim linken Scheinwerfer von 59 % und fällt dann schließlich wieder ab. Bei größeren Verschmutzungsgraden ist nach der SRA Reinigung eine negative Differenz zu erkennen, die besagt, dass die Reinigung der SRA das Streulicht im ausgeblendetem Bereich reduziert. Im Gegensatz zur Abblendlichtverteilung, bei der die Leuchtdichtewerte nach Reinigung mit der SRA stets einen konstanten Wert aufweisen, verändert dieser sich im ausgeblendetem Bereich. Die Verwendung der SRA bringt sowohl im ausgeblendetem Bereich, als auch im Bereich oberhalb der HDG bei der Abblendlichtverteilung, erst ab einem gewissen Verschmutzungsgrad eine Reduzierung des Streulichtes bzw. geringere Blendbelastung anderer Verkehrsteilnehmer. Im Fernlichtbereich hingegen ist schon bei geringen Verschmutzungsgraden eine Verbesserung zu erkennen. Verursacht durch die Verschmutzung, ist eine verringerte Leuchtdichte im Fernlichtbereich zu beobachten, die durch die Reinigung der SRA verbessert wird. Bei geringen Verschmutzungsgraden wird eine Differenz von 6 % bzw. 9 % gemessen, wohingegen bei der in diesem Feldtest maximalen Verschmutzung nach 9,6 km, eine Differenz zwischen dem schmutzigen und dem sauberen Scheinwerfer von 84 % bzw. 90 % auftritt. Es ist demzufolge eine exponentielle Verbesserung in Abhängigkeit der Verschmutzung zu beobachten.

4.3.4 Fazit

Der beschriebene Feldtest hatte das Ziel, den Einfluss der Verschmutzung auf die Lichtverteilung messtechnisch zu charakterisieren. Hierzu wurde auf einem geschlossenen Rundkurs der Verschmutzungsgrad durch die Anzahl der gefahrenen Runden variiert und die Leuchtdichte im Verschmutzten, SRA gereinigten und handgereinigten Zustand vermessen. Die Ergebnisse bei den Abblendlichtverteilungen haben gezeigt, dass durch die Verschmutzung mehr Streulicht oberhalb und weniger Licht unterhalb der HDG gemessen wird. Der größte Anteil des Streulichtes entsteht dabei in dem Bereich, in dem die höchsten Intensitäten unterhalb der HDG auftreten. Deswegen weist der vermessene Halogen-Scheinwerfer mit Reflexionssystem einen höheren Streulichtanteil auf und ist demzufolge anfälliger auf Streulicht durch Verschmutzung. Im ausgeblendetem Bereich des blendfreien Fernlichtsystems entsteht fünf Mal mehr Streulicht als beim Abblendlicht obwohl

die maximale Leuchtdichte nur etwa drei Mal höher ist. Der Grund hierfür liegt in den drei HDG, die den ausgeblendeten Bereich definieren und dadurch mehr Streulicht entsteht. Bei steigendem Verschmutzungsgrad ist ein exponentieller Verlauf zwischen dem Fernlichtbereich und dem ausgeblendeten Bereich zu erkennen, der ebenfalls durch die drei HDG begründet werden kann. Somit kann die Fragestellung dieses Feldtestes, ob die Verschmutzung die Lichtverteilung von blendfreien Fernlichtsystemen beeinflusst, deutlich beantwortet werden. Eine Scheinwerferreinigungsanlage kann dem entgegenwirken, allerdings funktioniert diese oberhalb der HDG bzw. im ausgeblendeten Bereich erst ab einem gewissen Verschmutzungsgrad. Dieser liegt bei der Abblendlichtverteilung bei einer Streulichterhöhung von mindestens 50 % im Vergleich zur sauberen Verteilung und beim blendfreiem Fernlichtsystem bei mindestens 120 %. Im Fernlichtbereich bzw. unterhalb der HDG, ist schon bei einem geringen Verschmutzungsgrad und dadurch verbundenen Sichtbarkeitseinbußen, eine positive Reinigungswirkung messbar. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die SRA die Sichtweite des Fahrers verbessert, allerdings zu einer höheren Blendbelastung anderer Verkehrsteilnehmer beiträgt. Die Verwendung einer SRA sollte daher in Fahrzeugen verbaut werden, die in winterlichen Regionen unterwegs sind. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass ein mit der SRA gereinigter Scheinwerfer, stets eine konstante Leuchtdichte aufweist. Diese Leuchtdichte ist allerdings aus blendungstechnischer Sicht zu hoch angesetzt und sollte in zukünftigen SRA-Entwicklungen mitberücksichtigt werden.

4.4 Abgeleitete Ergebnisse

Im vorherigem Kapitel wurden die messtechnischen Ergebnisse des Feldtestes präsentiert, die im Folgenden hinsichtlich Blendung und Sichtbarkeit weiter erläutert werden. KOBBERT [19] zeigte, dass die Beleuchtungsstärke für eine 50 % Detektionswahrscheinlichkeit auf dem Objekt mindestens 6 lx betragen sollte. Um die Beleuchtungsstärke am Objekt aus der Leuchtdichteaufnahme ermitteln zu können, wird eine Simulationssoftware in MATLAB geschrieben. Diese simuliert ein Fahrzeug, das auf ein Objekt auf der rechten Straßenseite zufährt. Simuliert wird die Trajektorie des Objektes in der Leuchtdichteaufnahme des Scheinwerfers ausgehend vom HV Punkt. In *Abbildung 4-15* ist die in Beleuchtungsstärke umgerechnete Leuchtdichteaufnahme dargestellt, bei der jeweils in weiß der HV-Punkt und der Trajektorie des Objektes in der LVK, in Abhängigkeit des Abstandes, dargestellt sind.

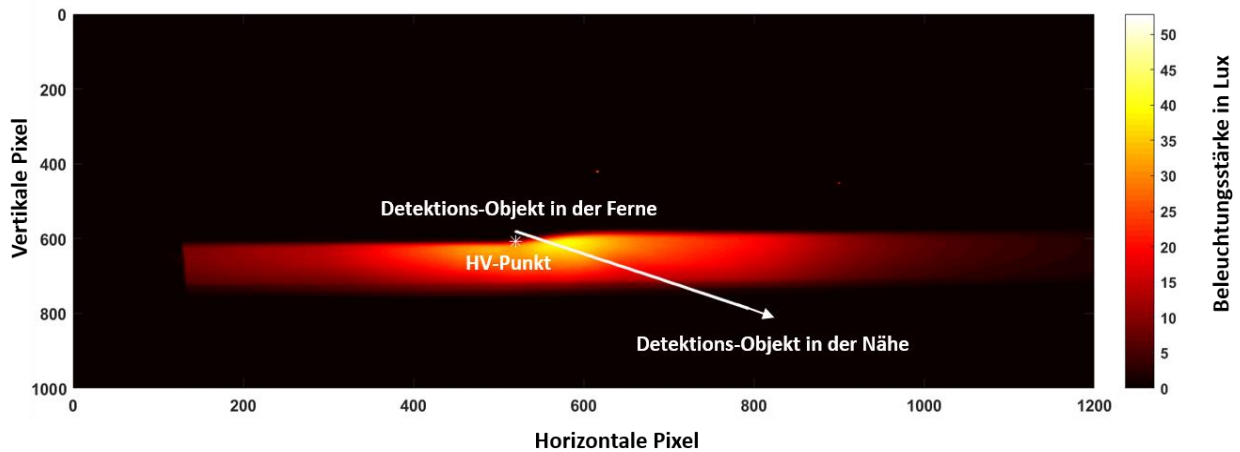


Abbildung 4-15: Trajektorie des Objektes in der Lichtverteilung in Abhängigkeit des Abstandes beim Begegnen eines Objektes

Das simulierte Objekt befindet sich 1,5 m neben der Fahrbahn und der Scheinwerfer ist um 1 % bzw. $0,57^\circ$ nach unten geneigt. Dies ist auch der Grund, weshalb der Verlauf für weit entfernte Objekte nicht im HV-Punkt startet, sondern etwa 30 Pixel ($0,57^\circ$) nach oben versetzt. Entlang des gezeigten Verlaufs des Objektes in der LVK, wird die maximale Beleuchtungsstärke in einem vertikalen Bereich bis zur HDG ermittelt und diese anschließend durch das photometrische Entfernungsgesetz auf den zugehörigen Abstand umgerechnet. Formeltechnisch kann dies wie folgt beschrieben werden.

$$\text{Aus Gleichung (4-2) folgt: } E_{\text{Leuchtdichteaufnahme}} = \frac{L \cdot \pi}{\rho} \quad (4-4)$$

$$\text{Photometrische Entfernungsgesetz: } E = \frac{I}{d^2} \quad (4-5)$$

Nach Substitution von $E_{\text{Leuchtdichteaufnahme}}$ mit (4-6) folgt:

$$I_{\text{Leuchtdichteaufnahme}} = \frac{L \cdot \pi}{\rho} \cdot d_1^2 \quad (4-7)$$

Nach einsetzen der 6 lx nach KOBBERT folgt:

$$I_{\text{Leuchtdichteaufnahme}} = 6 \text{ lx} \cdot d_2^2 \quad (4-8)$$

Der Abstand d_1 entspricht dem Abstand zwischen Messschirm und Leuchtdichtekamera. Aus der Gleichung nach (4-8) wird der Abstand d_2 ermittelt, der für die Detektion eines Objektes mit der Wahrscheinlichkeit von 50 % nach KOBBERT benötigt wird. Diese Methode wird gewählt, da das zu detektierende Objekt als Fläche wahrgenommen wird. In *Abbildung 4-16* ist die simulierte Detektionsdistanz für das Fahrzeug mit dem Projektions- und Reflexionssystem zu sehen. Diese sind in Abhängigkeit von der gefahrenen Strecke bzw. steigendem Verschmutzungsgrad dargestellt.

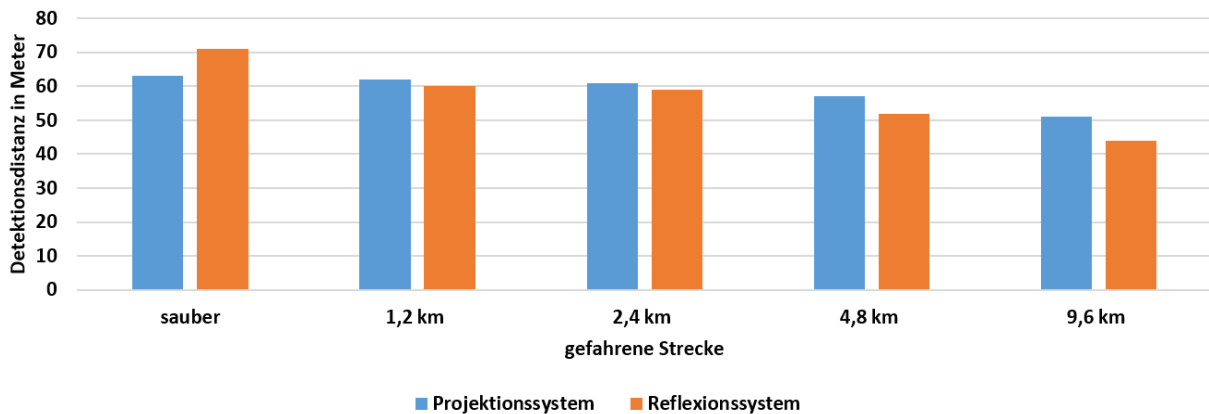


Abbildung 4-16: Simulierte Detektionsdistanz für das Projektions- (blau) und das Reflexionssystem (orange) in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke

Da beim Reflexionssystem höhere Beleuchtungsstärken im Hot-Spot auftreten (vgl. *Abbildung 4-7* und *Abbildung 4-8*), werden höhere Detektionsdistanzen ermöglicht. So erreicht das Reflexionssystem eine simulierte Detektionsdistanz von 71 m im Vergleich zum Projektionssystem bei dem das Objekt in 63 m detektiert werden könnte. Die berechneten Detektionsdistanzen stimmen unter Berücksichtigung der Streuung mit den nach ZYDEK [15] ermittelten Abstandsbereichen überein. Mit zunehmender Verschmutzung bzw. gefahrene Strecke ist eine fallende Tendenz des Detektionsabstandes zu erkennen, der beim höchsten Verschmutzungsgrad bei 51 m beim Projektions- und 44 m bei Reflexionssystem liegen. Dies bedeutet eine um etwa 20 % bzw. 40 % geringere Detektionsdistanz bei den beiden Systemen.

In *Abbildung 4-17* ist die simulierte Detektionsdistanz für das blendfreie Fernlichtsystem in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke zu erkennen. Zusätzlich ist noch die Detektionsdistanz nach Reinigung mit der SRA dargestellt.

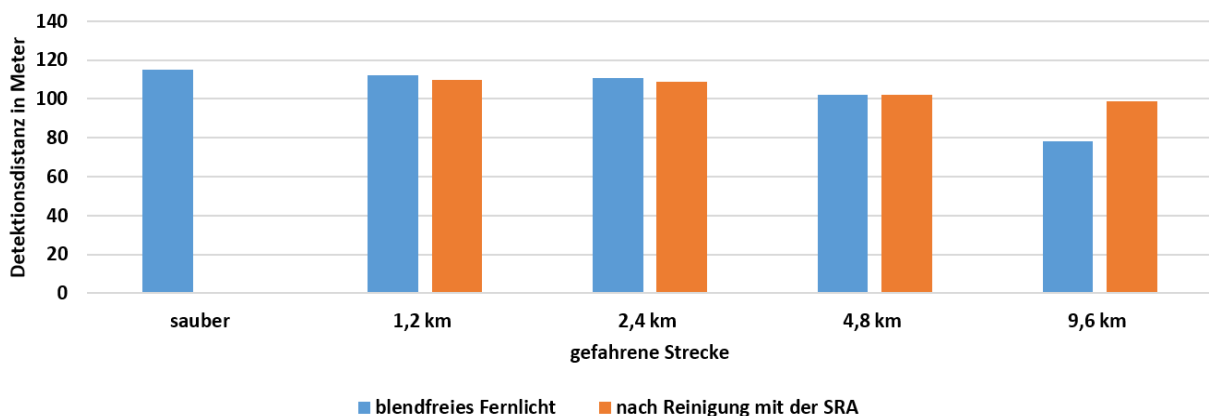


Abbildung 4-17: Simulierte Detektionsdistanz für das blendfreie Fernlichtsystem (blau) und nach Reinigung mit der SRA (orange) in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke

Die Detektionsdistanz erhöht sich von 63 m bei Abblendlicht (vgl. *Abbildung 4-16*) auf 115 m beim blendfreien Fernlicht. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung, der nach ZYDEK [15] er-

mittelten Detektionsdistanzen, stimmen die Ergebnisse auch hier überein. Mit steigendem Verschmutzungsgrad ist beim blendfreien Fernlicht eine fallende Tendenz des Detektionsabstandes zu beobachten, wobei das Minimum von 78 m beim höchsten Verschmutzungsgrad erreicht wird. Dies ist eine Verringerung der Detektionsdistanz um 32 %. Anders als bei Abblendlicht, reinigt die SRA die Scheinwerfer nicht auf ein konstantes Niveau (vgl. *Abbildung A-8*), vielmehr ist keine Änderung der Detektionsdistanz nach der Reinigung zu beobachten. Einzig beim höchsten Verschmutzungsgrad ist eine Erhöhung des Detektionsabstandes nach der Reinigung mit der SRA zu erkennen. Inwieweit die reduzierte Sichtweite die Verkehrssicherheit beeinflusst, wird im Folgenden betrachtet. Die StVO gibt in § 3 Absatz 1 an, dass „nur so schnell gefahren werden darf, dass innerhalb der übersehbaren Strecke gehalten werden kann“ [116]. Demzufolge darf ein Fahrzeug mit blendfreiem Fernlicht und sauberen Scheinwerfern nur so schnell fahren, dass es nach 115 m zum Anhalten kommt. Aus dem Anhalteweg A in seiner worst-case Betrachtung nach Gleichung (4-11), ergibt sich eine zulässige Geschwindigkeit v von etwa 90 km/h.

$$\text{Bremsweg } B: \quad B = \left(\frac{v}{10}\right)^2 \quad (4-9)$$

$$\text{Reaktionsweg } R: \quad R = \frac{v}{10} \cdot 3 \quad (4-10)$$

$$\text{Anhalteweg } A: \quad A = B + R \quad (4-11)$$

Aus der berechneten Geschwindigkeit kann der Anhalteweg bestimmt werden, der bei sauberen, verschmutzten und SRA gereinigten Scheinwerfern benötigt wird. In *Abbildung 4-18* ist der Anhalteweg für saubere Scheinwerfer in blauen Säulen, die Sichtweite des Fahrers in einer orangenen Linie und die Sichtweite nachdem der Scheinwerfer mit der SRA gereinigt wurde, dargestellt.

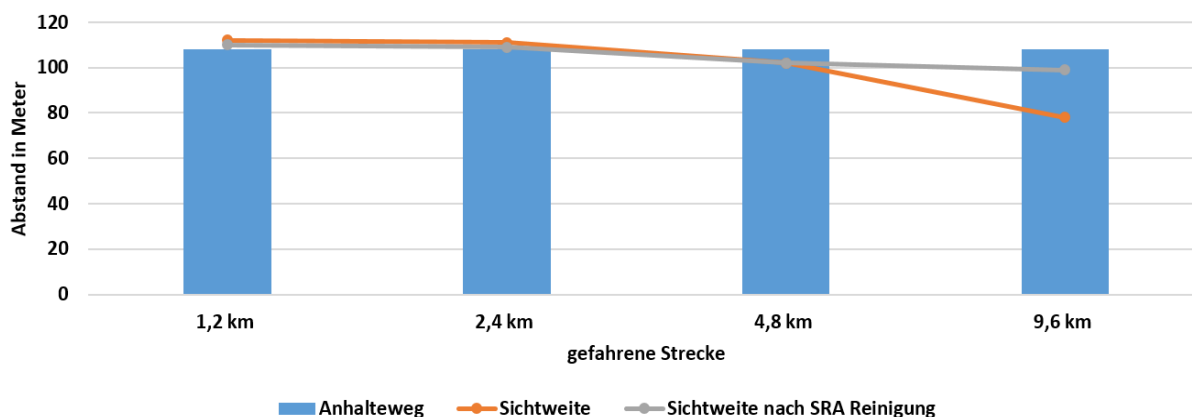


Abbildung 4-18: Anhalteweg bei blendfreien Fernlichtsystemen bei einer Geschwindigkeit von 90 km/h in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke bzw. Verschmutzungsgrad. Die orangene Linie zeigt die Detektionsentfernung des Fahrers und die graue die Sichtweite des Fahrers nachdem der Scheinwerfer mit der SRA gereinigt wurde.

Bei sauberen Scheinwerfern ist der Anhalteweg an die Sichtweite des Fahrers angepasst, weshalb der Anhalteweg (blau) geringer ist, als die Sichtweite (orange) des Fahrers. Bei einer Gefahrensituation könnte das Fahrzeug demzufolge sicher zum Anhalten kommen. Bei steigender Verschmutzung reduziert sich die Sichtweite des Fahrers, weshalb nach einer Strecke von 9,6 km, die Sichtweite um etwa 35 m geringer ist als der Anhalteweg. Ein unvermeidlicher Unfall wäre die Folge

im Falle einer plötzlich auftauchenden Gefahr. Nachdem die Scheinwerfer mit der Reinigungsanlage gereinigt werden, erhöht sich die Sichtweite von 78 m auf etwa 100 m, wodurch es immer noch zu einem Unfall kommen würde, da der Anhalteweg 108 m beträgt. Über die Bremsverzögerung a nach (4-12) kann die Aufprallgeschwindigkeit $v_{aufprall}$ nach (4-13) und demzufolge die Schwere des Unfalls abgeleitet werden.

$$\text{Bremsverzögerung } a: \quad a = \frac{v^2}{2 \cdot A} \quad (4-12)$$

$$\text{Aufprallgeschwindigkeit } v_{aufprall}: \quad v_{aufprall} = v - a \cdot t_{bis\ Aufprall} \quad (4-13)$$

Demnach ergibt sich bei schmutzigen Scheinwerfern eine Aufprallgeschwindigkeit von etwa 30 km/h, die sich nach Reinigung mit der SRA und damit verbundene frühzeitige Reaktion des Fahrers, auf 5 km/h reduzieren würde. Die Schwere des Unfalls könnte demzufolge erheblich gesenkt werden.

Im weiteren Verlauf wird auf die Blendung von Abblendlicht und blendfreiem Fernlicht näher eingegangen. In Kapitel 3.4 wurde die Beleuchtungsstärke ermittelt, ab der sich ein Proband in Abhängigkeit der Adaptation, geblendet fühlt. Für den Fall eines entgegenkommenden Verkehrs, adaptiert der Fahrer auf die Helligkeit der ihm entgegenkommenden Scheinwerfer, weshalb sich die Adaptation und demzufolge auch die Blendungsschwelle verändert. Um eine Aussage über das Blendungsverhalten in Abhängigkeit der Verschmutzung zu treffen, wird der blendungsrelevante B50L Punkt verwendet, dessen Position aus dem zuvor ermitteltem HV Punkt bestimmt werden kann. Als Adaptationsbeleuchtungsstärke wird die mittlere Beleuchtungsstärke über fünf Sekunden vor Erreichen des B50L Punktes gewählt, dies entspricht bei 80 km/h einem Integrationsabstand von etwa 110 m. In *Abbildung 4-19* wird für das Projektions- und das Reflexionssystem, in Abhängigkeit der unterschiedlichen Verschmutzungsgrade, die Beleuchtungsstärke am B50L Punkt dargestellt. Die orangene Linie zeigt die Anhand der in Kapitel 3 gewonnenen Daten errechnete Blendschwelle, ab der sich ein Probanden psychologisch geblendet fühlt. Ist diese geringer als die abgebildete Beleuchtungsstärke am B50L, so kann von einer Blendung des entgegenkommenden Verkehrs ausgegangen werden.

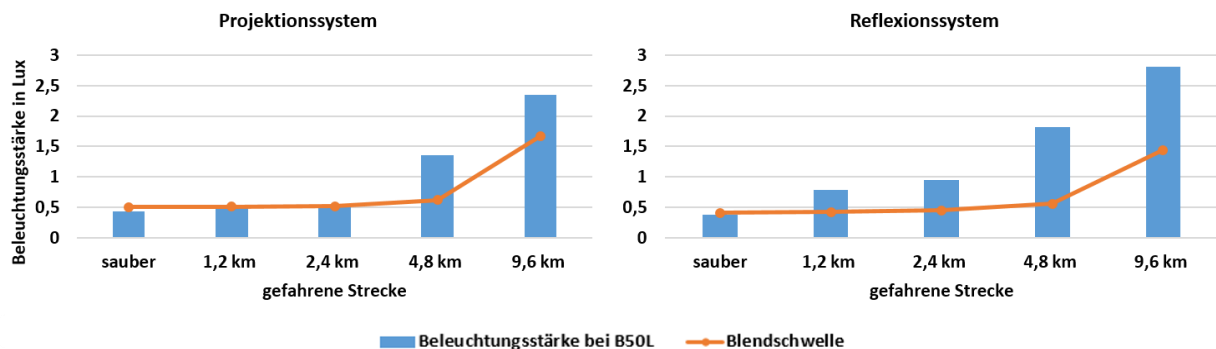


Abbildung 4-19: Beleuchtungsstärke am B50L Punkt in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke für das Projektionssystem (links) und das Reflexionssystem (rechts). Die orangene Linie zeigt die ermittelte Blendschwelle

Für beide dargestellten Systeme ist mit steigendem Verschmutzungsgrad eine steigende Beleuchtungsstärke am B50L Punkt zu beobachten. Diese erreicht einen maximalen Wert von 2,35 lx beim Projektions- und 2,81 lx beim Reflexionssystem. Diese Werte liegen 40 % bzw. 95 % oberhalb der ermittelten Blendschwelle und verursachen demzufolge eine psychologische Blendung. Beim Projektionssystem wird die Blendschwelle erst ab einer Strecke von 4,8 km überstiegen und beim Reflexionssystem schon ab einer gefahrenen Strecke von 1,2 km. Demzufolge kommt es beim Reflexionssystem bei einer vier Mal kürzeren Strecke schon zu einer Blendung des Gegenverkehrs.

Da sich beim blendfreien Fernlichtsystem der ausgeblendete Bereich dynamisch verändert, wird in *Abbildung 4-20* die mittlere Beleuchtungsstärke des gesamten ausgeblendeten Bereichs in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke bzw. Verschmutzungsgrades dargestellt. Dies stellt eine realitätsnahe und vergleichbare Betrachtung dar, da im ausgeblendeten Bereich ein vorausfahrendes Fahrzeug in 50 m simuliert wird.

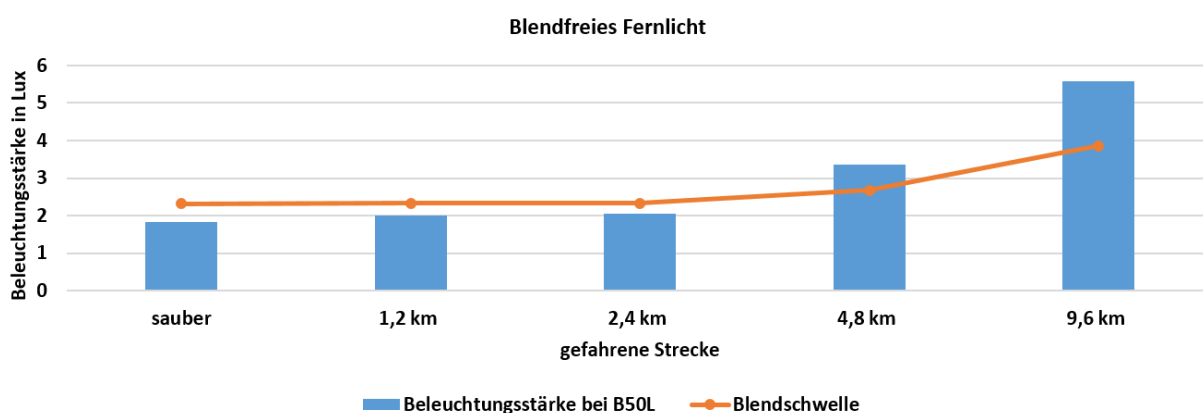


Abbildung 4-20: Mittlere Beleuchtungsstärke des ausgeblendeten Bereichs, die orangene Linie zeigt die ermittelte Blendschwelle

Im ausgeblendeten Bereich des blendfreien Fernlichtsystems erhöht sich die Beleuchtungsstärke ebenfalls mit steigendem Verschmutzungsgrad. Die Blendschwelle wird für Strecken bis 2,4 km nicht überstiegen, wodurch keine Blendung verursacht wird. Ab einer Strecke von 4,8 km wird die Blendschwelle überstiegen und bei 9,6 km wird eine maximale Überschreitung von 44 % erreicht.

Über das photometrische Entfernungsgesetz nach Gleichung (4-5) kann der Abstand berechnet werden, ab dem der Fahrer eines vorausfahrenden Fahrzeuges geblendet wird. Unter der Annahme, dass ein Fahrzeug mit 90 km/h unterwegs ist, sollte der Sicherheitsabstand mindestens 45 m betragen [117]. Ist der berechnete Blendabstand größer als der Sicherheitsabstand, kann von einer Blendung ausgegangen werden.

Tabelle 4-1: Abstand ab dem der Fahrer eines vorausfahrenden Fahrzeuges geblendet wird

	Gefahrene Strecke				
	0 km (sauber)	1,2 km	2,4 km	4,8 km	9,6 km
Blendabstand	26 m	38 m	43 m	54 m	64 m

Aus den Daten von *Tabelle 4-1* ist zu erkennen, dass bei sauberen Scheinwerfern der Blendabstand wesentlich geringer ist als der Sicherheitsabstand, weshalb keine Blendungsgefahr für das vorausfahrende Fahrzeug besteht. Ähnlich wie bei den Daten aus *Abbildung 4-20* kommt es allerdings ab einer gefahrenen Strecke von 4,8 km zu einer Blendung, da der Blendabstand den Sicherheitsabstand um 9 m überschreitet (von 45 m auf 54 m). Bei einer gefahrenen Strecke von 9,6 km erreicht der Blendabstand sein Maximum und übersteigt den Sicherheitsabstand um 19 m. Demzufolge wird der Fahrer des vorausfahrenden Fahrzeuges durch verschmutzte Scheinwerfer geblendet.

Blendfreie Fernlichtsysteme weisen ein vergleichbares Blendungspotential auf, als Abblendlichtscheinwerfer mit Projektionssystemen, weshalb eine Abschaffung der SRA die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer erheblich beeinträchtigen würde. Vielmehr sollte die SRA auch bei Reflexionsystemen ihren Einzug finden, da diese durch Verschmutzung ein höheres Blendpotential aufweisen können als Projektionssysteme.

5 Optimale Anleuchtung von Verkehrszeichen

Blendfreie Fernlichtsysteme ermöglichen dem Fahrer eine kontinuierliche Fernlichtfahrt, ohne dabei andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Die Ergebnisse der vorherigen Kapitel haben gezeigt, dass eine für andere Verkehrsteilnehmer blendfreie Fahrt nur ermöglicht werden kann, falls die Scheinwerfer sauber sind und eine dLWR mit geringer Latenzzeit verbaut ist. Neben der Blendung von anderen Verkehrsteilnehmern kann es passieren, dass der eigene Fahrer durch Verkehrszeichen geblendet wird. Dies passiert, da neben dem Verkehrsraum auch die Verkehrszeichen mit Fernlicht angeleuchtet werden, die durch ihre retroreflektierenden Eigenschaften das Fernlicht direkt zum Fahrer zurückreflektieren. Dies kann dazu führen, dass das Verkehrszeichen überstrahlt und somit einerseits nicht oder erst verspätet gelesen werden kann und andererseits, dass der Fahrer geblendet wird. In *Abbildung 5-1* wird diese Situation exemplarisch an einem Verkehrszeichen gezeigt, dass mit Abblendlicht (links) und Fernlicht (rechts) angeleuchtet wird.



Abbildung 5-1: Anleuchtung eines Verkehrszeichens mit Abblendlicht (links) und Fernlicht (rechts). Bei Abblendlicht ist das Verkehrszeichen lesbar, während bei Fernlicht das Verkehrszeichen überstrahlt und einerseits nicht mehr lesbar ist und andererseits Blendung verursachen kann

Im folgenden Feldtest wird die optimale Anleuchtung von Verkehrszeichen untersucht, damit einerseits der Lesbarkeitsabstand maximiert und gleichzeitig keine Blendung auftritt. Die Ergebnisse des Feldtests wurden teilweise in der ATZ Ausgabe 09/2018 [107] und auf dem „International Symposium on Automotive Lighting“ (Abk.: ISAL) [118] 2017 veröffentlicht, weshalb Teile dieses Kapitels aus den Berichten übernommen sind.

5.1 Stand der Forschung

Im Folgenden wird auf einige Untersuchungen eingegangen, die sich mit der optimalen Anleuchtung von Verkehrszeichen hinsichtlich Blendung und Lesbarkeitsabstand beschäftigen. Die aufgeführten Untersuchungen sind chronologisch geordnet und beziehen sich größtenteils auf Laboruntersuchungen.

AULBACH [119] untersuchte den Erkennungsabstand von retroreflektierenden Schildern, die von einem Fahrzeug aus beleuchtet werden. Die Untersuchung wurde in eine Laboruntersuchung und einen dynamischen Test unterteilt. Im Labortest wurden Verkehrsschilder mit drei unterschiedlichen Größen projiziert, wodurch Entfernungen von 50 m, 100 m und 200 m zwischen Fahrzeug und Verkehrszeichen simuliert wurden. Die projizierten Verkehrszeichen wiesen unterschiedliche

Leuchtdichten auf, um durch die Probanden die Unterscheidbarkeit in Abhängigkeit der Leuchtdichte bewerten zu lassen. Im dynamischen Test wurde der Erkennbarkeitsabstand von Verkehrszeichen vor einer Kurve untersucht. Hierbei wurden die Probanden gebeten, mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h auf die Verkehrsschilder zu fahren und anhand verschiedenfarbiger Ausführung der Verkehrsschilder zu erkennen, ob es eine Links- oder Rechtskurve gibt. Die Ergebnisse der Laboruntersuchung zeigten, dass für eine optimale Unterscheidbarkeit eine Leuchtdichte zwischen 3 und 30 cd/m² nötig ist. Darüber hinaus, konnte für Leuchtdichten über 10 cd/m² nur geringe Unterschiede in den Probandenbewertungen festgestellt werden. Bei Leuchtdichten unter 0,5 cd/m² werden die Verkehrsschilder als zu dunkel bewertet, wobei bei Leuchtdichten über 200 cd/m² die Zeichen überstrahlen und nicht mehr lesbar sind. Ein weiteres Ergebnis war, dass blaue Schilder zu höherer Blendung führen und als solche nicht zu empfehlen sind. Die Erkenntnisse aus dem dynamischen Test zeigen, dass eine Kombination aus Grün und Rot den höchsten Erkennungsabstand aufweisen. Diese Kombination kann allerdings wegen der Rot-Grün-Blindheit, unter der manche Menschen leiden, nicht empfohlen werden. Stattdessen wird eine weiß-rot Kombination empfohlen, die den Farbkontrast und die Reflexionen auch bei geringer Leuchtdichte maximieren. [119]

FRANK [120] hat in seiner Dissertation die lichttechnischen Anforderungen an Verkehrszeichen untersucht. Die Untersuchung gliedert sich in zwei Teile, in denen die Identifikation und Blendung von Verkehrszeichen untersucht wurden. Die Untersuchung wurde unter Laborbedingungen durchgeführt, in denen Probanden gebeten wurden, die psychologische Blendung verschiedener Verkehrszeichen zu bewerten. Die Verkehrszeichen unterscheiden sich unter anderem durch ihre Leuchtdichte, Farbe und Größe und simulierten drei verschiedene Entfernungen, 70, 200 und 300 Meter. Als optimale Verkehrszeichenleuchtdichte wird bei einer Umgebungsleuchtdichte von 0,01 cd/m² und einem Abstand von 70 m eine Leuchtdichte von 40 cd/m² genannt, wobei ab etwa 700 cd/m² die Verkehrszeichen als „zu hell“ bewertet werden. Im Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass bei einer Vergrößerung der Entfernung des Verkehrszeichens von 70 auf 140 m, die optimale Leuchtdichte des Schildes um Faktor zwei zunimmt, also von 40 cd/m² auf 80 cd/m² steigt. [120]

Im Jahr 1999 untersuchten AULBACH und FRANK [121] die Beleuchtungsstärke von Verkehrszeichen in realen Verkehrssituationen. Sie entdeckten, dass die Beleuchtungsstärke am Verkehrszeichen in einen direkten und einen indirekten Anteil aufgeteilt werden können. Der Einfluss der indirekten Beleuchtungsstärke steigt bis zu einem Abstand von 100 m linear von 1 % auf 10 % und kann anhand der Autoren vernachlässigt werden. Bei steigendem Abstand nimmt der Einfluss des indirekten Anteils zu und erreicht bei 200 m einen Anteil von 30 %. Bei Regen nimmt der Einfluss etwa um Faktor zwei zu. [121]

JÜRGENS und LACHMAYER [122] stellten Untersuchungen zur Eigenblendung von retroreflektierenden Verkehrszeichen an und ermittelten die Rückstrahlwerte verschiedener retroreflektierender Materialien der Firma 3M. Entsprechend den Anforderungen der DIN-Norm 67520 [123], erreichen die Folien vom Typ RA3 den höchsten Rückstrahlwert. Es wird aufgezeigt, dass im zentralen Blickfeld ($H=0^\circ$ und $V=0^\circ$) große Unterschiede zwischen den maximalen und minimalen Rückstrahlwerten gemessen werden. Dieser Umstand ist auf schlecht reproduzierbare Maxima, die in Form von Spiegelungen auftauchen, zurückzuführen. Für Bereiche außerhalb des zentralen Blickfeldes werden Rückstrahlwerte gemessen, die sich nicht mehr als 10 % voneinander unterscheiden. Außerdem wurde von JÜRGENS und LACHMAYER [122] die Blendbeleuchtungsstärke für eine

Geradeausfahrt und eine Kurvensituation aus Fahreraugenposition, für zwei unterschiedliche Scheinwerfer untersucht. Hierbei handelte es sich um Scheinwerfer mit LED- und HID-Leuchtmittel. Die ermittelte Beleuchtungsstärke wurde mit der am B50L Punkt aus der UNECE Norm Nr. 123 [124] verglichen. Das absolute Maximum wird bei einem Abstand von 35 m erreicht, wobei bei größeren Entfernungen eine Abnahme der Absolutwerte verzeichnet wird, eine Tatsache, die durch das photometrische Entfernungsgesetz begründet werden kann. Diese Annahme wird allerdings dadurch kompensiert, dass sich der Hot-Spot bei größeren Entfernungen näher am Verkehrszeichen befindet und somit höhere Beleuchtungsstärken auftreffen. Verkehrsschilder, die sich im zentralem Blickfeld befinden und dadurch näher am Hot-Spot, überschreiten die Blendungsbeleuchtungsstärke bei jeder Entfernung. Gleiches gilt auch für die Kurvensituation. In einem direkten Vergleich zwischen den ermittelten Beleuchtungsstärken auf Fahreraugenposition und der Beleuchtungsstärke in B50L, wird dieser Wert um bis zu 1300 % überschritten. [122]

SCHREIER [125] untersuchte die Blendung durch retroreflektierende Verkehrszeichen beim Fahren mit Fernlicht. Sein Hauptaugenmerk lag darauf, eine Leuchtdichtegrenze in Abhängigkeit von der wahrgenommenen Verkehrszeichengröße zu finden. Um dies zu erreichen, untersuchte SCHREIER [125] die psychologische Blendung durch Verkehrszeichen mit unterschiedlicher Helligkeit, Farbe und Größe. Die Untersuchung wurde statisch durchgeführt und fand in einem Labor statt. Hier blickten Probanden auf eine Projektionsfläche, die eine simulierte statische Szene einer Landstraße und zufällig auftauchende Verkehrszeichen zeigte. Die verwendeten Verkehrszeichen hatten unterschiedliche Intensitäten und Größen und simulierten verschiedene Entfernungen. Durch die Blendungsbewertung der Verkehrszeichen mit unterschiedlichen Leuchtdichten konnte die Schwellenleuchtdichte ermittelt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Zeichengröße die Schwellenleuchtdichte abnimmt. Dieser Zusammenhang zwischen der Verkehrszeichengröße und der Schwellenleuchtdichte zeigt, dass die Probanden empfindlicher auf große Zeichen reagieren und dadurch stärker geblendet werden. Hinsichtlich der Farbgebung konnte zwischen weißem und gelbem Verkehrszeichen kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Dasselbe gilt auch für die Positionierung des Verkehrszeichens, ob es sich über oder links der Fahrbahn befindet. [125]

In *Tabelle 5-1* sind die erwähnten Ergebnisse der Literatur tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse der Literatur

	Bewertung als		
	zu dunkel	optimal	zu hell
Aulbach [119]	$L < 0,5 \text{ cd/m}^2$	$3 \text{ cd/m}^2 < L < 30 \text{ cd/m}^2$	$L > 200 \text{ cd/m}^2$
Frank [120]	$L < 0,2 \text{ cd/m}^2$	$L_{70m} = 40 \text{ cd/m}^2$ $L_{140m} = 80 \text{ cd/m}^2$	$L > 700 \text{ cd/m}^2$
Schreier [125]		$1 \text{ lx} < E < 3 \text{ lx}$	
		$100 \text{ cd/m}^2 < L < 300 \text{ cd/m}^2$	$L > 800 \text{ cd/m}^2$

Der Überblick zum Stand der Forschung zeigt, dass schon wichtige Erkenntnisse zum Thema Blendung und optimale Anleuchtung von Verkehrszeichen erarbeitet wurden. Er zeigt aber auch, dass die Untersuchungen meist unter Laborbedingungen durchgeführt worden sind und nicht unter

realen Straßenbedingungen. Es zeigt sich demnach, dass eine Untersuchung fehlt, die unter möglichst realistischen Bedingungen, die optimale Verkehrszeichenleuchtdichte beschreibt. Aus diesem Grund wurde der in diesem Kapitel vorgestellte Feldtest entwickelt und durchgeführt.

5.2 Methodik

Um die optimale Ausleuchtung von Verkehrszeichen für blendfreie Fernlichtsysteme ermitteln zu können, wurde ein Feldtest durchgeführt, bei dem drei unterschiedliche Verkehrszeichen untersucht wurden. Hierfür wurden Verkehrsschilder mit dem höchsten Rückstrahlwert (RA 3) ausgewählt, um eine worst-case Betrachtung durchzuführen. Diese Verkehrszeichen befinden sich in den meisten Fällen auf Autobahnen, Bundes- und Landstraßen. Auf diesen Straßen ist die Fernlichtnutzung am höchsten, da städtische Straßen im Normalfall durchgängig beleuchtet sind. Für den Versuch wurden Richtungs-, Orts- und Geschwindigkeitsschilder verwendet, die einerseits aus der Literatur gezeigten maximalen Farbkontraste aufweisen und andererseits die am häufigsten verwendeten Verkehrsschilder mit den höchsten Rückstrahlwerten sind.

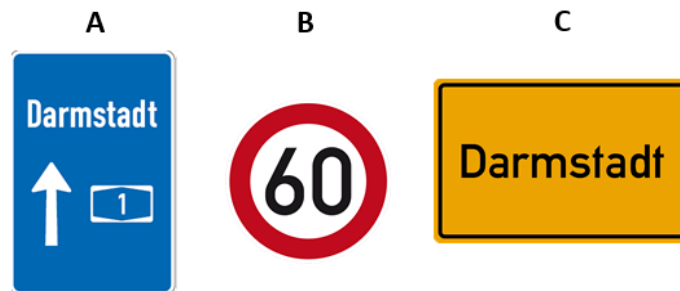


Abbildung 5-2: Verwendete Verkehrszeichen *A*: Richtungsschild, *B*: Geschwindigkeitsschild und *C*: Ortsschild

Die Verkehrszeichen waren an vier Positionen entlang eines Rundkurses aufgebaut– links, rechts, beidseitig sowie vor dem Versuchsfahrzeug, wobei letzteres ein Verkehrszeichen in einer Kurvensituation repräsentiert. Ein Verkehrszeichen in einer Kurve stellt nach JÜRGENS und LACHMAYER [122] die blendungskritischste Position dar. Die Orts- und Richtungsschilder wurden mit den Aufdrucken Darmstadt und Dortmund und die Geschwindigkeitsschilder mit den Höchstgeschwindigkeiten 50 km/h und 60 km/h ausgewählt. Die ausgewählten Schilder sollten aus der Entfernung sehr ähnlich aussehen um die Identifizierung der Schilder anhand der groben Form zu verhindern. In *Abbildung 5-3* ist der Versuchsaufbau mit den vier Verkehrszeichen (Abk.: VZ) zu sehen.

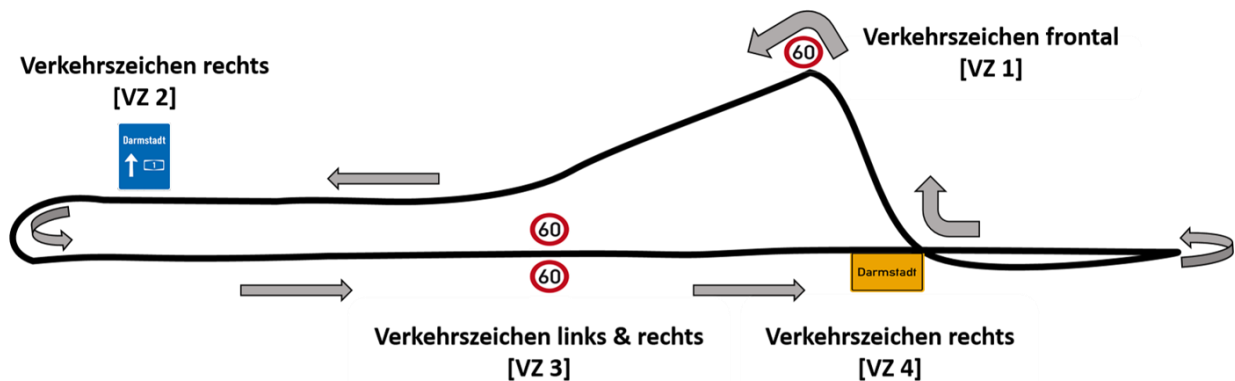


Abbildung 5-3: Versuchsaufbau nach [107] bei dem der Rundkurs und die Positionen der Verkehrszeichen zu sehen sind

Das verwendete Versuchsfahrzeug war mit einem blendfreien Fernlichtsystem ausgestattet, bei dem die Helligkeit digital durch den Versuchsleiter eingestellt werden konnte. Dadurch war es möglich, die Verkehrsschilder unterschiedlich anzuleuchten und so die optimale Helligkeit zu ermitteln. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden sechs unterschiedliche Fernlichtintensitäten untersucht - 0 %, 26 %, 36 %, 51 %, 76 % und 100 %. Bei allen Fahrten war das Abblendlicht aktiviert. Null Prozent bedeutet hierbei ausgeschaltetes Fernlicht und 100 % steht für vollständig aktiviertes Fernlicht. Die prozentualen Fernlichtintensitäten entsprechen der pulsweitenmodulierten (Abk.: PWM) LVK des verwendeten Scheinwerfers, der eine lineare Beziehung zwischen der Lichtstärke und PWM-Werten mit einer Güte von $R^2 = 0,95$ aufweist. Die Abstände der Fernlichtintensitäten wurde logarithmisch gewählt, um der menschlichen Helligkeitswahrnehmung anhand des Weber-Fechner-Gesetzes zu entsprechen. Die zugehörigen Lichtstärkewerte der prozentualen Fernlichtintensitäten sind in *Tabelle 5-2* zu sehen.

Tabelle 5-2: Lichtstärkewerte der verwendeten Fernlichtintensitäten

Prozentuale Fernlichtintensität	Maximale Lichtstärke in der LVK
0 %	29350 cd
26 %	34700 cd
36 %	38750 cd
51 %	43420 cd
76 %	49790 cd
100 %	66180 cd

Das Versuchsfahrzeug war mit einem Photometer ausgestattet, um die vom Verkehrszeichen zurückreflektierte Beleuchtungsstärke zu messen. Im Fahrzeug befanden sich Probanden, die gebeten wurden, mit einer konstanten Geschwindigkeit zu fahren und einen „Identifikations-Knopf“ zu drücken, sobald die einzelnen Verkehrszeichen lesbar waren. Um zu garantieren, dass sich die Probanden nicht an die Aufschrift der Verkehrszeichen gewöhnen, wurden diese in randomisierter Reihenfolge getauscht. Somit wurde das gelb-schwarze Ortsschild sowie das blau-weiße Richtungsschild von „Darmstadt“ auf „Dortmund“ gewechselt und das Geschwindigkeitsschild von 60 auf 50. Nachdem die Probanden an den Verkehrszeichen vorbeigefahren waren, wurde die psychologische Blendung auf einer binären Skala (ja/nein) sowie die Helligkeit des Verkehrsschildes bewertet. Auf die Verwendung einer 9 stufigen Skala, wie beispielsweise die de Boer Skala wurde bewusst verzichtet, um die Probanden nicht noch zusätzlich zu überfordern. Untersuchungen von

THEEUWES und ALFERDINCK [75] haben nämlich gezeigt, dass die Schwierigkeit der Aufgabe einen maßgeblichen Einfluss auf die Blendungsbewertung hat. Bei jedem Durchlauf wurden die GPS-Daten jedes Verkehrszeichens sowie des Versuchsfahrzeugs gespeichert. Die Software im Versuchsfahrzeug synchronisierte dabei die „Identifikations-Knopf“ Daten mit den GPS Daten. Hierdurch war es möglich, den exakten Abstand von Versuchsfahrzeug zu den Verkehrszeichen, zum „Lesbarkeits-Zeitpunkt“ ermitteln zu können. Zusätzlich zu den GPS- und Photometer-Daten, wurde für jede der sechs Fernlichtintensitäten, sowie für jedes Verkehrszeichen, Leuchtdichteaufnahmen gemacht, um die Leuchtdichte mit der Lesbarkeit verknüpfen zu können.

Jeder Durchlauf wurde dreimal wiederholt, um die Daten statistisch auswerten zu können. Insgesamt wurden 21 Probanden untersucht, mit einem mittlerem Alter von 30 Jahren, wobei der jüngste 22 und der älteste Proband 53 war. Ein Histogramm mit dem Alter der Probanden ist im Anhang zu sehen (vgl. *Abbildung A-10*).

5.3 Ergebnisse

Dieses Kapitel gibt einen Überblick der Ergebnisse, die in diesem Feldtest erzeugt wurden. Sie sind unterteilt in Wahrnehmungs- und photometrische Ergebnisse. Am Ende dieses Kapitels folgt ein Fazit, bei dem die Ergebnisse zusammengefasst und interpretiert werden.

5.3.1 Wahrnehmungsergebnisse

In *Abbildung 5-4* ist die normierte Blendungswahrscheinlichkeit alle Verkehrszeichen in Abhängigkeit der untersuchten Fernlichtintensitäten (PWM-Dimmwerte bzw. in den folgenden Abbildungen als „FLI“ abgekürzt) zu erkennen. Eine Blendungswahrscheinlichkeit von „1“ bedeutet, dass sich alle Probanden bei allen Durchläufen geblendet gefühlt haben. Die Fehlerbalken geben die einfache Standardabweichung wieder.

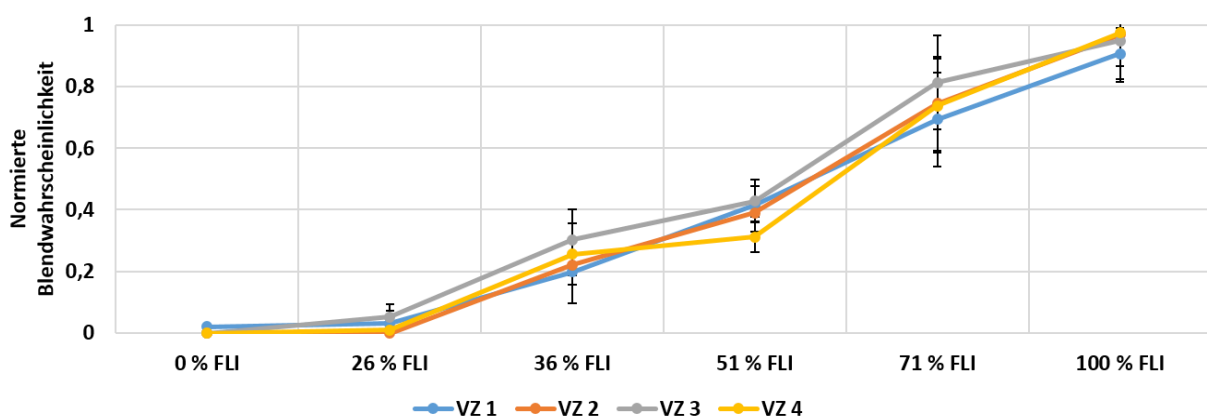


Abbildung 5-4: Normierte Blendwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Fernlichtintensitäten (FLI) für alle untersuchten Verkehrszeichen nach [118]

Aus der gezeigten Abbildung ist eine Korrelation zwischen der Blendungswahrscheinlichkeit und der Fernlichtintensität (in den folgenden Abbildungen als „FLI“ abgekürzt) zu erkennen. Diese

zeigt, dass mit steigender Fernlichtintensität, die Blendungswahrscheinlichkeit bei allen untersuchten Verkehrszeichen steigt. Bei Abblendlicht, fühlt sich bei allen vier Verkehrszeichen kein Proband geblendet, wohingegen bei voll aktiviertem Fernlicht (100 % FLI), die meisten Probanden eine Blendung empfinden. Auffällig ist, dass der Verlauf der Blendungswahrscheinlichkeit bei allen Verkehrszeichen einen ähnlichen Verlauf aufweist. Eine durchgeführte Signifikanzanalyse mit dem t-Test bestätigt diese Aussage, wodurch entgegen der Angaben der Literatur, kein Einfluss der Größe und der Farbgebung auf die Blendung ermittelt werden konnte.

Zusätzlich zur Blendungsbewertung wurden die Probanden gebeten, die Helligkeit jedes Verkehrszeichens auf einer Skala von „1“ bis „5“ zu bewerten, wobei „1“ einen Wert für zu dunkel, „5“ einen Wert für zu hell und „3“ eine optimale Helligkeit darstellt. *Abbildung 5-5* zeigt die Helligkeitsbewertung für alle Probanden in Abhängigkeit der unterschiedlichen Fernlichtintensitäten. Die Fehlerbalken geben die einfache Standardabweichung wieder.

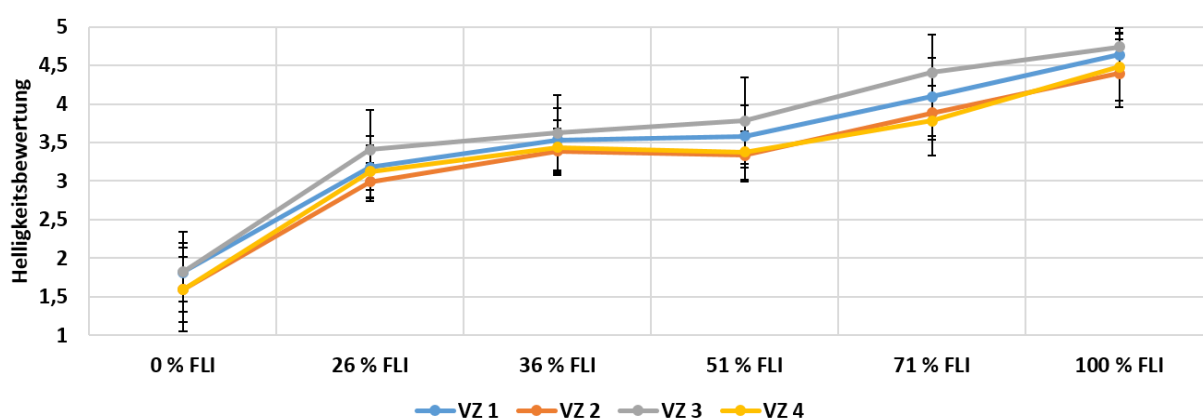


Abbildung 5-5: Helligkeitsbewertung in Abhängigkeit der Fernlichtintensitäten (FLI) für alle untersuchten Verkehrszeichen, 1: zu dunkel, 3: optimal und 5: zu hell nach [118]

In der gezeigten Abbildung wird ein Zusammenhang zwischen der Helligkeit und der Fernlichtintensität gezeigt. Bei steigender Fernlichtintensität erscheint das Verkehrszeichen immer heller und erreicht eine maximale Helligkeitsbewertung bei voll aktiviertem Fernlicht (100 % FLI). Bei einer Unterteilung der Helligkeitsbewertungen h in drei Teile – zu dunkel ($h < 2,5$), optimal ($2,5 < h < 3,5$) und zu hell ($h > 3,5$) fällt auf, dass mit Abblendlicht (0 % FLI), alle untersuchten Verkehrszeichen als zu dunkel eingestuft werden. Eine optimale Helligkeitsbewertung ergibt sich bei einer Fernlichtintensität zwischen 26 % und 36 %. Unter Berücksichtigung der in *Abbildung 5-4* gezeigten Blendwahrscheinlichkeit ergibt sich bei einer Fernlichtintensität von 36 % eine mittlere Blendwahrscheinlichkeit von etwa 20 %. Bei einer Fernlichtintensität von 26 % dagegen sinkt die Blendwahrscheinlichkeit auf einen Wert unter 5 %.

5.3.2 Photometrische Ergebnisse

Auf Grund der interpersonellen Unterschiede bei der visuellen Wahrnehmung wurden die absoluten Lesbarkeitsabstände der fünf Fernlichtintensitäten mit den entsprechenden Abblendlichtwer-

ten verglichen. *Abbildung 5-6* zeigt die prozentuelle Anzahl der Probanden, die mit den fünf Fernlichtintensitäten eine erhöhte Lesbarkeitsentfernung erzielen, als mit Abblendlicht. Dargestellt werden alle vier untersuchten Verkehrszeichen in Abhängigkeit der fünf Fernlichtintensitäten.

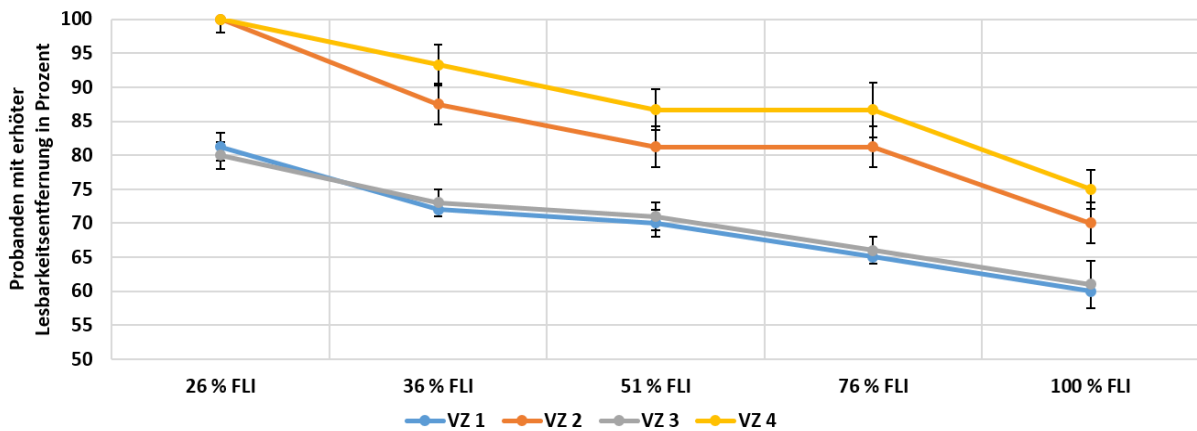


Abbildung 5-6: Vergleich der Lesbarkeitsentfernungen in Bezug zu Abblendlicht für die untersuchten Fernlichtintensitäten (FLI) nach [96]

In *Abbildung 5-6* ist die relative Anzahl von Probanden dargestellt, die mit Fernlicht, das Verkehrszeichen früher erkennen können als mit Abblendlicht. Mit steigender Fernlichtintensität, sind immer weniger Probanden in der Lage, das Verkehrszeichen früher zu erkennen, als mit Abblendlicht. Bei einer Fernlichtintensität von 26 % ist bei allen Verkehrszeichen die maximale Anzahl an Probanden zu erkennen. Bei den beiden Geschwindigkeitsschildern (VZ 1 und VZ 3) ist kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Probanden mit gesteigerter Lesbarkeitsentfernung erkennbar, obwohl sich die Schilder an unterschiedlichen Positionen befinden. Beim Richtungsschild (VZ 2) und Ortsschild (VZ 4) sind ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zueinander erkennbar, weshalb die vier untersuchten Verkehrszeichen in zwei Gruppen unterteilt werden können – Gruppe 1 Geschwindigkeitsschilder und Gruppe 2 Richtungs- und Ortsschild. Die Signifikanzanalyse wurde mit dem t-Test durchgeführt. Bei einem direkten Vergleich der beiden Gruppen sind Unterschiede erkennbar, die sich in einer um etwa 20 % gesteigerten Probandenanzahl bei Gruppe 2 äußert. Um eine mögliche Erklärung für die Unterschiede zu finden, wird in *Abbildung 5-7* exemplarisch der Beleuchtungsstärkeverlauf der unterschiedlichen Fernlichtintensitäten am Verkehrszeichen 1 gezeigt.

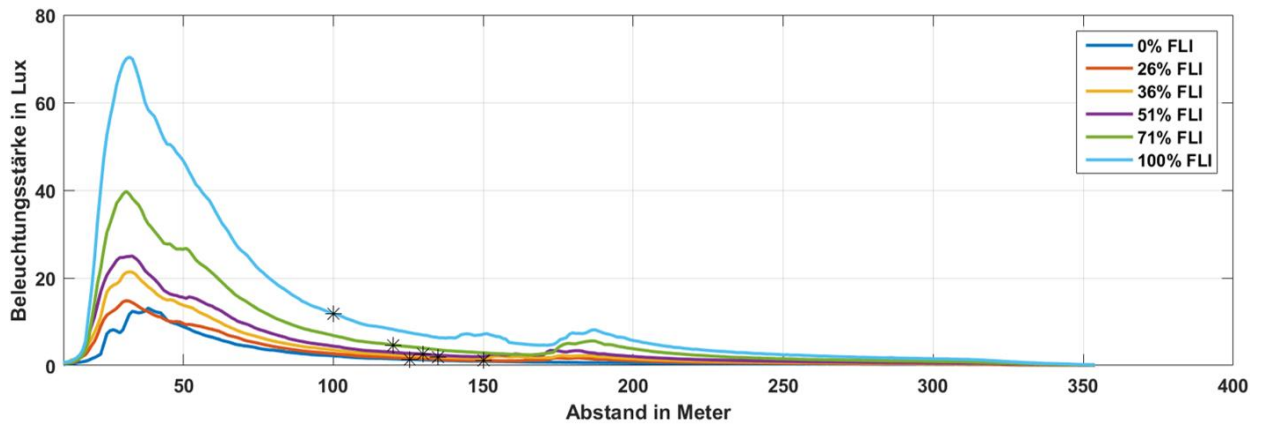


Abbildung 5-7: Exemplarischer Verlauf der Beleuchtungsstärke am Verkehrszeichen 1 in Abhängigkeit des Abstandes für alle Fernlichtintensitäten (FLI). Die Kreuze geben die Lesbarkeitsabstände wieder

In *Abbildung 5-7* sind die unterschiedlichen Fernlichtintensitäten in einer durchgezogenen Linie zu erkennen, wohingegen die jeweiligen mittleren Lesbarkeitsabstände mit einem schwarzen Kreuz gekennzeichnet sind. Wie zu erwarten, steigt mit zunehmender Fernlichtintensität auch die Beleuchtungsstärke am Verkehrszeichen, allerdings ist ebenfalls ein geringer werdender Lesbarkeitsabstand zu beobachten. Gleichermaßen weisen die ermittelten Lesbarkeitsabstände bei den verschiedenen Fernlichtintensitäten, unterschiedliche Beleuchtungsstärken auf. In *Abbildung 5-8* sind die mittleren Lesbarkeitsabstände in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke an allen vier untersuchten Verkehrszeichen dargestellt.

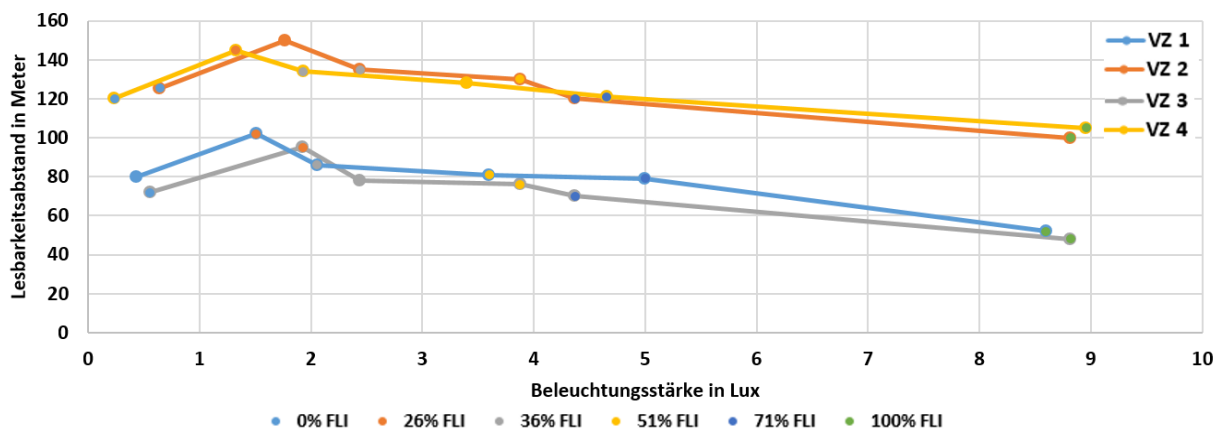


Abbildung 5-8: Lesbarkeitsabstand in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke und der Fernlichtintensität bei allen untersuchten Verkehrszeichen nach [107]

In *Abbildung 5-8* sind für die einzelnen Fernlichtintensitäten (Punkte), die Lesbarkeitsabstände in Abhängigkeit der am Verkehrszeichen herrschenden Beleuchtungsstärke aufgetragen. Die durchgezogenen Linien zeigen die Zugehörigkeit zu den einzelnen Verkehrszeichen. Es fällt auf, dass bei allen Verkehrszeichen, mit steigender Fernlichtintensität, der Lesbarkeitsabstand geringer wird und die Beleuchtungsstärke steigt. Die steigende Beleuchtungsstärke beim Lesen des Verkehrszeichens kann durch die Überstrahlung des Verkehrszeichens begründet werden, wodurch die Lesbarkeit erschwert wird (vgl. *Abbildung 5-5*). Die vier gezeigten Verkehrszeichen können auch hier

in zwei Gruppen zusammengefasst werden, die sich im Wesentlichen in ihrem Maximum unterscheiden. Bei Gruppe 1 (Geschwindigkeitsschilder) liegt das Maximum bei etwa 100 m und bei Gruppe 2 (Richtungs- und Ortsschild) bei etwa 150 m. Nach Berücksichtigung der Größe und Lesbarkeitsentfernung ergibt sich für alle Verkehrszeichen ein Sehwinkel von etwa $0,4^\circ$. Demzufolge sind die Unterschiede einzig auf die Größe der untersuchten Verkehrszeichen zurückzuführen. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Lesbarkeitsabstände ergibt sich bei einer Fernlichtintensität von 26 % eine mittlere Leuchtdichte von 170 cd/m^2 ($\pm 2,9 \%$) bei allen Verkehrszeichen.

5.3.3 Fazit

Der beschriebene Feldtest hatte das Ziel, eine optimale Helligkeit zu finden, mit der ein Verkehrszeichen angeleuchtet werden sollte, um einerseits den Fahrer nicht zu blenden und andererseits den Lesbarkeitsabstand zu maximieren. Hierzu wurden auf einem Rundkurs zwei Geschwindigkeits- und jeweils ein Orts- und Richtungsschild an unterschiedlichen Positionen aufgestellt. Das Versuchsfahrzeug war mit einstellbarem bzw. dimmbarem Fernlicht ausgestattet, indem die Probanden auf die Verkehrszeichen zufuhren. Sobald die Aufschrift lesbar war, wurde ein Knopf gedrückt und der Lesbarkeitsabstand gespeichert. Zusätzlich wurde die psychologische Blendung, der Helligkeitseindruck, die Beleuchtungsstärke sowie die Leuchtdichte der Verkehrszeichen aufgezeichnet. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Verkehrszeichen mit Abblendlicht als zu dunkel und mit voll aktiviertem Fernlicht als zu hell erscheinen. Eine optimale Helligkeitsbewertung ergibt sich bei einer Fernlichtintensität von 26 %, bei der auch die Blendwahrscheinlichkeit unter 5 % liegt. Bei dieser Fernlichtintensität sind die meisten untersuchten Probanden in der Lage, die dargestellten Verkehrszeichen früher als mit Abblendlicht zu erkennen, wobei der Lesbarkeitsgewinn im Mittel etwa 25 m beträgt. Obwohl die Verkehrszeichen unterschiedliche Farbkontraste und an unterschiedlichen Positionen aufgestellt sind, werden ähnliche Leuchtdichten zum Zeitpunkt des Erkennens bzw. Lesens gemessen. Unterschiede, die auf die Positionierung zurückzuführen sind, konnten in dem vorliegenden Feldtest nicht bestätigt werden. Die Verkehrszeichen befinden sich, ausgehend vom Lesbarkeitsabstand, in einem peripheren Winkelbereich zwischen 0° (VZ frontal) und 2° (VZ seitlich) und werden somit vom Hauptlichtbündel des Fernlichtes angeleuchtet. Als optimale Leuchtdichte wird im vorliegendem Feldtest ein Wert von 170 cd/m^2 ermittelt. Ebenfalls werden die Verkehrszeichen stets bei einem Sehwinkel von $0,4^\circ$ erkannt bzw. gelesen.

5.4 Abgeleitete Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse mit den in Kapitel 5.1 gezeigten Literatur Ergebnissen verglichen. Im Anschluss folgen weiterführende Ergebnisse, die aus den Korrelationen der Erkenntnisse dieses Feldtests stammen.

5.4.1 Vergleich mit Ergebnissen der Literatur

Die Ergebnisse der Probandenstudie zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Blendung von der Fernlichtintensität mit der das Verkehrszeichen angeleuchtet wird. Es wurde für alle untersuchten

Verkehrszeichen eine steigende Blendung mit zunehmender Fernlichtintensität ermittelt. Eine steigende Fernlichtintensität steigert sowohl die Blendbeleuchtungsstärke als auch die Beleuchtungsstärke am Verkehrszeichen. Ähnliche Ergebnisse liefern die Arbeiten von FRANK [120] und SCHREIER [125], die eine steigende Störbewertung mit zunehmender Leuchtdichte ermittelten. SCHREIER [125] fand zudem, dass unabhängig von der Farbe der Verkehrszeichen, die Testpersonen „umso sensitiver reagieren, je größer das Verkehrszeichen ist.“ Er folgert daraus, dass „größer wahrgenommene Schilder, bei gleicher Leuchtdichte eine stärkere Blendung verursachen.“ Die Ergebnisse von AULBACH [119] reihen sich ebenfalls ohne Widerspruch in die Ergebnisse aus diesem Experiment ein. AULBACH [119] ermittelte eine Schwellenleuchtdichte von 200 cd/m², ab der eine „Formenerkennbarkeit verschiedener Testzeichen“ nicht mehr möglich ist, da diese überstrahlen. Einen Schwellwert im Bereich von 100 cd/m² bis 300 cd/m² ermittelte auch SCHREIER [125], weshalb die in diesem Test ermittelte optimale Leuchtdichte von 170 cd/m² die Ergebnisse bestätigt.

Die Farbe und die Position der Verkehrszeichen hatten im Rahmen dieses Feldtests keinen Einfluss auf die Blendung. Auf ein gleiches Ergebnis ist auch SCHREIER [125] in seiner Untersuchung gekommen. Dies wird am Vergleich der Blendwahrscheinlichkeiten und Helligkeitsbewertungen in *Abbildung 5-4* und *Abbildung 5-5* deutlich. Bei einem Vergleich der Mindestanforderungen an die spezifischen Rückstrahlwerte aus der Norm kann festgestellt werden, dass bei gleichem Folientyp, Anleuchtungswinkel und Beobachtungswinkel, die Anforderungen an weiße Verkehrszeichen stets höher sind als die Anforderungen für farbige (z.B. blau, gelb) [123].

Neben JÜRGENS [122] bewertete auch SCHREIER [125] die Blendung von Verkehrszeichen anhand der Blendbeleuchtungsstärke und stellte einen Grenzwert in Abhängigkeit der Beobachtungsentfernung auf, der auf einer Simulation der Labordaten beruht. Hierbei wurde für einen Abstand von 100 m ein Grenzwert zwischen 1 lx und 3 lx ermittelt, abhängig davon ob die Verkehrszeichen als „gerade akzeptabel“ oder in einer Zwischenstufe zu „deutlich störend“ bewertet wurden. Aus dem Verlauf der Beleuchtungsstärke in *Abbildung 5-7* ergibt sich für einen Abstand von 100 m und einer Fernlichtintensität von 26 % eine Beleuchtungsstärke von etwa 2,5 lx. Bei einer Fernlichtintensität von 36 % steigt die Beleuchtungsstärke auf einen Wert von 3,5 lx wodurch der nach SCHREIER [125] ermittelte Grenzwert überschritten wird. Dies bestätigt eine optimale Abdunkelung von 26 %, zumal weder in diesem Feldtest, noch bei dem Labortest von SCHREIER [125], eine Verschmutzung bzw. Alterung der Verkehrszeichen mitberücksichtigt wurden. FRANK [120] ermittelte nämlich, dass 50 % der Verkehrsschilder älter als acht Jahre sind und somit aufgrund der Verschmutzung einen geringeren Rückstrahlwert besitzen. Ein geringerer Rückstrahlwert bedeutet eine geringere Blendbeleuchtungsstärke und somit geringere Blendung. Die hier vorgestellten Werte entsprechen demnach einer worst-case Betrachtung hinsichtlich Blendung.

Auch die Umgebungsleuchtdichte und andere Blendquellen durch entgegenkommende Fahrzeuge, beeinflussen die Blendung von den Verkehrszeichen. Dies wurde von FRANK [120] belegt, allerdings in diesem Versuch nicht explizit untersucht.

5.4.2 Weiterführende Ergebnisse

Im Folgenden wird aus der ermittelten optimalen Leuchtdichte, exemplarisch für Verkehrszeichen 1, die Lichtstärke des Scheinwerfers bestimmt. Hierfür werden der Anleuchtungswinkel α und der

Betrachtungswinkel β beim Lesbarkeitsabstand von 100 m anhand *Abbildung A-1* bestimmt, aus denen der Rückstrahlwert abgeleitet wird. Unter der Annahme, dass die Scheinwerferanbauhöhe 60 cm und die Fahreraugenposition 1,25 m beträgt, ergibt sich ein Anleuchtungswinkel α von etwa $0,4^\circ$. Der Betrachtungswinkel β von etwa $1,1^\circ$ ergibt sich durch den Lesbarkeitsabstand von 100 m und einer Verkehrszeichenhöhe von 2,5 m. Anhand *Tabelle 2-1* ergibt sich ein minimaler Rückstrahlwert von $300 \text{ cd/lx}\cdot\text{m}^2$, wodurch über das photometrische Entfernungsgesetz nach Gleichung (4-5) und nach (5-1) die Lichtstärke I des Scheinwerfers berechnet werden kann, mit der das Verkehrszeichen angeleuchtet wird.

$$\text{Rückstrahlwert } RA: \quad RA = \frac{L}{E} \quad (5-1)$$

Aus den Berechnungen ergibt sich eine Lichtstärke $I_{berechnet}$ von etwa 5700 cd, die im Anschluss mit der realen Lichtstärke I_{real} der LVK des Scheinwerfers (26 % Abdunkelung) unter den gegebenen Winkeln verglichen werden kann. I_{real} besteht aus der Addition der Lichtstärke des linken (3000 cd) und rechten (3300 cd) Scheinwerfers und weist eine Abweichung zu $I_{berechnet}$ von 600 cd bzw. 9 % auf. Diese Abweichung zwischen berechneten und realen Werten könnte durch die angenommenen Geometrien, bzw. durch Streulicht von beispielsweise Reflexionen der Fahrbahn resultieren.

Eine Bewertung der Blendung über die Beleuchtungsstärke E am Auge scheint in Hinblick auf die Untersuchungen von JÜRGENS und LACHMAYER [122] sinnvoll. Hierzu bedarf es allerdings eines Messsystems, welches die Blendbeleuchtungsstärke des Fahrers erfasst. Moderne blendfreie Fernlichtsysteme besitzen allerdings eine Kamera, mit der auch das Verkehrszeichen erkannt wird. Über die Kameradaten und die ermittelten Winkel des Verkehrszeichens kann eine dynamische Anleuchtung erfolgen, bei der das Verkehrszeichen mit der ermittelten optimalen Verkehrszeichenleuchtdichte angestrahlt wird. Da sich das Fahrzeug dynamisch dem Verkehrszeichen nähert und es somit immer größer erscheint, sollte auch die Anleuchtung des Verkehrszeichens dynamisch angepasst werden, um für jeden Abstand die optimale Leuchtdichte zu ermöglichen. Zur Berechnung der optimalen und gleichzeitig dynamischen Verkehrszeichenleuchtdichte werden die Beleuchtungsstärkeverläufe $E_{gemessen}$ aller Fernlichtintensitäten an den Verkehrszeichen verwendet und für jeden Abstand mit der optimalen Leuchtdichte verglichen. Angefangen wird beim größten Abstand, wobei $E_{gemessen}$ bei der höchsten Fernlichtintensität mit der zuvor nach (4-2) in Beleuchtungsstärke umgerechneten optimalen Leuchtdichte $E_{optimal}$ verglichen wird. Für den Fall, dass $E_{optimal}$ geringer ist als $E_{gemessen}$, wird die Fernlichtintensität reduziert. Dieser Vorgang wiederholt sich für jeden Abstand, wodurch sich die dynamische Fernlichtintensität ergibt. In *Abbildung 5-9* ist der dynamische Verlauf der Fernlichtintensität abgebildet.

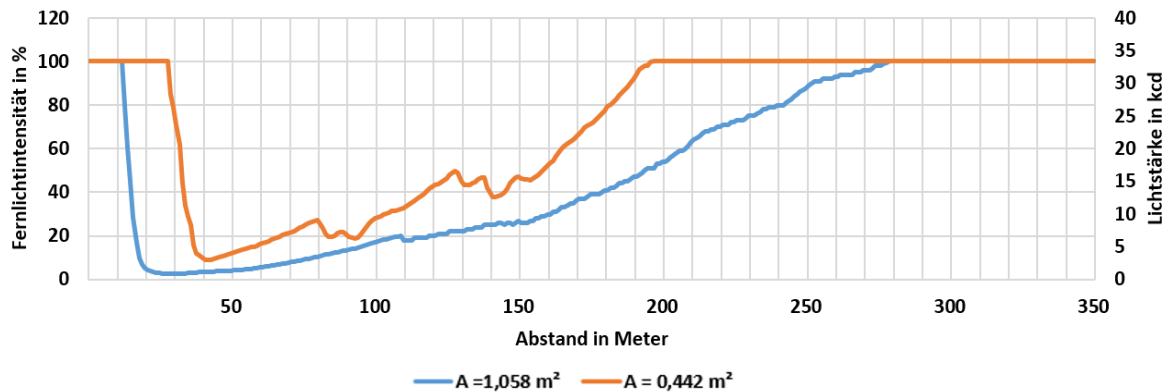


Abbildung 5-9: Optimale, dynamische Fernlichtintensität zum Anleuchten eines Verkehrszeichens in Abhängigkeit vom Abstand und Fläche des Verkehrszeichens. Die rechten Ordinate gibt die Lichtstärke eines Scheinwerfers an, mit der das Verkehrszeichen angeleuchtet wird. Nach [126]

In der Abbildung ist die dynamische optimale Fernlichtintensität für beide untersuchten Verkehrszeichengrößen zu erkennen. Diese basiert auf den Erkenntnissen des Feldtests und sorgt für eine optimale Helligkeit des Verkehrszeichens, wodurch der Lesbarkeitsabstand maximiert wird und verursacht gleichzeitig eine minimale Blendung. Da die Orts- und Richtungsschilder eine größere Fläche aufweisen als die Geschwindigkeitsschilder, erfolgt eine Reduzierung der Fernlichtintensität etwa 85 m früher. Beide Verkehrszeichengrößen müssen bei der jeweiligen Entfernung, mit einer Auflösung von $0,1^\circ$ erfasst werden. Beim Heranfahren an das Verkehrszeichen verringert sich die Fernlichtintensität stetig, bis zum Erreichen des Lesbarkeitsabstandes d der Geschwindigkeitsschilder ($d = 98,5$ m und $A = 0,442$ m²) bzw. der Orts- und Richtungsschilder ($d = 147,5$ m und $A = 1,058$ m²), bei dem die Verkehrszeichen mit einer Fernlichtintensität von 26 % angeleuchtet werden. Im weiteren Verlauf verringert sich die Fernlichtintensität zusätzlich wegen des photometrischen Entfernungsgesetzes bis zum Erreichen des globalen Minimums, das primär von der Fernlichtverteilung und der Fläche des Verkehrszeichens definiert wird. Die Lichtstärke auf der rechten Ordinate, bezieht sich auf Werte eines Scheinwerfers, mit der das Verkehrszeichen angeleuchtet wird, wobei das Maximum von 35000 cd Scheinwerfer-bedingt ist.

6 Einfluss nasser Fahrbahnen auf die Blendung und Detektion

Bei einer Umfrage gaben 63 % der Befragten an, sich nachts beim Autofahren davor zu fürchten, geblendet zu werden [15]. Hierbei zeigt sich, dass mit 72,3 % die meisten Teilnehmer den Witterungstyp „Regen und nasse Fahrbahn“ am ehesten mit Blendung in Verbindung setzen [15]. Je nach Nässegrad verändern sich nämlich die Reflexionseigenschaften der Straßenoberfläche wodurch hohe Vorwärtsreflexionen sowie Absorptionen auftreten, die andere Verkehrsteilnehmer blenden können und für dunkel wirkende Straßen sorgen.



Abbildung 6-1: Blendung durch Reflexionen auf einer nassen Fahrbahn

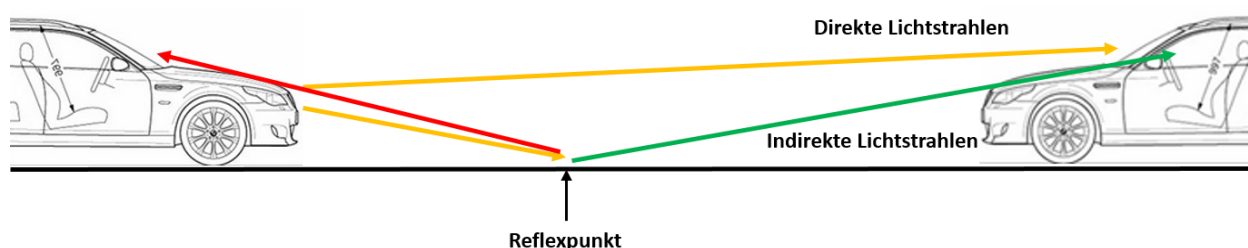
Wie aus *Abbildung 6-1* zu sehen ist, entstehen durch Reflexionen an der nassen Fahrbahn sogenannte „Blendkeulen“, die zur Blendung führen. Um dem entgegenzuwirken reduzieren erste Fahrzeughersteller deshalb unter anderem bei nassen Straßenverhältnissen die Helligkeit des Abblendlichtes im Vorfeldbereich des Fahrzeuges. Das nachfolgende Kapitel beschreibt den durchgeführten dynamischen Feldtest, indem bei nasser Fahrbahn die Sichtbarkeit und die Blendung eines entgegenkommenden Fahrzeuges untersucht werden.

6.1 Stand der Forschung

Im Folgenden wird auf einige Untersuchungen eingegangen, die sich mit dem Einfluss einer nassen Fahrbahn auf die Blendung und Detektion beschäftigen. Die aufgeführten Untersuchungen sind chronologisch geordnet.

KREBS und BÖLLINGER [127] untersuchten bereits im Jahre 1981 den Einfluss einer nassen Fahrbahn bei nächtlichen Autofahrten. Sie stellten fest, dass sich die gerichtete Reflexion erhöht, wodurch das Erscheinungsbild eines entgegenkommenden Fahrzeuges in Abhängigkeit des Nässegrades verändert. Je nasser die Fahrbahn ist, desto mehr verschmälert sich die Vorfeldausleuchtung des entgegenkommenden Fahrzeuges und es bilden sich längliche „Blendkeulen“. [127]

DAMASKY [44] befasste sich im Rahmen der lichttechnischen Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfern mit dem Einfluss von geänderten Reflexionseigenschaften von Fahrbahnen. Basierend auf umfangreichen physiologischen Versuchen, die unter Laborbedingungen und in Realsituationen durchgeführt wurden, hat DAMASKY [44] einen Vorschlag für eine Schlechtwetterlichtverteilung erarbeitet. Von Interesse sind hier die Ergebnisse, die für nasse Witterungsverhältnisse erarbeitet wurden. Zur Evaluierung des Einflusses einer nassen Fahrbahn wurden Laborversuche durchgeführt, mit denen die Vorwärtsreflexionen einer nassen Straßenprobe für verschiedene Begegnungssituationen ermittelt wurden. In *Abbildung 6-2* ist eine schematische Darstellung gezeigt, in der die Begriffe Vorwärts- und Rückwärtsreflexionen sowie direkter und indirekter Lichtstrahl erklärt werden.



*Abbildung 6-2: Schematische Darstellung der direkten und indirekten Lichtstrahlen auf einer nassen Fahrbahn wobei der indirekte Strahl (**grün**) die Vorwärtsreflexion und der **rote** Strahl die Rückwärtsreflexion zeigt.*

Zur Nachbildung verschiedener Entfernungen wurde die Position des verwendeten Diaprojektors und der Leuchtdichtekamera variiert. Die Messung der Vorwärtsreflexionen erfolgte über einen justierbaren Spiegel. Als besonders problematisch erwies sich dabei die Reproduzierbarkeit der Beleuchtungs- und Beobachterposition, sowie die Einhaltung eines konstanten Nässegrades. Aus den Ergebnissen schloss DAMASKY [44], dass bei einer nassen Fahrbahn erhöhte Vorwärtsreflexionen auftauchen, die zu einer erhöhten Blendung führen können. Durch die gleichzeitig verringerte Rückwärtsreflexion, sinkt das Adaptationsniveau des Fahrers, wodurch die Blendung zusätzlich ansteigt. Die resultierende Schlechtwetterlichtverteilung zeichnet sich durch eine reduzierte Beleuchtungsstärke in der Vorfeldbeleuchtung aus, um dadurch die Blendung entgegenkommender Fahrer zu senken. Die Lichtverteilung wurde nach DAMASKY [44] in Zonen eingeteilt, bei der beispielsweise die Vorfeldbeleuchtung eine Beleuchtungsstärke von kleiner 5 lx aufweisen sollte. [44]

ROSENHAHN [51] untersuchte in einer Laboruntersuchung die Reflexionseigenschaften von unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen und bestimmte für unterschiedliche Winkelbedingungen die Vorwärts- und Rückwärtsreflexion. Die Ergebnisse zeigen, dass bei nasser Oberfläche das Maximum der Vorwärtsreflexion nicht gleich des Einfallswinkels, sondern bei einem größeren Winkel zur Fahrbahnoberfläche zu finden ist. Im nassen Zustand verändert sich das Verhältnis zwischen Vorwärts- und Rückwärtsreflexion bei glatten Straßenoberflächen um Faktor drei und bei groben Straßenoberflächen um Faktor zwei. Ähnliche Ergebnisse für trockene und nasse Oberflächen wurden auch von WAMBSGANß ermittelt [128]. Zusätzlich untersuchte ROSENHAHN [51] in einem statischen Feldtest, den Einfluss des Nässegrades auf die Leuchtdichte der Fahrbahnoberfläche. Hierfür wurde eine Fläche von 50 m x 6 m, mit einer mittleren Niederschlagsmenge von 0,3 mm/min bewässert. Die maximale Leuchtdichte wurde 40 Sekunden nach dem „Beregnungsende“ gemessen und liegt bei einem Abstand von 20 m. Dieser Abstand liegt näherungsweise in der Entfernung, an

der die spiegelnde Reflexion wäre. Durch die nicht ideale Form der Wasseroberfläche entsteht unter den Fresnel'schen Reflexionsbedingungen eine „Blendkeule“ auf der Straße. Da durch die Oberflächenneigung der Fahrbahn das Wasser abläuft, ist im Lauf der Zeit ein deutliches Absinken der absoluten Leuchtdichte zu erkennen. Neben der Leuchtdichte wurde auch die Beleuchtungsstärke im Passiervorgang in Abhängigkeit des Straßenzustandes ermittelt. Bei nasser Fahrbahnoberfläche wird eine etwa Faktor sieben höhere Beleuchtungsstärke gemessen als im trockenen Zustand. Bei Nässe dominiert der indirekte Anteil durch die entstehenden „Blendkeulen“, da diese ausschließlich durch Reflexionen an der Fahrbahnoberfläche erzeugt werden. Aus diesem Grund verschiebt sich das Maximum der Beleuchtungsstärke in einen größeren Abstand als bei trockener Straße. [51]

HUHN [37] führte Experimente mit unterschiedlichen Vorfeld-Leuchtdichteverteilungen durch und bewertete die auftretende Beleuchtungsstärke aus Sicht eines entgegenkommenden Fahrzeuges in 50 m Entfernung (vgl. B50L-Punkt). Ähnlich wie bei ROSENHAHN [51] wurden bei nasser Fahrbahn etwa Faktor sieben höhere Beleuchtungsstärken gemessen. HUHN [37] schlussfolgerte, dass „Entgegenkommende Kraftfahrer durch eine Scheinwerferlichtverteilung mit hohem Vorfeldanteil bei Nässe erheblich beeinträchtigt werden, ohne dass der Fahrer einen Vorteil für die eigene Sicht erzielt.“ In einer weiteren Untersuchung beschäftigte sich HUHN [37] mit den Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung, bei der der Einfluss einer nassen Fahrbahn auf die Blendung eines entgegenkommenden Fahrers analysiert wurde. Hierfür wurden Versuche in einem Lichtkanal durchgeführt, der auf eine Länge von 35 m beregnet werden konnte. Für die Versuche wurde eine Regenstärke von $40 \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$ gewählt, die während der Messung fortgesetzt wurde. Ein Vergleich der Messwerte zwischen trockener und nasser Fahrbahn zeigt, dass die Beleuchtungsstärke durch den Einfluss der Nässe um Faktor vier bis fünf höher ausfallen kann. HUHN [37] schlussfolgert, dass die optimale Vorfeldbeleuchtung für eine nasse Fahrbahn von der Leuchtdichte in 10 m vor dem Fahrzeug abhängig ist, weshalb ein neuer Messpunkt 10V, mit entfernungsabhängiger Beleuchtungsstärke, eingeführt werden sollte. Die Beleuchtungsstärke reduziert sich dabei von 10 lx in 200 m, näherungsweise linear bis auf 0 lx bei einer Entfernung von 50 m. [37]

SCHMIDT-CLAUSEN [129] beschäftigte sich mit den Seh- und Wahrnehmungsbedingungen von Kraftfahrern bei nassen Fahrbahnbedingungen. Zur Nachbildung eines nassen Fahrbahnbelags unter Laborbedingungen wurde eine Kunststoffolie auf Straßenproben aufgetragen. In einer darauffolgenden Feldmessung, wurden die Leuchtdichtekoeffizienten für Vorwärts- und Rückwärtsreflexion in Abhängigkeit des Nässegrades bestimmt. Die erzielten Ergebnisse weisen Unterschiede zwischen den vermessenen Straßen von Bundesland zu Bundesland auf, wodurch ein allgemeingültiger Leuchtdichtekoeffizient nicht ermittelt werden konnte. Eine Tendenz konnte allerdings festgestellt werden, bei der der Leuchtdichtekoeffizient für Rückwärtsreflexionen bei nasser Fahrbahnoberfläche insgesamt kleiner wird als bei trockener. Den Messwerten zufolge steigt die Rückwärtsreflexion mit der Entfernung und erreicht bei der maximal untersuchten Entfernung von 50 m näherungsweise den Wert der trockenen Fahrbahn. [129]

HOFFMANN [130] bestätigte die Ergebnisse von SCHMIDT-CLAUSEN [129], dass die Rückwärtsreflexion deutlich abnimmt, wohingegen die Vorwärtsreflexionen bei nasser Fahrbahn deutlich ansteigt. Des Weiteren ist bei konstantem Anleuchtwinkel der Beobachtungswinkel des maximalen Leuchtdichtekoeffizienten im feuchten Zustand größer als im trockenen. Dies bedeutet, dass sich das Maximum mit zunehmender Nässe zum Beobachter hinbewegt, was mit den Ergebnissen von

ROSENHAHN [51] übereinstimmt. Ebenfalls zeigt HOFFMANN [130], dass der Leuchtdichtkoeffizient für Vorwärtsreflexionen zwar bei Nässe viel größer ist als bei Trockenheit, das Verhältnis mit zunehmendem horizontalem Versatzwinkel aber schnell umkehrt. [130]

KÖHLER [131] beschäftigte sich mit der Ermittlung der Leuchtdichtkoeffizienten für Vorwärts- und Rückwärtsreflexion bei trockener und nasser Fahrbahn. Anders als die zuvor erwähnten Arbeiten wurden hier auch kleine Anstrahlungswinkel ausgewertet, die in der Kfz-Beleuchtung auftreten. Ihre Ergebnisse zeigen, dass bei trockener Fahrbahn das Maximum des Leuchtdichtkoeffizienten in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung entweder vor oder nach dem Reflexpunkt liegt. Bei nasser Fahrbahn dagegen befindet sich das Maximum am Reflexpunkt. [131]

FISCHER [132] untersuchte im Rahmen der Entwicklung eines adaptiven Schlechtwetterlichtsystems zur Reduzierung der indirekten Blendung bei nasser Fahrbahn eine Lichtverteilung, die an die Fahr situation angepasste partielle Abdunkelung liefert. Diese basiert auf Kenntnis der aktuellen Vorwärts- und Rückwärtsreflexion, die durch ein eigens dafür entwickeltes Sensorsystem bestimmt wird. Dadurch kann das Blendungsrisiko, sowie der Adaptationszustand des Fahrers geschätzt und die Vorfeldbeleuchtung für ein entgegenkommendes Fahrzeug angepasst werden. Hierbei wird ein Tunnel in der Vorfeldbeleuchtung gebildet, der die vorwärtsreflektierenden Lichtstrahlen der nassen Fahrbahn reduziert und der Position des entgegenkommenden Fahrzeuges folgt. Technisch realisiert wurde der Ansatz durch eine 3° breite Blende, die den relevanten Bereich abdunkelt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Beleuchtungsstärken über den gesamten Begegnungszustand, um über 90 % reduziert werden können und dass die psychologische Blendung signifikant gesenkt werden kann. „Die Adaptation der eigenen Lichtverteilung wird dabei als nicht störend empfunden.“ [132]

KLEINERT [133] beschäftigt sich mit den Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht, das bei nasser Fahrbahn den Passiervorgang vergleichbar blendfrei gestaltet wie bei trockener. Hierzu wurde eine Laboruntersuchung und eine Feldmessung durchgeführt, bei der bestätigt wurde, dass „die indirekte Blendung bei nasser Fahrbahn mindestens genauso stark empfunden wird, wie die direkte.“ Vor allem eine im Reflexpunkt nasse Stelle führt zu einer nahezu vollständig gerichteten Reflexion, wobei die Form und Größe des relevanten Bereichs abhängig von der Scheinwerferanbauhöhe und der Begegnungsentfernung sind. Zur Vorhersage dieses Bereichs wurde ein Geometriemodell entwickelt und im Feldversuch validiert. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den auftretenden Reflexionen bei nasser Fahrbahnoberfläche und der physiologischen und psychologischen Blendung konnte hergeleitet werden. Bei trockener Fahrbahn dagegen sind die direkten Lichtstrahlen maßgeblich für die Blendung des entgegenkommenden Verkehrs verantwortlich. Aus den Ergebnissen folgert KLEINERT [133], dass „Lichtverteilungen mit hoher Intensität im Vorfeld speziell in kurzen Begegnungsdistanzen, hohe Blendungsstärken verursachen.“ Als Lösung wird eine adaptive blendfreie Abblendlichtverteilung vorgeschlagen, die in vier Bereiche eingeteilt ist (vgl. *Abbildung A-12*). Zwei dieser Bereiche dienen der Sichtweite des Fahrers und befinden sich einerseits direkt unterhalb der HDG und an den Rändern der Lichtverteilung. Die anderen beiden Bereiche dienen der Blendungsvermeidung und decken die Vorfeldbeleuchtung, sowie den Bereich, an dem sich ein entgegenkommendes Fahrzeug befinden kann, ab. [133]

In der UNECE Regelung Nr. 123 [124] ist im Rahmen der adaptiven Frontbeleuchtungssysteme eine Schlechtwetterlichtverteilung aufgenommen worden. Es handelt sich hierbei um die Abblendlichtklasse W, die „für die Verwendung unter ungünstigen Bedingungen wie z.B. bei nassen Straßen“ zum Einsatz kommen kann. Als Neuerung werden zwei Segmente eingeführt, die die photometrischen Werte der Vorfeldbeleuchtung der Schlechtwetterlichtverteilung, im Vergleich zu den anderen Abblendlichtklassen, begrenzen soll. Die Lage der beiden Segmente kann aus der Abbildung im Anhang entnommen werden (vgl. *Abbildung A-13*).

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass im nächtlichen Straßenverkehr der Adaptationszustand des Fahrers durch das Leuchtdichteniveau im Gesichtsfeld bestimmt wird. Dieser ist wiederum abhängig von den Reflexionseigenschaften des Fahrbahnbelages, der von den Scheinwerfern des Fahrzeuges beleuchtet wird [51]. Die Reflexionseigenschaften der Straße ändern sich allerdings je nach Nässegrad, wobei der Grund hierfür in der Beschaffenheit der Straßenoberfläche liegt. Durch die Verwendung von Gesteinen weist der Straßenbelag eine sehr raue Struktur auf, die durch große Wassermengen geglättet wird. Als Resultat treten hohe Vorwärtsreflexion sowie geringe Rückwärtsreflexionen auf, die andere Verkehrsteilnehmer blenden können und für dunkel wirkende Straßen sorgen. Erste Fahrzeughersteller reduzieren deshalb bei widrigen Witterungsverhältnissen die Helligkeit des Abblendlichtes im Vorfeldbereich des Fahrzeuges, Anhand der Abblendlichtklasse „W“ der UNECE Regelung Nr. 123 [124]. Allerdings basiert die Helligkeitsreduktion auf Daten, die entweder unter Laborbedingungen oder in statischen Feldversuchen gesammelt worden. Die Unterschiede zu einem dynamischen Feldtest besteht darin, dass der Fahrer zusätzlich zur lichttechnischen Aufgabe auch eine Fahraufgabe zu bewältigen hat und dies eher mit der Realität korreliert. Aus diesem Grund wurde ein dynamischer Feldtest durchgeführt, bei dem sowohl die Blendung als auch die Sichtbarkeit untersucht wurden.

Die überwiegende Anzahl der Studien die nasse mit trockenen Fahrbahnen miteinander vergleichen, beziehen sich auf die Reflexionseigenschaften der Fahrbahndeckschichten. Allerdings kann aus den gezeigten Ergebnissen, kein wirklicher realitätsnaher Zusammenhang zum Thema Blendung andere Verkehrsteilnehmer und Sichtweite des Fahrers gezogen werden. Hier Abhilfe zu schaffen, ist ein Ziel dieses Feldtestes.

6.2 Methodik

Im vorliegenden Feldtest wurde der Ansatz von KLEINERT [133] aufgegriffen, die Vorfeldbeleuchtung bei nasser Fahrbahn zu reduzieren, um dadurch die Blendung eines entgegenkommenden Fahrers auf die Werte einer trockenen Fahrbahn zu senken. Um durch die Reduzierung der Vorfeldbeleuchtung die Verkehrssicherheit nicht zu gefährden, wurde auch die Sichtweite des Fahrers berücksichtigt. Hierbei fuhr ein Proband mit 60 km/h in einem Testfahrzeug mit LED Abblendlicht auf ein stehendes Blendfahrzeug, ebenfalls mit LED Abblendlicht zu, wobei die Abblendlichtbeleuchtung bei beiden Fahrzeugen abgedunkelt werden können. Da es mit den zur Verfügung stehenden Scheinwerfer nicht möglich war, einzelne Regionen der Vorfeldbeleuchtung abzudunkeln, wurde die komplette Abblendlichtverteilung abgedunkelt. Dies geschah im Blendfahrzeug in drei Stufen und im Testfahrzeug in einer Stufe. Die Abdunklungswerte bzw. Intensitäten der Abblendlichtverteilung wurden in einer Voruntersuchung ermittelt und zeigen den prozentuellen Anteil

der Abblendlichtbeleuchtungsstärke im Hot-Spot. Da alle LED, die für die Abblendlichtverteilung zuständig sind, gleichermaßen abgedunkelt werden, wird davon ausgegangen, dass die komplette Lichtverteilung gleichmäßig abgedunkelt wird. Eine Photogoniometer-Messung bestätigt dies und liefert gleichzeitig die exakten Beleuchtungsstärken im Hot-Spot. In *Tabelle 6-1* ist eine Übersicht der Abblendlicht-Intensitäten sowie deren Beleuchtungsstärke im Hot-Spot zu sehen.

Tabelle 6-1: Untersuchte Abblendlicht-Intensitäten und zugehörige Beleuchtungsstärke im Hot-Spot der beiden Fahrzeuge

Abblendlicht-Intensitäten	Testfahrzeug	Blendfahrzeug
100 %	53,76 lx	49,63 lx
75 %	-	37,97 lx
50 %	26,34 lx	25,92 lx
0 %	-	0 lx

Aus technischen Gründen konnten die Intensität der Scheinwerfer im Testfahrzeug lediglich mittels Strombegrenzung reduziert werden, weshalb die 50 % Intensität nicht ganz der mathematischen entspricht. Beim Blendfahrzeug erfolgte die Reduzierung der Intensität durch PWM und es wurde darauf geachtet, die Intensität von 50 % des Testfahrzeuges möglichst genau zu erreichen. Die Fahrt mit ausgeschaltetem Abblendlicht (0 % Intensität) beim Blendfahrzeug dient als Referenzfahrt. In *Abbildung 6-3* sind die LVKs der beiden verwendeten Scheinwerferpaare zu erkennen.

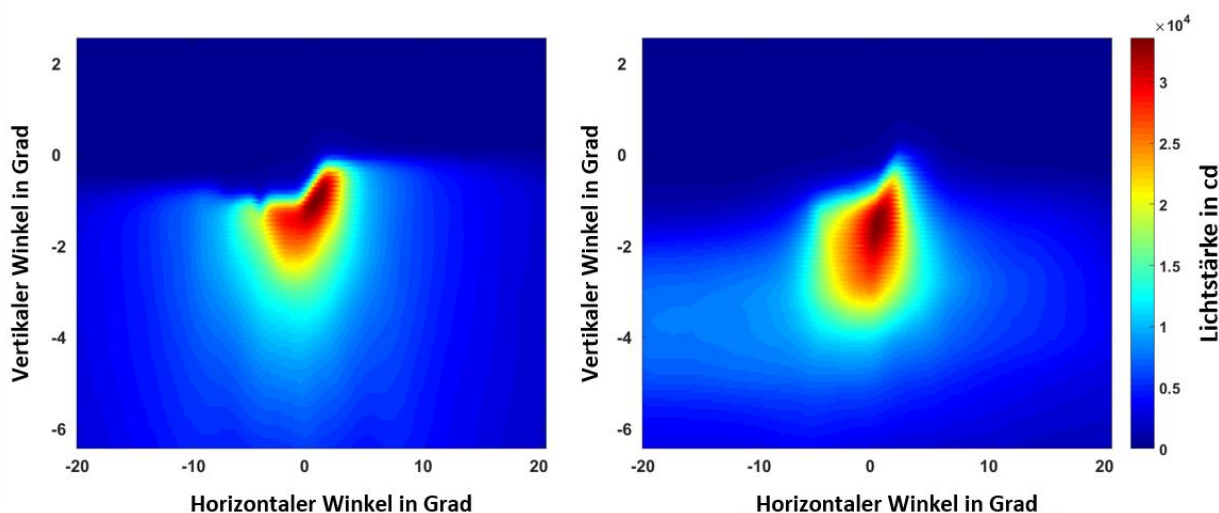


Abbildung 6-3: LVK vom Testfahrzeug (links) und Blendfahrzeug (rechts)

Im B50L Blendungspunkt weisen beide Scheinwerfer eine ähnliche Beleuchtungsstärke von 0,56 lx auf. Anhand der UNECE Regelung Nr. 112 definiert Zone I die Vorfeldbeleuchtung [134]. Diese umfasst einen Bereich von horizontal $\pm 9^\circ$ und vertikal von $-1,72^\circ$ bis -4° . Beim Testfahrzeug hat Zone I einen Mittelwert von 23 lx mit einer Standardabweichung von 3 lx und beim Blendfahrzeug hat Zone I einen Mittelwert von 20 lx und eine Standardabweichung von ebenfalls 3 lx. Durch die Verringerung der Intensität verringern sich die Werte bei beiden Scheinwerfern gleichmäßig.

Sowohl auf der rechten, als auch auf der linken Straßenseite, befanden sich Detektionsobjekte auf Höhe des Blendfahrzeuges, die vom Probanden im Testfahrzeug detektiert werden sollten. Bei jeder Fahrt war lediglich ein Detektionsobjekt in randomisierter Reihenfolge vom Testfahrzeug zu

erkennen, damit kein Lerneffekt bei den Probanden auftritt. Nach jeder Fahrt wurde der Proband gebeten, die psychologische Blendung des Blendfahrzeuges und den Helligkeitseindruck seiner Scheinwerfer auf einer fünf stufigen Skala zu bewerten. Zusätzlich wurde die Beleuchtungsstärke auf Fahreraugenposition, sowie der Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen ermittelt und aufgezeichnet. Sobald alle Fahrten im trockenen erfolgt waren, wurde die Fahrbahn bewässert und die Fahrten auf nasser Fahrbahn wiederholt. Zur Bewässerung wurden zwei 1250 l Behälter auf einem Anhänger geladen, und über eine Pumpe durch Spritzdüsen auf der Fahrbahn verteilt. Bewässert wurden die beiden Spuren vor dem Blendfahrzeug über eine Länge von 100 m mit 2500 l Wasser. Dies entspricht dem doppelten Tages-Niederschlagsdurchschnitt von Deutschland und kann wegen der kurzen Dauer, in der das Wasser auf der Fahrbahn verteilt wird, mit Starkregen verglichen werden [135]. Rein rechnerisch entspricht dies einem gleichmäßig verteiltem Wasserfilm von etwa 3,6 mm, allerdings versickert davon ein Teil im Straßenbelag bzw. wird durch das Testfahrzeug umhergespritzt. Um dem entgegenzuwirken und gleichbleibende Messbedingungen für alle Fahrten zu gewährleisten, wurde nach sechs Fahrten die Fahrbahn erneut mit 1500 l bewässert. Dieser Wert ergab sich nach etlichen Voruntersuchungen und war ein Kompromiss zwischen Versuchslänge und Reproduzierbarkeit. Eine größere Menge an Wasser konnte mit den vorhandenen Mitteln nicht auf der Straße verteilt werden, da das Gewicht der verwendeten Wassermenge, die maximale Achslast des Hängers bzw. maximale Zuglast des Fahrzeuges schon überstieg. In *Abbildung 6-4* ist der schematische Versuchsaufbau zu erkennen.

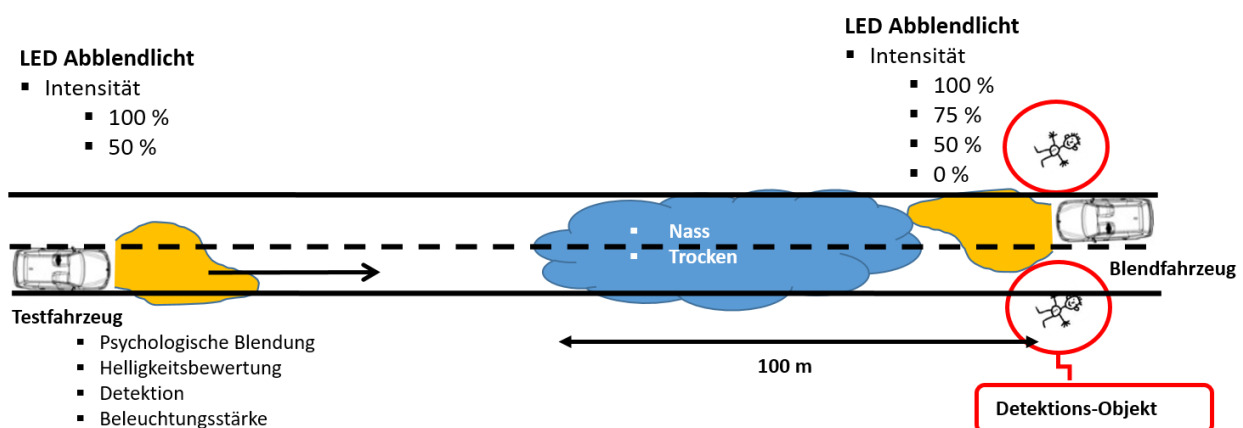


Abbildung 6-4: Schematischer Versuchsaufbau bei dem der Proband im Testfahrzeug sitzt und die Blendung sowie die Detektion der Objekte bei unterschiedlichen Straßenbedingungen und Intensität der Scheinwerfer bewertet. Bewässert wurden beide Spuren vor dem Blendfahrzeug über eine Länge von 100 m

Insgesamt wurden 16 Durchläufe jeweils für trockene und nasse Fahrbahnoberfläche durchgeführt, die aus den zwei bzw. vier Abblendlicht-Intensitäten vom Test- und Blendfahrzeug bestehen. Acht Durchläufe wurden mit dem Detektionsobjekt aus Sicht des Testfahrzeuges auf der rechten Straßenseite und vier auf der linken durchgeführt. Letztere werden nicht ausgewertet, da diese Objekte erst vom Gegenverkehr erfasst werden würden, bevor sie für den Fahrer gefährlich werden könnten. Aus dem Grund gelten diese vier Fahrten lediglich, um einen Lerneffekt der Probanden auszuschließen. Insgesamt haben 19 Probanden an dem Feldtest teilgenommen, die ein mittleres Alter von 28 aufweisen. Ein Histogramm mit der Altersverteilung der Probanden ist im Anhang zu sehen (vgl. *Abbildung A-11*).

6.3 Ergebnisse

Dieses Kapitel gibt einen Überblick der Ergebnisse, die in diesem Feldtest erzeugt wurden. Sie sind unterteilt in Wahrnehmungs- und photometrische Ergebnisse. Am Ende dieses Kapitels folgt ein Fazit, bei dem die Ergebnisse zusammengefasst und analysiert werden.

6.3.1 Wahrnehmungsergebnisse

Die in diesem Feldtest aufgenommenen Wahrnehmungsergebnisse beinhalten die Blendungs- und Helligkeitsbewertungen der Probanden. In *Abbildung 6-5* ist ein Vergleich der medianen Helligkeitsbewertungen zwischen trockener und nasser Fahrbahn dargestellt. Die Helligkeit wurde auf einer fünf stufigen Skala bewertet, bei der „1“ einen Wert für zu dunkel, „5“ einen Wert für zu hell und „3“ eine optimale Helligkeit darstellt. Die exakten Werte können aus *Tabelle A-1* und *Tabelle A-2* entnommen werden.

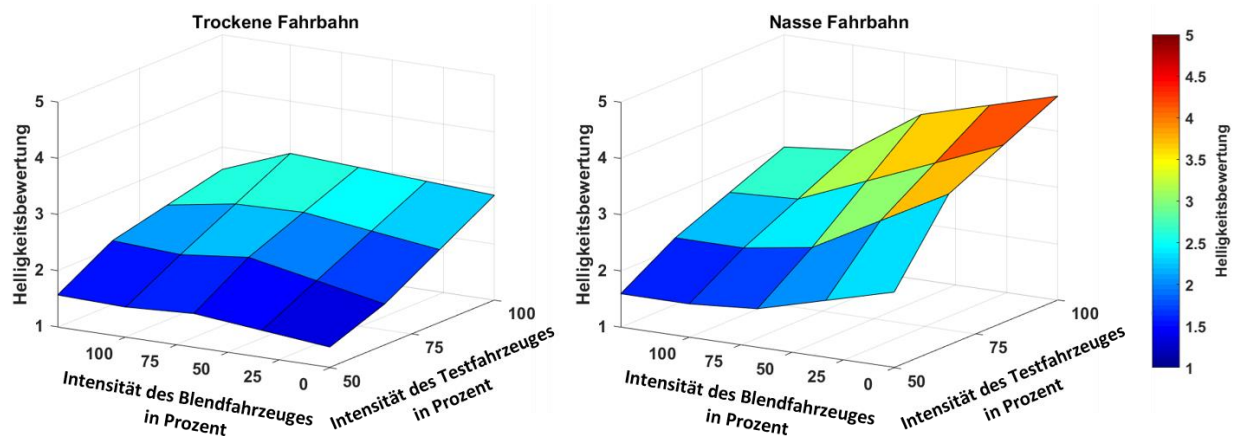


Abbildung 6-5: Helligkeitsbewertungen der Abblendlichtverteilung zwischen trockener (links) und nasser (rechts) Fahrbahn 1: zu dunkel, 3: optimale Helligkeit, 5: zu hell

In der linken Abbildung sind die Helligkeitsbewertungen in Abhängigkeit der Abblendlichtintensität dargestellt. Bei nicht abgedunkelten Scheinwerfer des Testfahrzeuges, wird die Helligkeit mit einem Wert zwischen 2,5 und 3,5 bewertet und ist somit optimal. Je mehr die Intensität verringert wird, desto schlechter wird die Helligkeitsbewertung und die Probanden bewerten das Abblendlicht als zu dunkel. Die Helligkeitsbewertungen sind bei trockenen Straßenbedingungen unabhängig von der Helligkeit der ihnen entgegenkommenden Scheinwerfer des Blendfahrzeuges. Dies ändert sich allerdings bei nasser Fahrbahn, bei der die Helligkeitsbewertung der eigenen Scheinwerfer stark von der Intensität der Scheinwerfer des Blendfahrzeuges abhängig ist. So bewerteten die Probanden beispielsweise die Helligkeit der nicht abgedunkelten Scheinwerfer, zwischen 3 und 4,6. Im Gegensatz zur trockenen Fahrbahn, bei der die optimale Helligkeit bei nicht abgedunkeltem Abblendlicht erreicht wird, wird die optimale Helligkeit bei nasser Fahrbahn in einem Bereich zwischen 75 % und 50 % erreicht, abhängig von der Helligkeit der Scheinwerfer des entgegenkommenden Fahrzeuges.

In *Abbildung 6-6* ist ein Vergleich der inversen de Boer Bewertungen zwischen trockener und nasser Fahrbahn zu erkennen. Eine hohe inverse de Boer Bewertung bedeutet eine hohe Bewertung der psychologischen Blendung. Die Mediane der psychologischen Blendung sind dabei in Abhängigkeit der Scheinwerfer-Intensität der beiden Fahrzeuge aufgetragen. Die exakten Werte können aus *Tabelle A-3* und *Tabelle A-4* entnommen werden.

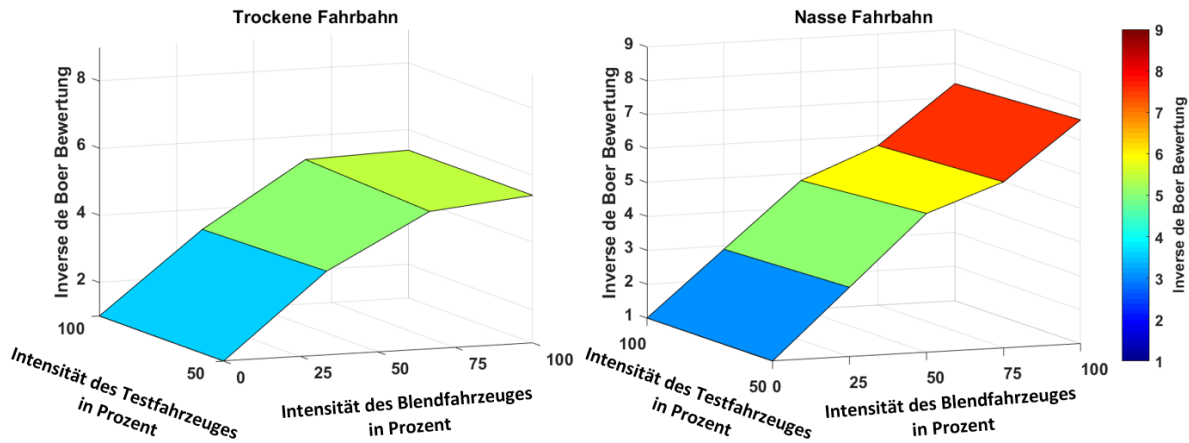


Abbildung 6-6: Inverse de Boer Bewertungen des Blend- und Testfahrzeuges für trockene (links) und nasse (rechts) Fahrbahn

Zu erkennen ist, dass auf trockener Fahrbahn geringere psychologische Blendung auftreten, je mehr die Intensität der Scheinwerfer des Blendfahrzeuges reduziert werden. Bei nicht abgedunkelten Scheinwerfern, wird eine de Boer Bewertung von 5 ermittelt, demzufolge eine Bewertung, die an der Grenze zwischen keiner Blendung und Blendung liegt. Wie zu erwarten, sinkt die psychologische Blendung auf ein Minimum bei ausgeschalteten Scheinwerfer des Blendfahrzeuges. Im Gegensatz zur Helligkeitsbewertung, ist bei der psychologischen Blendung keine Korrelation zwischen der Blendung und der Intensität der Scheinwerfer des Testfahrzeuges zu erkennen. Das gleiche gilt auch für die nasse Fahrbahn, bei der die de Boer Bewertung, nicht mit der Intensität des Testfahrzeuges in Verbindung steht. Die psychologische Blendung ist allerdings abhängig von der Intensität des Blendfahrzeuges, sodass beispielsweise bei nicht abgedunkelten Scheinwerfern des Blendfahrzeuges, einen Wert von 7,6 erreicht wird. Eine Verringerung der Intensität der Scheinwerfer des Blendfahrzeuges führt demzufolge zu einer Reduzierung der psychologischen Blendung. Bei einer Intensität von 50 % können die Werte einer trockenen Fahrbahn erreicht werden. Die Angaben der Literatur können somit bestätigt werden, dass die Vorfeldreflexionen bei nasser Fahrbahn zunehmen und somit der indirekte Anteil des Scheinwerferlichtes dominierend wird.

6.3.2 Photometrische Ergebnisse

Die photometrischen Ergebnisse des vorliegenden Feldtests beinhalten den Beleuchtungsstärkeverlauf auf Fahreraugenposition sowohl im Test- als auch im Blendfahrzeug und die Detektionsabstände. Bevor auf die Ergebnisse im Detail eingegangen wird, wird zunächst die Wiederholbarkeit der einzelnen Durchläufe betrachtet. Jeder der 19 Probanden ist jeweils 12 Durchläufe auf trockene-

ner und nasser Fahrbahn gefahren, die an unterschiedlichen Tagen stattgefunden haben. Um festzustellen, inwieweit die gleichen Bedingungen bei allen Probanden eingehalten worden sind, wird in *Abbildung 6-7* exemplarisch der mittlere Beleuchtungsstärkeverlauf aller Probanden für eine Scheinwerfer-Intensität bei trockener und nasser Fahrbahn dargestellt. Zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit, wird zusätzlich zur mittleren Beleuchtungsstärke, die Standardabweichung auf den Mittelwert hinzuaddiert bzw. subtrahiert dargestellt.

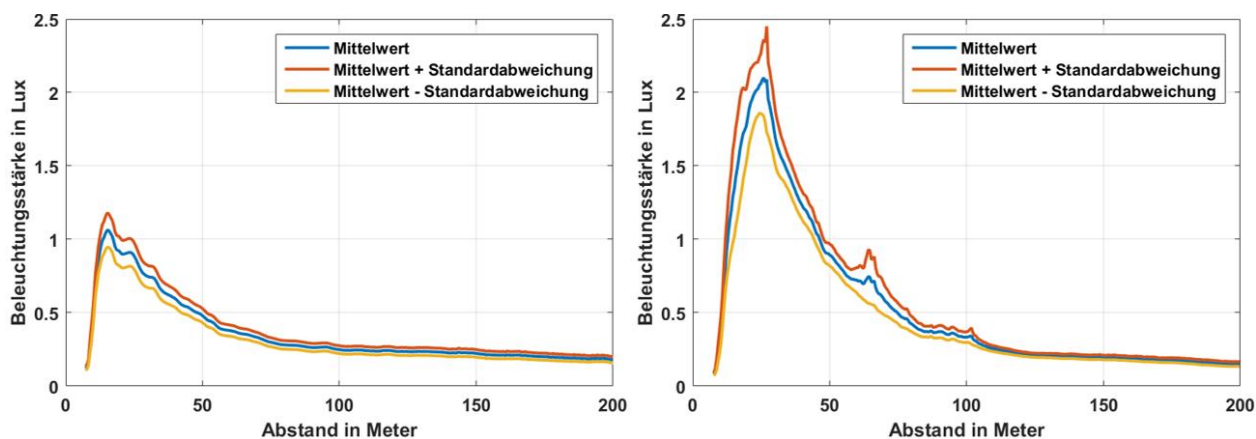
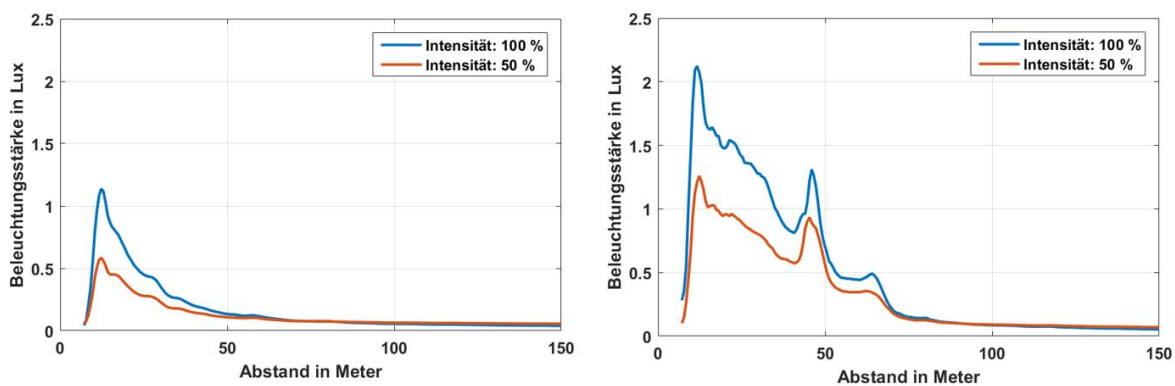


Abbildung 6-7: Exemplarische Darstellung der Beleuchtungsstärkeverläufe im Testfahrzeug bei trockener (links) und nasser (rechts) Fahrbahn in Abhängigkeit des Abstandes zwischen den beiden Fahrzeugen

Bei trockenen Straßenbedingungen beträgt die Standardabweichung im Mittel 0,03 lx und erreicht einen Maximalwert von 0,12 lx bei einem Mittelwert der Beleuchtungsstärke von 1,06 lx. Dies entspricht einer maximalen prozentualen Abweichung bei den 19 Probanden von etwa 10 %. Bei der nassen Fahrbahn beträgt die mittlere Standardabweichung 0,06 lx und im Maximum 0,36 lx, bei einem Mittelwert der Beleuchtungsstärke von 2,1 lx. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von 17 %. Alle untersuchten Verläufe weisen zueinander, anhand des Shapiro-Wilk-Tests eine Normalverteilung auf.

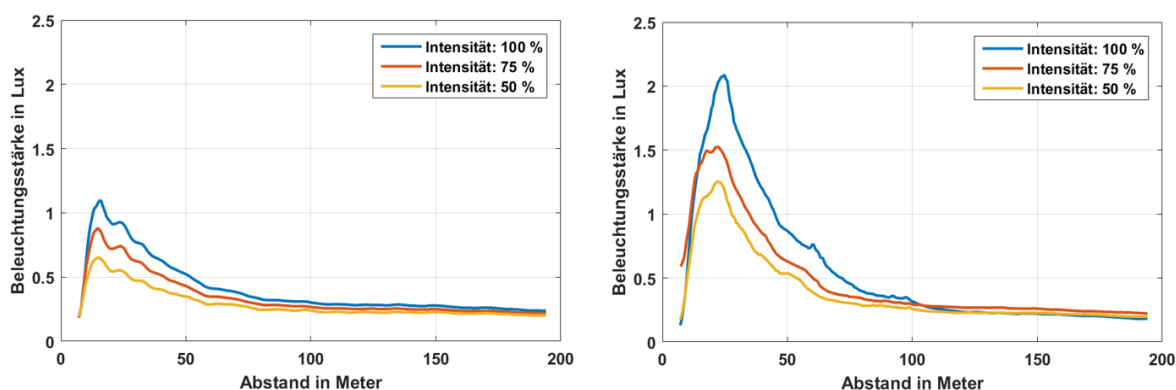
Im Folgenden wird auf die Beleuchtungsstärkeverläufe der beiden Fahrzeuge eingegangen, beginnend mit dem Blendfahrzeug. In *Abbildung 6-8* sind die mittleren Beleuchtungsstärkeverläufe für die beiden untersuchten Scheinwerferhelligkeiten bei trockener und nasser Fahrbahn aufgetragen.



*Abbildung 6-8: Verlauf der Beleuchtungsstärke im Blendfahrzeug bei trockener (links) und nasser (rechts) Fahrbahn, **blau:** 100 % Intensität, **orange:** 100 % Intensität des Abblendlichtes*

In den beiden Grafiken sind jeweils die Mittelwerte der beiden Scheinwerfer-Intensitäten dargestellt. Bei trockener Fahrbahn wird bei voller Intensität ein Maximum von 1,06 lx erreicht und bei einer Intensität von 50 % verringert sich das Maximum auf 0,52 lx. Dies entspricht auch mathematisch eine Reduzierung von 50 % der gemessenen Beleuchtungsstärke auf Fahreraugenposition. Bei nasser Fahrbahn wird ein Maximum bei voller Intensität von 2,12 lx erreicht. Dies ist im Vergleich zur trockenen Fahrbahn, eine Steigerung um Faktor zwei. Dies widerspricht den Angaben von beispielsweise ROSENHAHN [51], der eine um Faktor sieben höhere Beleuchtungsstärke bei nasser Fahrbahn beobachtete. Eine mögliche Ursache hierfür könnte in der groben Asphaltoberfläche zu finden sein, die auf dem Testgelände verwendet wurde. Durch die grobe Oberflächenbeschaffenheit werden die Lichtstrahlen vermehrt absorbiert, wodurch sich der im Vergleich geringe Einfluss der nassen Fahrbahn bemerkbar macht. Eine Halbierung der Beleuchtungsstärke bei nasser Fahrbahnoberfläche ist ebenfalls bei der Intensität von 50 % wiederzufinden und entspricht somit dem nicht abgedunkelten Verlauf bei trockener Fahrbahn. Bei einem Abstand von etwa 45 m ist ein Lichtpuls zu erkennen, der durch eine spiegelnde Reflexion an einer Pfütze entsteht.

In *Abbildung 6-9* sind die Beleuchtungsstärkeverläufe am Testfahrzeug dargestellt, in der die drei Abdunkelungen des Blendfahrzeuges, für trockene und nasse Fahrbahn, gezeigt werden.



*Abbildung 6-9: Verlauf der Beleuchtungsstärke im Testfahrzeug bei trockener (links) und nasser (rechts) Fahrbahn, **blau**: 100 % Intensität, **orange**: 75 % Intensität und **gelb**: 50 % Intensität des Abblendlichtes*

Sowohl auf trockener, als auch auf nasser Fahrbahnoberfläche werden ähnliche Verläufe und Verhältnisse, wie beim Blendfahrzeug gemessen. Dies zeigt, dass die gewählten Scheinwerfer eine ähnliche Lichtverteilung aufweisen. Bei nasser Fahrbahn verschiebt sich das Maximum von etwa 15 m auf 25 m, eine Tatsache die sich mit den Literaturangaben deckt. Als Unterschied zu den Verläufen der Beleuchtungsstärke am Blendfahrzeug (vgl. *Abbildung 6-8*), ist der nicht vorhandene Lichtpuls bei 45 m zu nennen. Die Erklärung hierfür liegt in der Position der Pfütze, die für den Lichtpuls verantwortlich ist. In *Abbildung 6-10* ist in einem Abstand von 100 m, eine Leuchtdichteaufnahme aus Sicht des Testfahrzeuges zu erkennen.

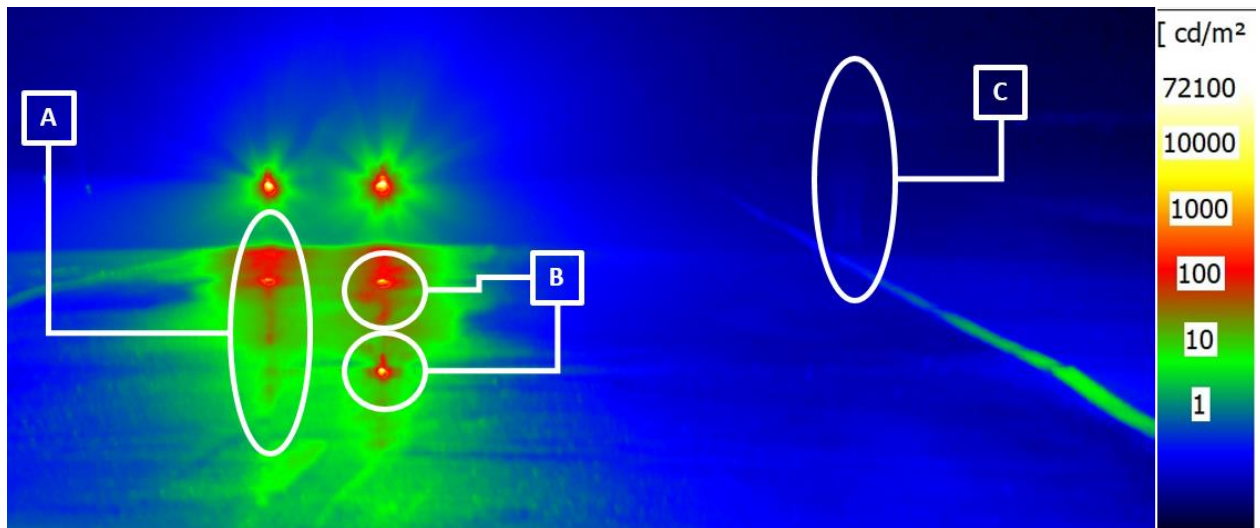


Abbildung 6-10: Leuchtdichteaufnahme aus Sicht des Testfahrzeuges in 100 m Entfernung zum Blendfahrzeug **A**: Blendkeule, **B**: Wasserpfütze, **C**: Detektionsobjekt

In der Leuchtdichteaufnahme sind die Blendkeulen des Blendfahrzeuges zu erkennen, die in Richtung des Testfahrzeuges ausgerichtet sind. Ebenfalls zu erkennen sind die beiden Wasserpfützen, die eine hohe Leuchtdichte aufweisen. Allerdings kommt es zu diesem spiegelnden Effekt nur unter bestimmten Winkeln, die in diesem Fall, in einem Abstand von 100 m für das Testfahrzeug auftreten. Das Detektionsobjekt auf der rechten Fahrbahnseite ist nur schwach zu erkennen, da es sich in einem Abstand von 100 m befindet und dadurch nicht vom Scheinwerferlicht angeleuchtet wird. Im Folgenden wird auf die gemessenen Detektionsabstände näher eingegangen.

In *Abbildung 6-11* sind die Detektionsabstände bei trockener und nasser Fahrbahn, für die unterschiedlichen Abdunkelungen der beiden Fahrzeuge, dargestellt. Die exakten Werte können aus *Tabelle A-5* und *Tabelle A-6* entnommen werden.

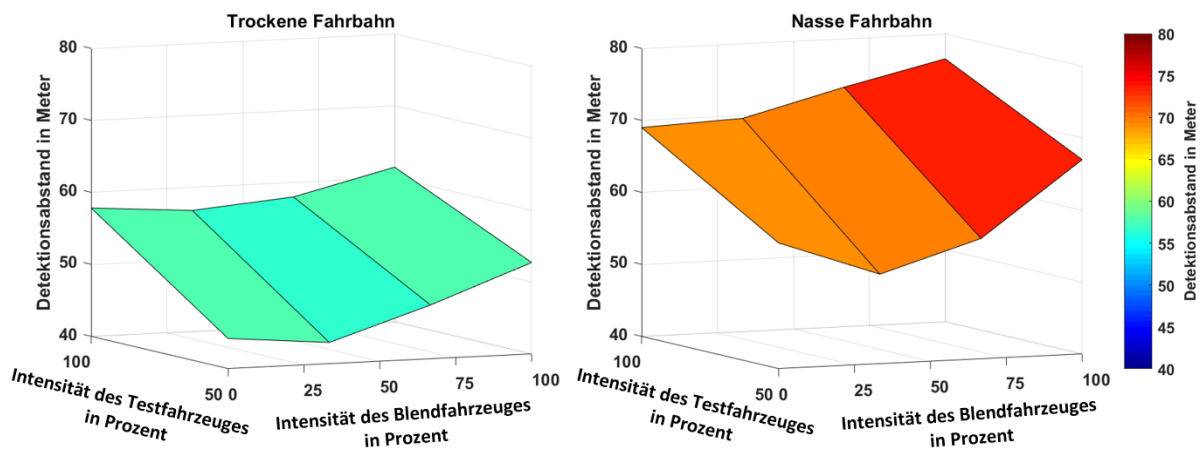


Abbildung 6-11: Detektionsabstände bei trockener (links) und nasser Fahrbahn (rechts) in Abhängigkeit der unterschiedlichen Intensitäten von Blend- und Testfahrzeug

Wie zu erwarten, hängt der Detektionsabstand von der Intensität der eigenen Scheinwerfer, als auch der des entgegenkommenden Verkehrs ab. So wird bei voller Intensität der Scheinwerfer des

Testfahrzeuges ein mittlerer Detektionsabstand von 56 m bis 61 m gemessen, abhängig davon, wie stark die Scheinwerfer des entgegenkommenden Fahrzeuges abgedunkelt werden. Ein direkter Vergleich mit den nach ZYDEK [15] ermittelten Detektionsentfernung ist an dieser Stelle nicht möglich, da ZYDEK [15] keinen LED-Scheinwerfer untersucht hat. Die Ergebnisse scheinen aber mit den Detektionsentfernungen von den Scheinwerfern mit Halogenglühlampen übereinzustimmen. Durch die höheren Fahrbahnreflexionen und daraus resultierenden höheren Beleuchtungsstärken im Vorfeld, werden im Nassen im Mittel etwa 20 % höhere Detektionsabstände gemessen. Eine durchgeführte Signifikanzanalyse mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test kann allerdings keinen signifikanten Unterschied nachweisen ($p = 0,67$). Dies bestätigt die Ergebnisse von HUHN, der ebenfalls keinen Detektionsvorteil bei nasser Fahrbahn ermitteln konnte. Bei einer 50 % Abdunkelung der Scheinwerfer des Testfahrzeuges, werden Detektionsabstände zwischen 54 m und 67 m erreicht. Diese sind vergleichbar mit den Detektionsabständen, die auf trockener Fahrbahn gemessen werden.

In *Abbildung 6-12* sind die Detektionswahrscheinlichkeiten für drei Abblendlicht-Intensitäten zu erkennen. Die Detektionswahrscheinlichkeit gibt dabei die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Objekt in Abhängigkeit des Abstandes detektiert werden kann. Die blaue Kurve zeigt die Detektionswahrscheinlichkeiten bei einer trockenen Fahrbahn, bei der beide Fahrzeugscheinwerfer nicht abgedunkelt sind. Die Detektionswahrscheinlichkeit für den Fall, dass beide Fahrzeuge mit einer Intensität von 50 % sich begegnen ist in rot dargestellt. Die dritte Kurve in Gelb, zeigt die Detektionswahrscheinlichkeit für den Fall, dass das Testfahrzeug mit einer Intensität von 50 %, dem Blendfahrzeug mit nicht abgedunkeltem Abblendlicht begegnet. Die rot gestrichelten Linien geben die 50 % und die 95 % Detektionswahrscheinlichkeit an.

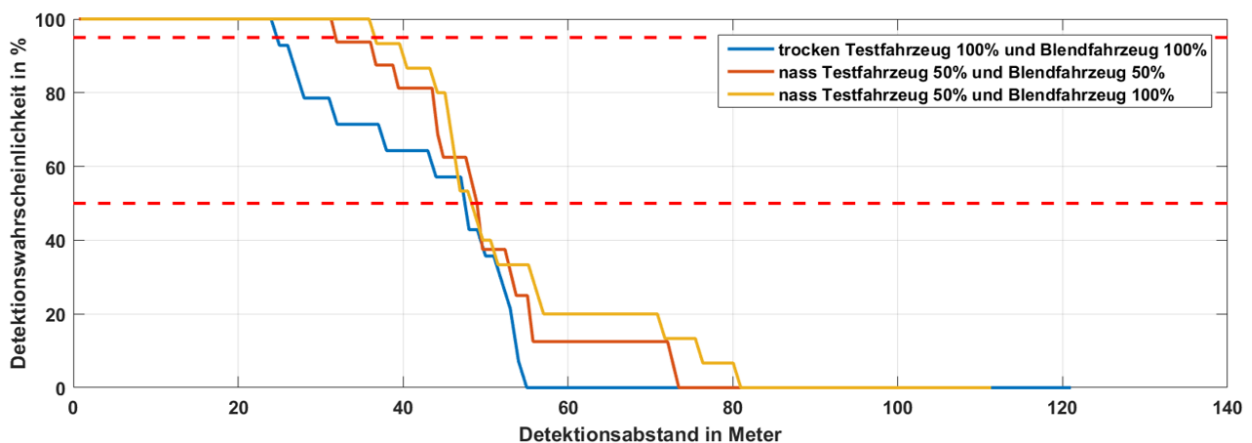


Abbildung 6-12: Detektionswahrscheinlichkeiten für trockene und nasse Fahrbahn bei einer Intensität von 100 % und 50 %

Bei der 50 % Detektionswahrscheinlichkeit weisen alle drei Kurven einen näherungsweise gleichen Detektionsabstand von etwa 57 m auf. Für höhere bzw. niedrigere Detektionswahrscheinlichkeiten driften die beiden Kurven mit der abgedunkelten Verteilung ab und erzielen beispielsweise bei der 95 % Detektionswahrscheinlichkeit einen Detektionsabstand, der um 7 m bzw. 12 m höher ist als im trockenen und nicht abgedunkelten Fall.

6.3.3 Fazit

Der beschriebene Feldtest hatte das Ziel, die Auswirkungen einer nassen Fahrbahn auf die Blendung und die Detektionsentfernungen zu untersuchen. Hierzu wurde eine Begegnungssituation mit einem stehendem und einem fahrenden Fahrzeug nachgestellt, die unter trockenen und nassen Fahrbahnbedingungen stattgefunden hat. Bei beiden Fahrzeugen wurde die Intensität der Abblendlichtverteilung reduziert und das Blendungs- und Helligkeitsempfinden aufgezeichnet. Außerdem wurde die Sichtweite, in Form der Detektion eines Objekts, aus Sicht des fahrenden Fahrzeuges aufgezeichnet.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei trockener Fahrbahn eine optimale Helligkeit bei nicht abgedunkelten Scheinwerfern erzielt wird. Bei nasser Fahrbahn dagegen, weist das Helligkeitsempfinden eine starke Abhängigkeit von der Scheinwerfer-Intensität beider Fahrzeuge. Zusammengefasst verursachen bei nasser Fahrbahn, nicht abgedunkelte Scheinwerfer bei beiden Fahrzeugen, eine tendenziell zu helle Bewertung. Für den Fall das beide Fahrzeuge mit einer Intensität von 50 % sich begegnen, resultiert eine optimale Helligkeitsbewertung. Die Blendungsbewertung hängt dagegen einzig von der Intensität des entgegenkommenden Fahrzeuges ab, wodurch der Fahrer auf dessen Scheinwerfer adaptiert.

Auf trockener Fahrbahn verursachen nicht abgedunkelte Scheinwerfer eine psychologische Blendung von 5,4 und auf nasser Fahrbahn 7,6 auf der inversen de Boer Skala. Durch Reduzierung der Scheinwerfer-Intensität auf 50 % ist es möglich, die de Boer Bewertung auf einen Wert von 5 zu senken, ein Wert, der dem auf trockener Fahrbahn entspricht.

Die Detektionsergebnisse zeigen darüber hinaus, dass eine Reduzierung der Scheinwerfer-Intensität keine Sichtweiteneinbußen zur Folge haben, sondern bei einer 95 % Detektionswahrscheinlichkeit in einer um 7 m bzw. 12 m erhöhten Detektionsentfernung resultiert, abhängig davon, ob der entgegenkommende Scheinwerfer abgedunkelt ist oder nicht. Die untersuchten Scheinwerfer des fahrenden Fahrzeuges weisen in Zone I eine mittlere Beleuchtungsstärke von 23 lx auf, somit würde durch eine Reduzierung der Intensität um 50 % in einer mittleren Beleuchtungsstärke von 11,5 lx resultieren. Bei nassen Straßenbedingungen kann somit die Intensität der Scheinwerfer, ohne einer Gefährdung der Verkehrssicherheit, reduziert werden und gleichzeitig ist es möglich, Energie einzusparen.

6.4 Abgeleitete Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse, mit den in Kapitel 6.1 gezeigten Literatur Ergebnissen verglichen. Im Anschluss folgen weiterführende Ergebnisse, die aus den Korrelationen der Erkenntnisse dieses Feldtests stammen.

6.4.1 Vergleich mit Ergebnissen der Literatur

Die Ergebnisse des vorliegenden Feldtests zeigen, dass eine Abdunkelung der Vorfeldbeleuchtung von 50 %, die psychologische Blendung signifikant reduzieren kann, ohne dabei die Sichtweite des

Fahrers zu beeinflussen. In der UNECE Regelung Nr. 123 [124] wird für eine Schlechtwetterlichtverteilung, die auch bei nassen Straßen angewendet wird, zwei Segmente (Segment 10 und Segment 20) der Vorfeldbeleuchtung definiert. Diese dienen der Reduzierung der Vorwärtsreflexion. Anhand der Regelung sollen die Segmente 10 und 20 eine maximale Lichtstärke von 7100 cd bzw. 17600 cd aufweisen. In *Tabelle 6-2* sind die gemessenen Lichtstärkewerte der beiden untersuchten Scheinwerfer bei einer um 50 % verringerten Intensität aufgetragen.

Tabelle 6-2: Vergleich der gemessenen Lichtstärkewerte mit denen der Schlechtwetterlichtverteilung aus UNECE Nr. 123

	Segment 10	Segment 20
Testfahrzeug	5950 cd	16320 cd
Blendfahrzeug	5892 cd	15790 cd
UNECE Nr. 123	< 7100 cd	< 17600 cd

Aus der gezeigten Tabelle geht hervor, dass mit der ermittelten Intensität von 50 %, die resultierende Lichtverteilung innerhalb der UNECE vorgeschlagenen Grenzwerte liegt, die somit bestätigt werden können. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen von KLEINERT [133], der für den Bereich der Vorfeldbeleuchtung die UNECE Nr. 123 Anforderungen nennt.

Die nach DAMASKY [44] definierte Vorfeldbeleuchtung von 5 lx kann allerdings nicht bestätigt werden, wobei der angegebene Wert eher fragwürdig erscheint, da die Vorfeldbeleuchtung die nach UNECE Nr. 123 definierten Segmente 10 und 20 beinhaltet. Diese werden mit einer maximalen Beleuchtungsstärke von 11,4 lx (7100 cd) bzw. 28,2 lx (17600 cd) angegeben, wobei der nach DAMASKY [44] angegebene Wert diese Anforderung zwar erfüllt, jedoch um ein Vielfaches kleiner ist. Bei einer weiteren Abdunkelung der Vorfeldbeleuchtung, als es im vorliegendem Feldtest der Fall ist, würde die Abblendlichtverteilung für den Fahrer zu dunkel erscheinen (vgl. *Abbildung 6-5*).

Viel wichtiger erscheint die Fern- und Seitenausleuchtung, die dem Fahrer eine sichere Orientierung und Erkennbarkeit gewährleistet. Diese sollte laut ROSENHAHN [51], um etwa Faktor 2 bis 3 höher ausgelegt sein, als die der heutigen Scheinwerfer. Allerdings stand im Fokus dieser Arbeit nicht die Entwicklung einer Schlechtwetterlichtverteilung, sondern vielmehr die Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer, resultiert durch Reflexionen einer nassen Fahrbahn zu reduzieren, ohne dabei die Sichtweite des Fahrers zu beeinflussen. Aus diesem Grund wurde die Abblendlichtverteilung nicht in Zonen untersucht. Durch die nasse Fahrbahn hat sich eine Verdoppelung der Beleuchtungsstärke auf Fahreraugenposition ergeben, die durch Abdunkelung der Vorfeldbeleuchtung, auf Werte einer trockenen Fahrbahn gesenkt werden konnten. Bei ROSENHAHN [51] dagegen, wurden bei einer nassen Fahrbahn etwa sieben Mal höhere Beleuchtungsstärken gemessen. Potentielle Gründe für diese Abweichung könnten in der Oberflächenbeschaffenheit der Straße sowie im Nässegrad liegen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. ROSENHAHN [51] bewässerte die Fahrbahn 15 Minuten lang mit einer Menge von 0,3 mm/min, wodurch sich ein rein rechnerischer Wasserfilm von 4,5 mm auf der Straße bildet, der um 0,9 mm höher ist als der beim aktuell beschriebenen Feldtest. Es wäre eine potentielle Erklärung, weshalb die Ergebnisse von ROSENHAHN [51], eine um Faktor sieben höhere Beleuchtungsstärke darstellen, wohingegen in dieser Untersuchung ein Faktor von zwei gemessen wurde. Andererseits könnte die Straßenbeschaffenheit für die Abweichung verantwortlich sein. Grobkörnige Asphaltsschichten, wie die des

vorliegenden Versuchs, weisen deutliche Unterschiede im Reflexverhalten auf, die sich in „wesentlich geringeren“ Vorwärtsreflexionen bei Nässe äußern, als bei einer glatten Asphaltoberfläche [51].

Die Ergebnisse haben bei nasser Fahrbahn eine Verschiebung des Maximums der Beleuchtungsstärke vom Beobachter weg gezeigt. Dies deckt sich mit den Aussagen von beispielsweise ROSENHAHN [51] und HOFFMANN [130] und belegt dabei, dass bei nasser Fahrbahn, der indirekte Anteil durch die Blendkeulen dominierend wird. Durch Kenntnis des Abstandes, bei dem unter nassen Fahrbahnbedingungen die maximale Beleuchtungsstärke auftaucht, kann der Abstand d_1 zum Reflexpunkt bestimmt werden. In der folgenden Abbildung ist eine schematische Darstellung gezeigt, aus der die geometrischen Beziehungen abgeleitet werden können.

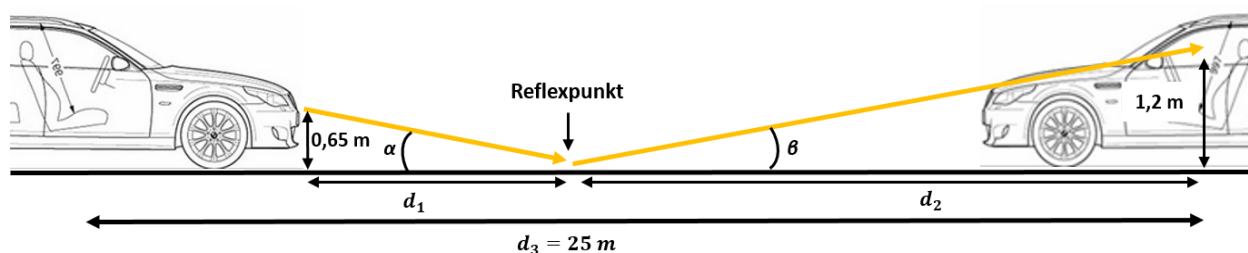


Abbildung 6-13: Schematische Darstellung der Vorwärtsreflexion und Bestimmung des Reflexpunktes

Unter der Annahme, dass der Abstand zwischen Fahrer und Scheinwerfer seines Fahrzeuges etwa 1,5 m beträgt, befindet sich der Reflexpunkt bei einem Abstand $d_1 \approx 5 \text{ m}$ und wird von einem Einfallswinkel $\alpha \approx 7^\circ$ angeleuchtet. Bei diesem Winkel resultiert aus der LVK des Scheinwerfers eine Beleuchtungsstärke von etwa 7 lx in 25 m Entfernung. Diese Berechnung setzt gleiche Einfallswinkel und Reflexionswinkel voraus. Da durch die Wasserschicht auf der Fahrbahn, der Reflexionswinkel größer wird und der Reflexpunkt sich dadurch zum Beobachter verschiebt, verkleinert sich der Einfallswinkel, wodurch noch höhere Beleuchtungsstärken am Reflexpunkt herrschen würden. Durch die nicht ideale Form der Wasser- und Fahrbahnoberfläche ergeben sich unterschiedliche Einfallswinkel bzw. Reflexionswinkel, die als Resultat die Blendkeulen auf der Straße erzeugen. Diese sind aus vielen Reflexpunkten zusammengesetzt und ergeben die gemessene Blendbeleuchtungsstärke, die maßgeblich von der Vorfeldbeleuchtung beeinflusst wird.

6.4.2 Weiterführende Ergebnisse

Aus den Ergebnissen dieses Feldtests ist eine Beziehung zu erkennen, die zwischen der Blendbeleuchtungsstärke und der psychologischen Blendung besteht. Eine niedrige inverse de Boer Bewertung bedeutet eine geringe psychologische Blendung wohingegen eine hohe Bewertung mit einer unerträglichen Blendung gleichzusetzen ist. Die in *Abbildung 6-14* gezeigten maximalen Beleuchtungsstärken sind Mittelwerte der 16 durchgeführten Fahrten der Probanden. Bei den de Boer Bewertungen sind die zugehörigen Mediane gezeigt. Die Fehlerbalken zeigen die einfache Standardabweichung.

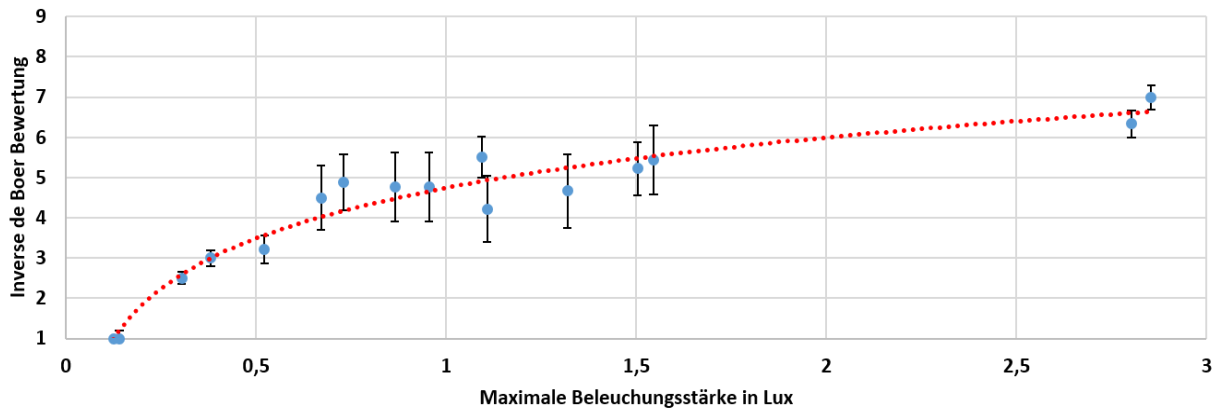


Abbildung 6-14: Korrelation zwischen psychologischer Blendung und Beleuchtungsstärke, die maximal während einer Begegnungssituation auftaucht. In Rot ist die Regressionslinie dargestellt die das Verhältnis zwischen der inversen de Boer Bewertung und der maximalen Beleuchtungsstärke wiedergibt ($R^2=0,94$)

Die rote Linie zeigt die logarithmische Regressionslinie mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,94$, weshalb von einer Korrelation der beiden Parameter ausgegangen werden kann. Diese Korrelation legt die Vermutung nahe, dass sich die Probanden an der maximalen Beleuchtungsstärke orientieren, um die psychologische Blendung zu bewerten. Hohe maximale Beleuchtungsstärken werden mit einer geringen Standardabweichung als blendend bewertet. Die Bewertungen die an der Grenze zwischen blendend und nicht blendend liegen (de Boer Bewertung von 5) weisen eine im Vergleich erhöhte Standardabweichung auf. Dies weist auf eine erhöhte Unsicherheit der Probanden hin, die sich nicht sicher sind, ob eine Blendung auftritt oder nicht. Als Grenzwert kann aus der Grafik eine maximale Beleuchtungsstärke von etwa 1,2 lx abgeleitet werden, ab dem eine psychologische Blendung durch den entgegenkommenden Verkehr auftritt. Bei niedrigen maximalen Beleuchtungsstärken sinkt die psychologische Blendung weiter.

Über die Detektionsabstände kann die physiologische Blendung abgeleitet werden, da mit Vorhandensein einer physiologischen Blendung, die Sehleistung beeinträchtigt wird und demzufolge verringerte Detektionsabstände zu beobachten sind. In *Abbildung 6-15* sind die mittleren Detektionsabstände bei trockener und nasser Fahrbahn, mit aktivierten und deaktivierten Scheinwerfern des Blendfahrzeuges dargestellt. Die Fehlerbalken zeigen die einfache Standardabweichung.

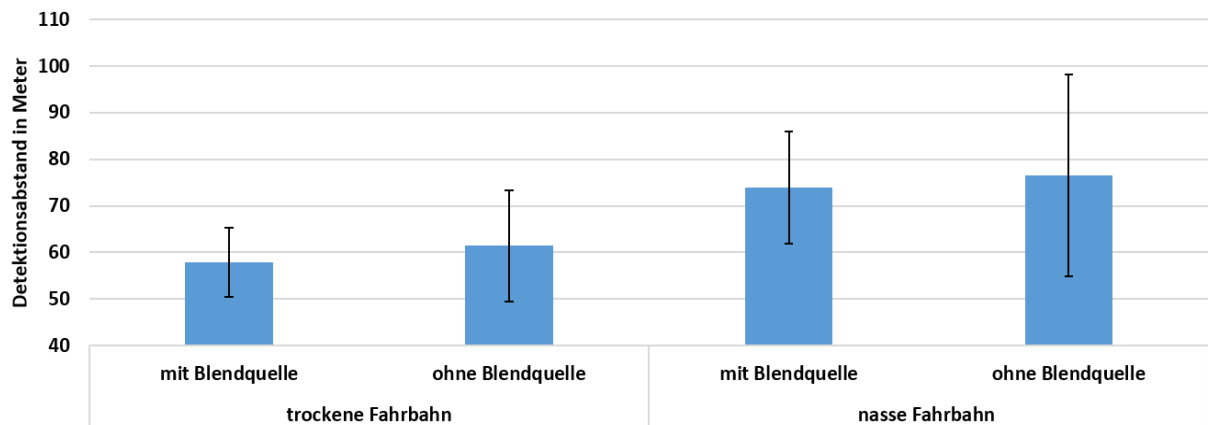


Abbildung 6-15: Detektionsabstände mit und ohne Vorhandensein einer Blendquelle (Scheinwerfer des Blendfahrzeuges aktiviert bzw. deaktiviert) für trockene und nasse Fahrbahn

Wie schon in Kapitel 6.3.2 gezeigt, steigt der mittlere Detektionsabstand bei nasser Fahrbahn etwa um 20 % an, allerdings kann kein signifikanter Unterschied in den Abständen festgestellt werden. Für die physiologische Blendung interessanter ist allerdings der Unterschied „mit Blendquelle“ und „ohne Blendquelle“. Im Mittel kann eine leicht fallende Tendenz des Detektionsabstandes festgestellt werden, eine Signifikanzanalyse widerspricht einen potentiellen Unterschied zwischen „mit“ und „ohne“ Blendquelle. Demzufolge tritt durch die nasse Fahrbahn zwar eine psychologische Blendung auf, eine physiologische jedoch nicht.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass durch eine nasse Fahrbahn die psychologische Blendung anhand der inversen de Boer Bewertungsskala von 5,4 auf trockener Fahrbahn auf 7,6 steigt (vgl. *Abbildung 6-6*). Demzufolge führt eine nasse Fahrbahnoberfläche zu einer erhöhten psychologischen Blendung, die das Sehvermögen nicht zwingend beeinflusst. Allerdings ist aus *Abbildung 6-15* ersichtlich, dass der Detektionsabstand bei nasser Fahrbahn steigt. Der Grund hierfür liegt in den höheren Objektkontrasten, die durch die Vorwärtsreflexionen entstehen. Hierauf wird in Kapitel 7.2 näher eingegangen.

Da durch eine nasse Fahrbahn die Sichtweite des Fahrers eher positiv beeinflusst wird und die negativen Aspekte in der Blendung entgegenkommender Fahrzeuge zu finden sind, liegt die Vermutung nahe, ein partiell abdunkelndes Abblendlicht zu verwenden. Dieses könnte lediglich den Bereich der Vorfeldbeleuchtung abdunkeln, in der Vorwärtsreflexionen andere Verkehrsteilnehmer blenden könnten und der rechte Bereich unterhalb der HDG, der für die Sichtweite des Fahrers verantwortlich ist, beibehalten werden. Um den kritischen Bereich der Vorfeldbeleuchtung zu identifizieren wird vorerst eine dynamische Reduzierung der Intensität bestimmt, die bei nasser Fahrbahnoberfläche dasselbe Beleuchtungsstärkemaximum verursacht wie auf trockener (vgl. *Abbildung 6-16*). Dadurch könnte die Blendung des entgegenkommenden Verkehrs auf Werte einer trockenen Fahrbahn gesenkt werden. Hierfür werden die Beleuchtungsstärkeverläufe aus *Abbildung 6-9* verwendet.

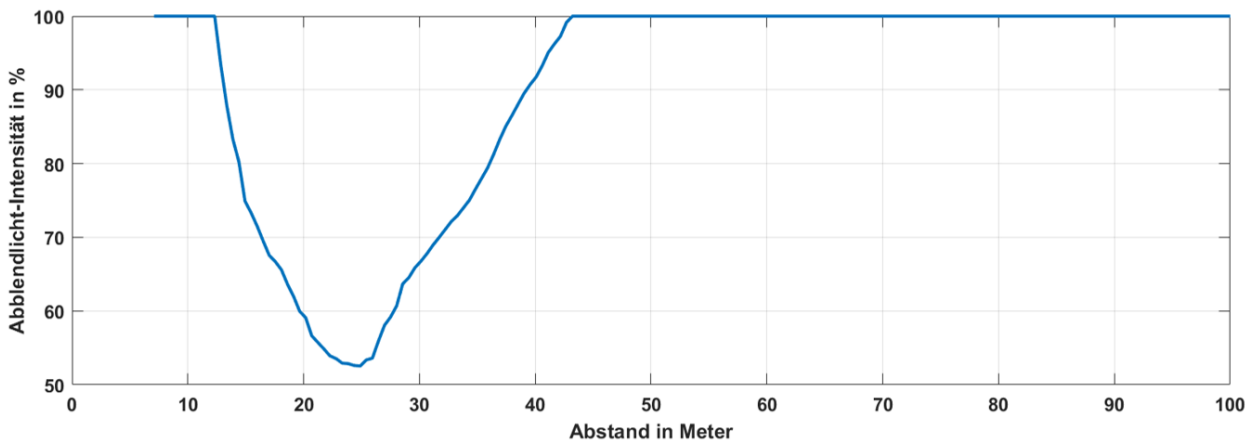


Abbildung 6-16: Dynamische Intensität der Vorfeldbeleuchtung bei nasser Fahrbahn, um dasselbe Beleuchtungsstärkemaximum zu erreichen, wie auf trockener Fahrbahn.

In Abbildung 6-16 wird die dynamische Intensität der Vorfeldbeleuchtung in Abhängigkeit des Abstandes gezeigt, die bei nasser Fahrbahn dasselbe Maximum erreicht wie auf trockener. Ebenfalls ist ersichtlich, dass der blendungskritische Bereich zwischen 12 m und 43 m liegt. Um den daraus resultierenden Winkelbereich zu berechnen, wird die geometrische Position von B50L verwendet (-3,43° bei 25 m), die in der UNECE Nr. 98 definiert ist [136]. Somit ergibt sich über den Tangensatz ein Winkelbereich für den blendungskritischen Bereich von -2° bis -7,1° der in Abbildung 6-17 in grün dargestellt ist.

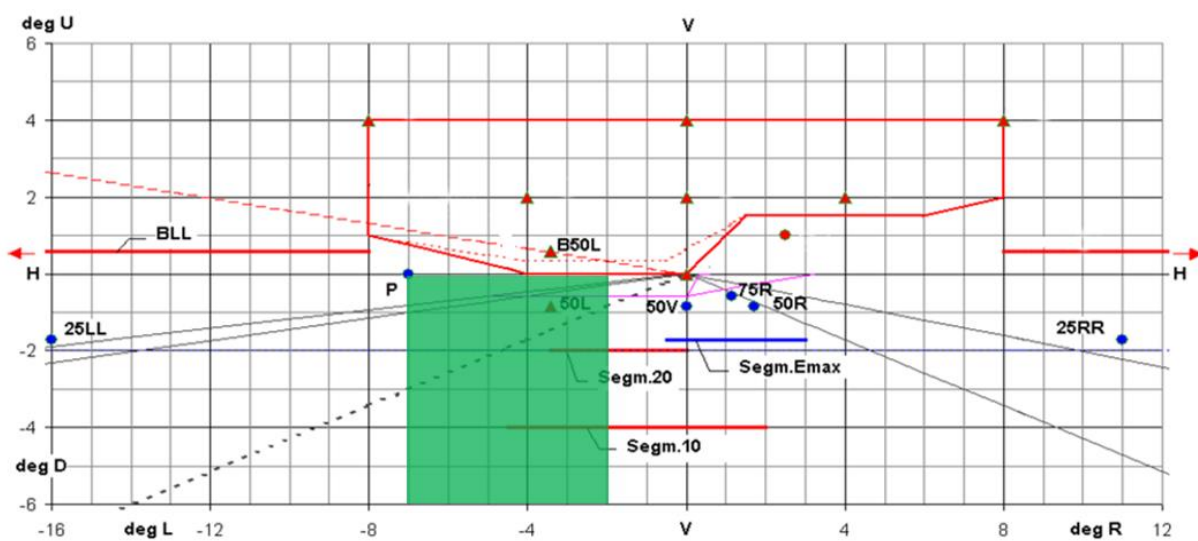


Abbildung 6-17: Empfohlene Lichtverteilung für nasse Fahrbahnoberflächen. Der grüne Bereich zeigt den blendungskritischen Bereich, der partiell und dynamisch abgedunkelt werden sollte. Nach [124]

In Abbildung 6-17 ist in Grün der blendungskritische Bereich dargestellt, der während einer Begegnungssituation bei nasser Fahrbahn abgedunkelt werden sollte. Durch die partielle Abdunkelung wird die Blendung bei Begegnungssituationen auf Werte einer trockenen Fahrbahn reduziert und gleichzeitig die Vorteile der Vorwärtsreflexionen beibehalten, sodass dem Fahrer eine bessere Sicht gewährleistet wird.

Bei einem direkten Vergleich des vorgeschlagenen Bereichs mit den Segmenten der UNECE [124] fällt auf, dass beide Segmente horizontal nach rechts verschoben sind und im Fall von Segment 10 sogar positive Winkel auftreten. Der Grund hierfür ist, dass bei den UNECE Segmenten neben Entgegenkommenden auch vorausfahrende Verkehrssituationen betrachtet werden. Bei den Bereichen von KLEINERT [133] und den aus diesem Feldtest resultierendem Bereich wird dagegen lediglich der entgegenkommende Verkehr betrachtet. Allerdings sind auch hier unterschiedliche minimale horizontale Winkel feststellbar, die von $-7,1^\circ$ beim vorgestelltem Feldtest, über $-5,5^\circ$ bei KLEINERT bis hin zu $-4,5^\circ$ bei der UNECE reichen. Die minimalen Winkel sind aus dem Grund wichtig zu betrachten, da bei einem sich näherndem Fahrzeug die Beleuchtungsstärke und somit auch das Blendpotential steigt. Durch Umrechnung der Winkel in Abstände ist es möglich, die auftretenden Beleuchtungsstärken der drei Bereiche untereinander und mit trockener Fahrbahn zu vergleichen. Hierzu wird der Beleuchtungsstärke-Verlauf aus *Abbildung 6-9* verwendet. Der Vergleich zeigt, dass bei dem minimalen Winkel der UNECE 63 % und bei KLEINERT 36 % höhere Beleuchtungsstärken auftauchen, als bei trockener Fahrbahn, wodurch die Bereiche nach KLEINERT und der UNECE zu klein erscheinen.

7 Diskussion der physiologischen und psychologischen Blendungsergebnisse

Im nachfolgenden Abschnitt wird eine kritische Betrachtung und Vergleich der erzielten Ergebnisse durchgeführt. Diese sind unterteilt in die Ergebnisse der psychologischen und physiologischen Blendung.

7.1 Psychologische Blendung

Aus den durchgeführten Feldtests hat sich ein Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke der auftretenden Blendpulse am Fahrerrauge und der Adaptation herausgestellt. Für die Adaptation wurde in Kapitel 3 die Beleuchtungsstärke des entgegenkommenden Fahrzeuges verwendet. In Kapitel 6 hat sich herausgestellt, dass die psychologische Blendung maßgeblich von der Beleuchtungsstärke, die auf den Fahrer einwirkt ist, wodurch der Fahrer im Falle einer Begegnungssituation nicht auf die Vorfeldbeleuchtung seines Fahrzeuges, sondern auf die des ihm entgegenkommenden adaptiert. Der in Kapitel 3 gezeigte Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke und der Adaptation lässt sich in einer Regressionslinie zusammenfassen und gibt den Übergang zwischen psychologisch blendend und nicht blendend an. Die Daten basieren auf einem sogenannten Blendungsknopf, der von den Probanden gedrückt worden war, sobald sie eine Blendung empfunden haben. Zur Bestimmung eines Winkelbereichs, indem die Regressionslinie ihre Gültigkeit hat, ist in *Abbildung 7-1* ein Histogramm über die unterschiedlichen Abstände dargestellt, in denen der Blendungsknopf betätigt wurde und somit eine psychologische Blendung aufgetreten ist. Die gezeigten Häufigkeiten basieren dabei auf den Rohdaten aller Probanden und Fahrten. Insgesamt wurde der Blendungsknopf 11196 mal gedrückt.

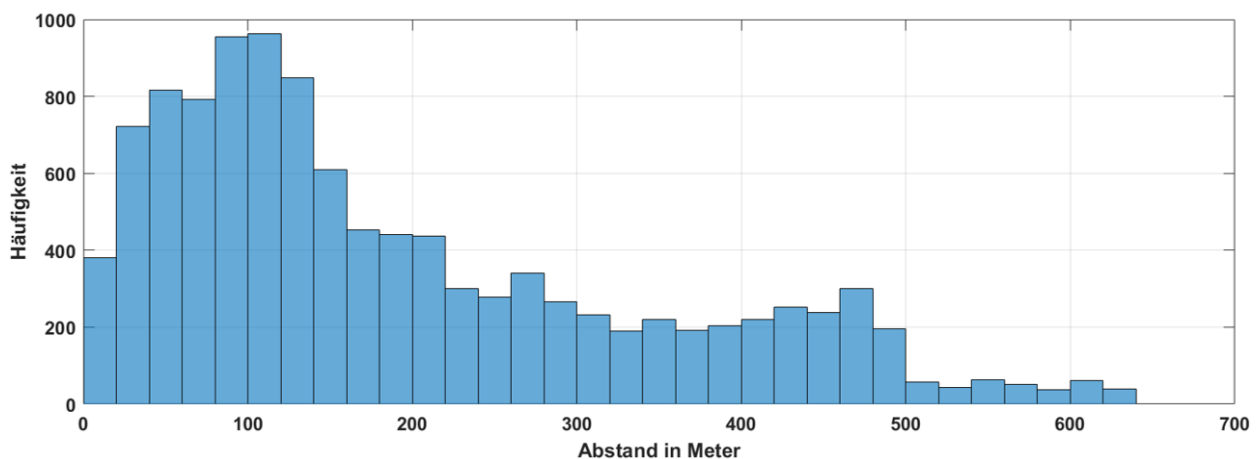


Abbildung 7-1: Histogramm der Betätigungen des Blendungsknopfes in Abhängigkeit des Abstandes

Zu beobachten ist, dass die meiste psychologische Blendung in einem Abstandsbereich von 20 m bis 150 m auftritt. Dies hängt mit der Tatsache zusammen, dass bei einem sich näherndem Fahrzeug die Beleuchtungsstärke auf Fahrerraugenposition steigt und somit Impulse durch Fahrbahnunebenheiten vermehrt auftreten bzw. es zu einer Blendung kommt. Allerdings ist die Häu-

figkeit eine sekundäre Variable in der Bestimmung des Winkelbereichs der psychologischen Blendung. Viel wichtiger ist der Abstand aus den unter bekannten Geometrien, der Winkel θ zur Blendquelle bestimmt werden kann. Der minimale Abstand beträgt etwa 4 m und der maximale Abstand etwa 630 m, woraus sich ein Winkelbereich von $0,23^\circ$ bis 32° ergibt. Eine Korrelation zwischen Winkel und Größe der auftretenden psychologischen Blendung, ist aus dem gegebenen Versuchsaufbau nicht zu entnehmen. Es kann lediglich ein Vorhandensein der psychologischen Blendung bestätigt werden und die in Kapitel 2.3.3 gezeigten Literaturergebnisse, dass die psychologische Blendung winkelunabhängig ist, bestätigt werden.

Der ermittelte Zusammenhang wird im Folgenden mit den Ergebnissen aus Kapitel 5 und Kapitel 6 verglichen.

In Kapitel 5 wurde die optimale Anleuchtung von Verkehrszeichen untersucht, bei dem neben der psychologischen Blendung auch die Beleuchtungsstärke gemessen wurde. Für jede Begegnungssituation mit einem Verkehrszeichen resultierten demzufolge eine Blendungsbewertung, sowie ein Beleuchtungsstärkeverlauf. Aus diesem Verlauf kann analog zur Vorgehensweise aus Kapitel 3.4 die Adaptations-Beleuchtungsstärke gebildet und in Abhängigkeit der maximalen Beleuchtungsstärke dargestellt werden. Fahrten, die als psychologisch blendend bewertet wurden, werden orange markiert. Zusätzlich ist die exponentielle Regressionslinie aus Kapitel 3.4 abgebildet, die anhand der gezeigten Ergebnisse, den Übergang zwischen blendend und nicht blendend darstellt.

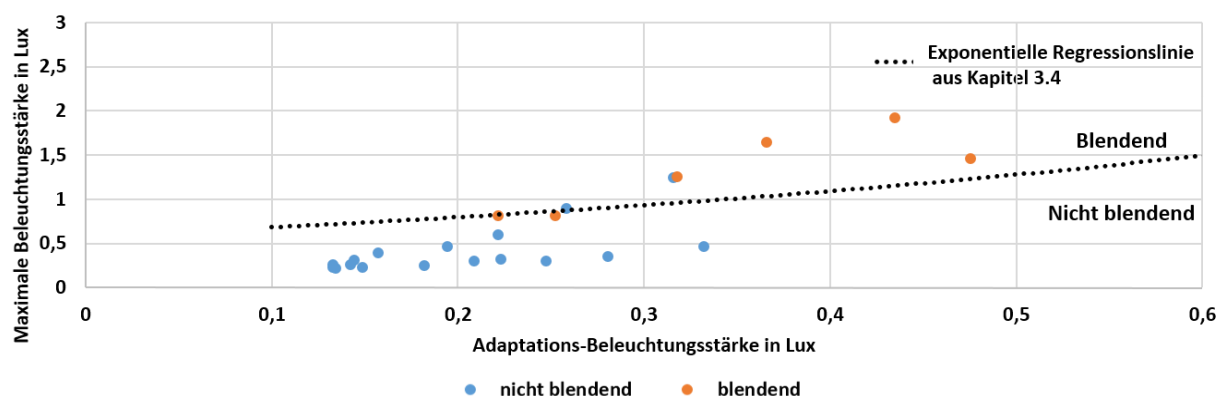


Abbildung 7-2: Anwendung der Regressionslinie aus Kapitel 3.4 auf die Ergebnisse von Kapitel 5, gezeigt ist das Verhältnis zwischen der maximalen und der Adaptations-Beleuchtungsstärke aus Kapitel 5, sowie die Regressionslinie aus Kapitel 3.4, die den Übergang zwischen blendend und nicht blendend darstellt

Die Daten, die als psychologisch nicht blendend bewertet wurden, sind blau markiert und die blendenden Verhältnisse orange. Die Mehrzahl der gezeigten Daten befindet sich in der durch die Regressionslinie aufgeteilten Bereiche „blendend“ und „nicht blendend“. Das heißt, orangene Daten liegen oberhalb und die blauen unterhalb der Regressionslinie. Ausnahmen stellen allerdings Verhältnisse dar, die sich sehr nahe der Regressionslinie befinden wie beispielsweise die Verhältnisse bei einer Adaptations-Beleuchtungsstärke von etwa 0,25 lx.

Die Regressionslinie kann ebenfalls in Kapitel 6 (nasse Fahrbahn) angewendet und validiert werden, da auch hier ein Beleuchtungsstärkeverlauf und die zugehörige psychologische Blendung aufgezeichnet wurde (vgl. Abbildung 6-6 und Abbildung 6-9). In Abbildung 7-3 sind die maximalen

Beleuchtungsstärken bei jeder Durchfahrt in Abhängigkeit der zugehörigen Adaptation aufgetragen. Die gezeigten Daten werden anhand der psychologischen Blendungsbewertungen farblich markiert.

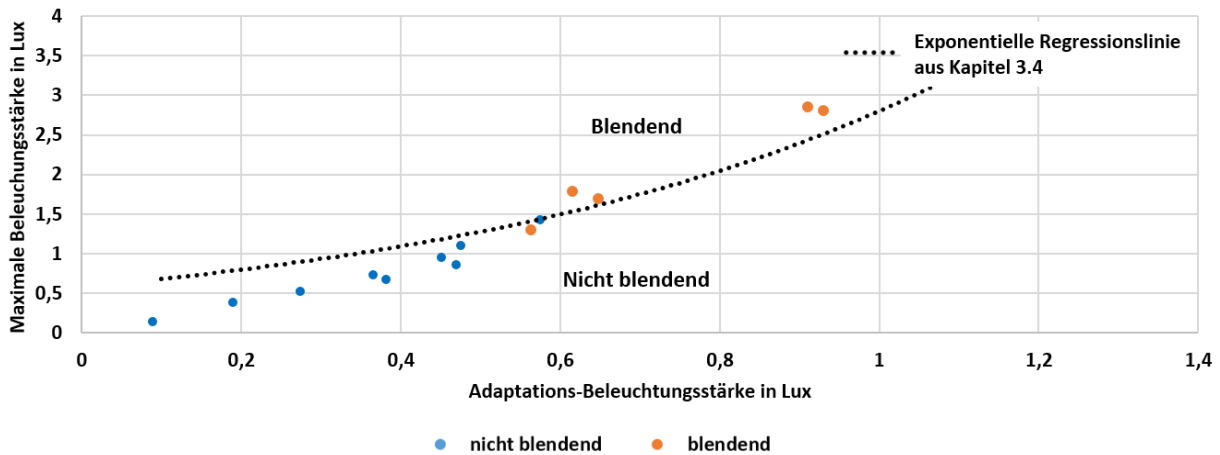


Abbildung 7-3: Anwendung der Regressionslinie aus Kapitel 3.4 auf die Ergebnisse von Kapitel 6, gezeigt ist das Verhältnis zwischen der maximalen und der Adaptations-Beleuchtungsstärke aus Kapitel 6, sowie die Regressionslinie aus Kapitel 3.4, die den Übergang zwischen blendend und nicht blendend darstellt

In *Abbildung 7-3* ist zu erkennen, dass mit steigender Adaptations-Beleuchtungsstärke die maximale Beleuchtungsstärke ebenfalls ansteigt. Die farbige Markierung der Verhältnisse ist dieselbe wie in *Abbildung 7-2*, orange blendend und blau nicht blendend. Auch in dieser Grafik befinden sich die Verhältnisse in den durch die Regressionslinie aufgeteilten Bereiche „blendend“ und „nicht blendend“, wobei Verhältnisse nahe der Regressionslinie eine Ausnahme darstellen. Ein potentieller Grund könnte in den de Boer Bewertungen liegen, die in *Abbildung 6-14* dargestellt sind. Zu erkennen ist, dass Bewertungen, die sich nahe an einer de Boer Bewertung von 5 (gerade zulässig) befinden, eine vergleichsweise hohe Streuung aufweisen. Dies könnte für die Abweichungen der Verhältnisse sowohl in *Abbildung 7-3* als auch in *Abbildung 7-2* verantwortlich sein.

Neben dem Zusammenhang der Maximalen mit der Adaptations-Beleuchtungsstärke, kann die psychologische Blendung mit einer photometrischen Größe in Verbindung gebracht werden. In Kapitel 6 wurde eine Korrelation zwischen der psychologischen Blendung und der Beleuchtungsstärke gezeigt. Die selbe Korrelation kann auch aus den Daten von Kapitel 3 gebildet werden, allerdings um eine Vergleichbarkeit mit Daten von ZYDEK [15] und SIVAK et al. [72] zu schaffen, wird die mittlere Beleuchtungsstärke herangezogen. In *Abbildung 7-4* wird ein Vergleich der beiden Regressionslinien gezeigt, die aus Daten von Kapitel 3 und Kapitel 6 bestehen.

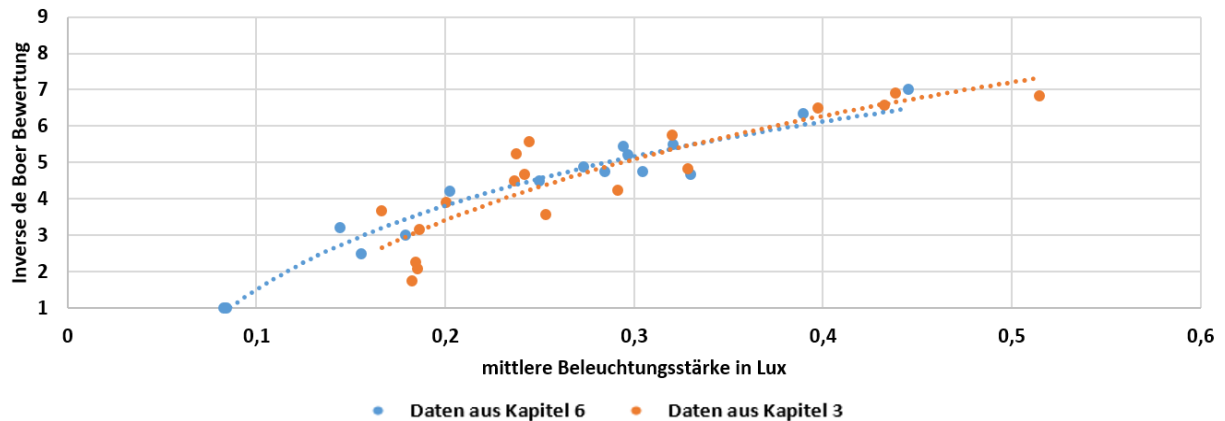


Abbildung 7-4: Psychologische Blendung und mittlere Beleuchtungsstärke für die Ergebnisse aus Kapitel 3 (orange) und Kapitel 6 (blau)

Die orangene Regressionslinie entsteht aus den Daten von Kapitel 3, bei der ein Proband in einem stehendem Fahrzeug, die Blendung eines sich dynamisch näherndem Fahrzeuges bewertet. Die blaue Regressionslinie dagegen stammt aus den Daten von Kapitel 6, bei denen ein Proband in einem fahrendem Fahrzeug, die Blendung eines stehenden Blendfahrzeuges bewertet. Demzufolge haben die Probanden aus Kapitel 6 eine Fahraufgabe und diejenigen aus Kapitel 3 keine. Beide Regressionslinien zeigen, dass mit steigender Beleuchtungsstärke, die psychologische Blendung auch steigt. Trotz der unterschiedlichen Probandenaufgabe der beiden Felduntersuchungen weisen die Regressionslinien einen sehr ähnlichen Verlauf auf und geben für eine de Boer Bewertung von 5 (Übergang zwischen blendend und nicht blendend) eine mittlere Beleuchtungsstärke von 0,3 lx an. ZYDEK [15] stellte ebenfalls einen Vergleich der psychologischen Blendung mit der mittleren Beleuchtungsstärke an und überprüfte seine Daten mit denen von SIVAK et al. [72] (vgl. *Abbildung A-14*). Obwohl die Daten von ZYDEK in einem Feldtest und die von SIVAK et al. in einer Laboruntersuchung mit festen Winkeln entstanden sind, ähneln sich die Ergebnisse sehr. Insbesondere bei der de Boer Bewertung von 5 wird bei ZYDEK ein Wert von 0,4 lx und bei SIVAK et al. ein Wert von 0,3 lx angegeben, Werte die sich mit den Ergebnissen aus Kapitel 3 und 6 decken (vgl. *Abbildung 7-4*). So verschieden die Feldtests auch aufgebaut bzw. durchgeführt sind, zeigt sich dennoch, dass sich die Beleuchtungsstärke als maßgebliche Größe herauskristallisiert, die die psychologische Blendung beschreibt.

7.2 Physiologische Blendung

Eine aus der Literatur bekannte Methode zur Bestimmung der physiologischen Blendung, ist durch Bestimmung der äquivalenten Schleierleuchtdichte. Aus dem daraus ergebenden Kontrast, können Rückschlüsse auf die Detektion eines Objektes geschlossen werden. Die Daten aus Kapitel 6 erlauben eine solche Auswertung, da hier neben den Detektionsentfernungen auch die Leuchtdichteaufnahmen vorhanden sind, aus denen der Kontrast bestimmt werden kann. Der Kontrast wird aus der Differenz zwischen der Objektleuchtdichte und der Umgebungsleuchtdichte berechnet, wobei letzteres sehr geringe Werte im Bereich des Rauschens der Kamera aufweist, wodurch erhebliche Kontrastschwankungen auftauchen. Dieser sollte allerdings keine Veränderung aufweisen, weshalb die Umgebungsleuchtdichte als eine Konstante betrachtet wird, die einen Wert von

0,02 cd/m² bei trockener und einen Wert von 0,04 cd/m² bei nassen Fahrbahn aufweist. In *Abbildung 7-5* ist ein Vergleich der Leuchtdichtedifferenz zwischen Objekt- und Umgebungsleuchtdichte, sowie der daraus resultierende Kontrast, dargestellt. Die Objektleuchtdichte wird über die Fläche der Beine des Detektionsobjektes gebildet, da diese zuerst von den Scheinwerfern angeleuchtet werden und demzufolge auch zuerst gesehen werden können. Zur Bestimmung der Umgebungs- und Objektleuchtdichten werden Leuchtdichteaufnahmen für Abstände zwischen 40 m und 80 m ausgewertet, die sich im Anhang befinden (siehe *Abbildung A-15*).

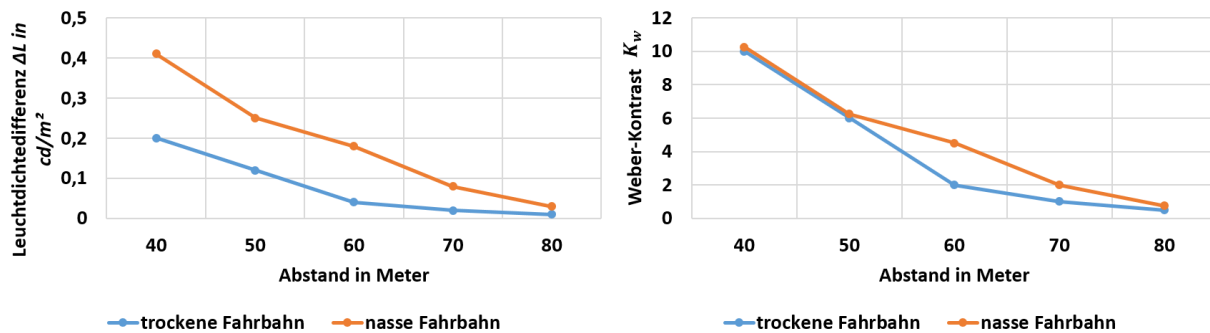


Abbildung 7-5: Leuchtdichtedifferenz ΔL (links) und Weber-Kontrast (rechts) für trockene (blau) und nasse (orange) Fahrbahn

Die Umgebungsleuchtdichte wird aus den Mittelwerten der untersuchten Abstände gebildet und trotz der unterschiedlichen Anfangswerte, ist eine deutliche Erhöhung der Leuchtdichtedifferenz bei nasser Fahrbahn zu erkennen. Diese resultiert aus den erhöhten Objektleuchtdichten bei nasser Fahrbahn, da das Objekt zusätzlich zum direkten Anteil, auch noch mit dem indirekten Scheinwerferlicht (Reflexionen von der Straße) angestrahlt wird. Dies entspricht den photometrischen Ergebnissen dieses Feldtests und bestätigt die im Mittel um 20 % gesteigerte Detektionsreichweite. Bei einem Vergleich der Weber-Kontraste zwischen trockener und nasser Fahrbahn, sind die Kontraste bis zu einem Abstand von 50 m sehr ähnlich. Dies kann dadurch erklärt werden, dass das Objekt von den Scheinwerfern direkt angestrahlt wird, wodurch der Einfluss der indirekten Beleuchtung relativiert wird. Bei größeren Abständen gewinnt der indirekte Anteil zunehmend an Bedeutung, wodurch der Kontrast bei nasser Fahrbahn steigt. Unter der Annahme, dass ein Objekt bei einem Kontrast von 2 detektiert werden kann, steigt auch der Detektionsabstand von 60 m auf 70 m. Ein vergleichbares Ergebnis wird auch durch die realen Messungen gezeigt (vgl. *Abbildung 6-15*).

Beim Vorhandensein einer Blendungsquelle, führt die auftretende äquivalente Schleierleuchtdichte zu einer Erhöhung der zur Erkennung notwendigen Leuchtdichtedifferenz. Diese ist in *Abbildung 7-6* in Abhängigkeit der Blendbeleuchtungsstärke für trockene und nasse Fahrbahn gezeigt. Die Blendbeleuchtungsstärke wird aus den Scheinwerfern des Blendungsfahrzeuges (nicht abgedunkelt) für einen Abstandsbereich zwischen 40 m und 80 m berechnet.

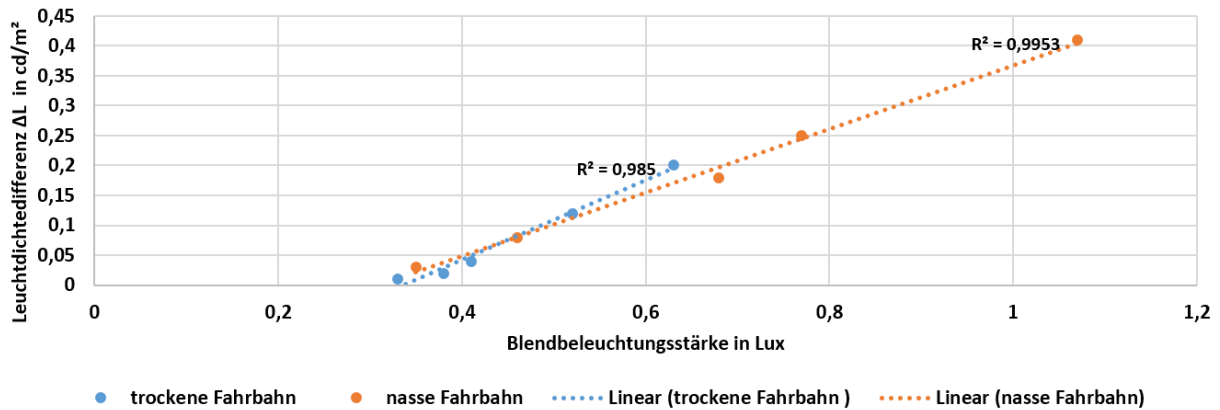


Abbildung 7-6: Leuchtdichtedifferenz und Blendbeleuchtungsstärke für trockene und nasse Fahrbahn

Die Daten zeigen, sowohl bei trockener und als auch bei nasser Fahrbahn einen linearen Zusammenhang, bei dem mit steigender Blendbeleuchtungsstärke, die Leuchtdichtedifferenz ebenfalls steigt. Bei einer steigenden Blendbeleuchtungsstärke ist die Belastung höher, wodurch die Differenz zwischen Objekt- und Umgebungsleuchtdichte größer werden muss, um das Objekt mit gleicher Wahrscheinlichkeit zu erkennen. Durch die steigende Blendbeleuchtungsstärke, steigt auch die äquivalente Schleierleuchtdichte, die beispielsweise durch die CIE vorgestellte Gleichung (2-7), bzw. der Holladay Gleichung (2-5), berechnet werden kann. TOTZAUER [64] zweifelte die Holladay Gleichung wegen der quadratischen Abhängigkeit des Winkels an und schlug einen korrigierten Exponenten von $n = 0,5$ vor. Im nachfolgenden wird die äquivalente Schleierleuchtdichte, für die trockene und nasse Fahrbahn, anhand der drei Modelle bestimmt.

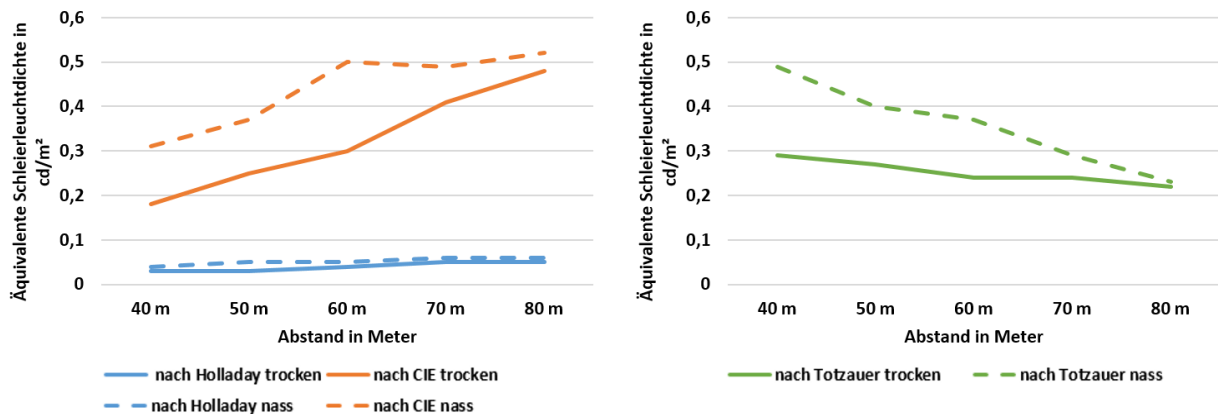


Abbildung 7-7: Äquivalente Schleierleuchtdichte anhand der unterschiedlichen Modelle **links:** nach HOLLADAY und CIE, **rechts:** nach TOTZAUER

Die in Abbildung 7-7 gezeigten äquivalenten Schleierleuchtdichten weisen sowohl unterschiedliche Verläufe, als auch unterschiedliche Werte auf. Die Verläufe nach CIE und HOLLADAY steigen mit größer werdendem Abstand, eine Tatsache, die nicht mit dem erwarteten Verlauf übereinstimmt. Demnach steigt die äquivalente Schleierleuchtdichte mit größer werdendem Abstand und kleiner werdender Beleuchtungsstärke am Fahrerauge. Bei dem Verlauf nach TOTZAUER [64] ist ein fallender Verlauf zu erkennen, der eher einer realen Verkehrssituation entspricht. Die kompletten Ver-

läufe der äquivalenten Schleierleuchtdichte, sowie die resultierenden Schwellkontraste mit Blendquelle, sind im Anhang in *Abbildung A-16* bis *Abbildung A-19* zu finden. Die in *Abbildung 7-7* gezeigten äquivalenten Schleierleuchtdichten erlauben allerdings keine direkten Schlüsse auf die physiologische Blendung. In *Abbildung 6-14* wurde eine Korrelation zwischen der psychologischen Blendung und der maximalen Beleuchtungsstärke gezeigt, bei der eine Beleuchtungsstärke von etwa 1,2 lx bei einer de Boer Bewertung von 5 ermittelt wurde. Diese Beleuchtungsstärke entspricht dem Maximum auf trockener Fahrbahn bei einem Abstand von etwa 12 m (vgl. *Abbildung 6-9*), woraus ein Blendwinkel von 16° resultiert. Unter diesen Voraussetzungen kann ein Grenzwert der äquivalenten Schleierleuchtdichte mit den drei Modellen berechnet werden, ab dem eine Blendung und demzufolge eine Beeinträchtigung der Sehleistung resultieren würde. Als Vergleichswert, kann aus der Untersuchung von SPRUTE [93] ebenfalls ein Grenzwert berechnet werden, der unter einem Winkel von etwa 32°, eine Blendbeleuchtungsstärke von 2 lx angibt [93]. Ein Vergleich der berechneten Grenzwerte der äquivalenten Schleierleuchtdichte, anhand der drei Modelle, wird in *Tabelle 7-1* gezeigt. Bei allen Berechnungen wird ein konstanter Altersfaktor angenommen, der von einem in diesem Feldtest durchschnittlichem Alter von 28 ausgeht. Als Exponent wird bei beiden Berechnungen ein Wert nach TOTZAUER [64] von $n = 0,5$ gewählt.

Tabelle 7-1: Vergleich der Grenzwerte der äquivalenten Schleierleuchtdichte

	Äquivalente Schleierleuchtdichte anhand des aktuellen Feldtests	Äquivalente Schleierleuchtdichte anhand der Ergebnisse von SPRUTE
Grenzwert nach HOLLADAY	0,005 cd/m ²	0,002 cd/m ²
Grenzwert nach CIE	0,028 cd/m ²	0,012 cd/m ²
Grenzwert nach TOTZAUER	0,313 cd/m ²	0,374 cd/m ²

Die gezeigten Grenzwerte, die auf den Ergebnissen des aktuellen Feldtest und der Daten von SPRUTE [93] beruhen, sind relativ betrachtet sehr ähnlich, da im Maximum ein Unterschied von 0,06 cd/m² zu beobachten ist. Unter der Annahme, dass bei einem Abstand von 60 m keine physiologische Blendung auftritt (kein signifikanter Unterschied der Detektionsentfernungen zwischen trockener und nasser Fahrbahn vgl. *Abbildung 6-15*), werden die Grenzwerte aus *Tabelle 7-1* mit den äquivalenten Schleierleuchtdichten aus *Abbildung 7-7* verglichen. Der Grenzwert nach HOLLADAY (0,005 cd/m²) ist kleiner als die nach Holladay ermittelten Schleierleuchtdichten aus *Abbildung 7-7* sowohl auf trockener als auch auf nasser Fahrbahn (Maximum trocken: 0,05 cd/m² und Maximum nass: 0,06 cd/m²). Ein ähnliches Verhalten ist auch für die Werte anhand der CIE zu erkennen, weshalb eine physiologische Blendung die Folge wäre. Dies widerspricht allerdings der ursprünglichen Annahme.

Bei der Betrachtung der äquivalenten Schleierleuchtdichte nach TOTZAUER (vgl. *Abbildung 7-7*), ergibt sich bei einem Abstand von 60 m und trockener Fahrbahn ein Wert von 0,24 cd/m², der sich bei nasser Fahrbahn auf 0,37 cd/m² erhöht. Die äquivalente Schleierleuchtdichte liegt somit direkt auf dem Grenzwert der nach *Tabelle 7-1* berechnet wurde. In *Abbildung 7-8* sind die Ergebnisse einer Simulation zu sehen, bei der die äquivalenten Schleierleuchtdichten der trockenen und nas-

sen Fahrbahn, sowie der Grenzwert mit unterschiedlichen Exponenten berechnet wurde. Dargestellt sind die Grenzwerte aus dem aktuellen Feldtest, sowie die nach SPRUTE berechneten Grenzwerte.

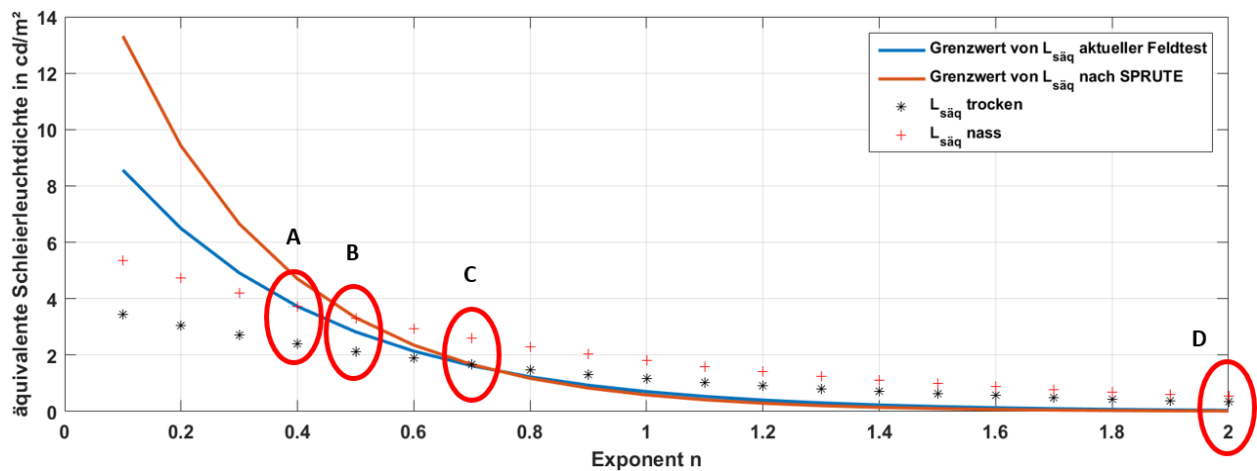


Abbildung 7-8: Äquivalente Schleierleuchtdichte mit unterschiedlichen Exponenten n , Sterne zeigen die trockene und Kreuze die nasse $L_{s\ddot{a}q}$. Die blaue Linie zeigt den ermittelten Grenzwert von $L_{s\ddot{a}q}$ in Abhängigkeit der Exponenten anhand des aktuellen Feldtest und die orangene den nach SPRUTE. **A:** Exponent n anhand des aktuellen Feldtest bei nasser Fahrbahn, **B:** Exponent n nach TOTZAUER, **C:** Exponent n anhand des aktuellen Feldtest bei trockener Fahrbahn und **D:** Exponent n nach HOLLADAY

Die durchgezogenen Linien geben den Grenzwert der äquivalenten Schleierleuchtdichte an, ab dem es zu einer physiologischen Blendung kommen würde. Die orangene Linie zeigt den Grenzwert anhand der Daten von SPRUTE und die blaue die aus dem aktuellem Feldtest. Bei Exponenten bis etwa 0,7 sind keine Unterschiede zwischen den beiden Grenzzlinien erkennbar und bei kleiner werdenden Exponenten treten bei der Grenzzlinie nach SPRUTE erhöhte äquivalente Schleierleuchtdichten auf. Die schwarzen Sterne bzw. roten Kreuze geben die äquivalente Schleierleuchtdichte bei trockener und nasser Fahrbahn an, die bei einem Abstand von 60 m durch die Blendquelle auf den Fahrer einwirken würde. Ein Exponent von $n = 2$ wird von HOLLADAY benutzt bei dem zu erkennen ist, dass beide Grenzwerte deutlich unterhalb der berechneten äquivalenten Schleierleuchtdichte sind und dadurch eine physiologische Blendung auftreten würde (vgl. *Abbildung 7-8 D*). Wie zu erwarten, steigt mit fallendem Exponent die äquivalente Schleierleuchtdichte und bei einem Wert von $n = 0,5$, schneidet die äquivalente Schleierleuchtdichte der nassen Fahrbahn den Grenzwert nach SPRUTE (vgl. *Abbildung 7-8 B*).

Da bei nasser Fahrbahn die Blendbeleuchtungsstärke nicht wie bei trockener Fahrbahn vom direkten Scheinwerferlicht bestimmt wird, sondern vom indirekten durch Vorwärtsreflexionen der Fahrbahn, wird bei nasser Fahrbahn die Blendquelle vom Fahrer größer und unter einem unterschiedlichen Winkel wahrgenommen. Dies führt zur Annahme, dass bei trockener und nasser Fahrbahn unterschiedliche Exponenten n die äquivalente Schleierleuchtdichte bestimmen. Somit ergibt sich bei trockener Fahrbahn ein Exponent von 0,7 (vgl. *Abbildung 7-8 C*) und bei nasser Fahrbahn ein Exponent von 0,4 (vgl. *Abbildung 7-8 A*). Bei der Bestimmung der Exponenten wird davon ausgegangen, dass sowohl auf trockener als auch auf nasser Fahrbahn die Probanden eine Blendung empfinden, die an der Grenze zwischen nicht blendend und blendend ist (vgl. *Tabelle A-3* und

Tabelle A-4). Somit ergibt sich als maßgebliche Größe zur Bestimmung der physiologischen Blendung, die Beleuchtungsstärke auf Fahreraugenposition, sowie der dazugehörige Blendwinkel.

Neben den vorhandenen Modellen zur Bestimmung der physiologischen Blendung aus der Blendbeleuchtungsstärke und des dazugehörigen Winkels, wurde in Kapitel 3.4 ein möglicher Zusammenhang zwischen der psychologischen Blendung und dem Schwellkontrast dargestellt (vgl. *Abbildung 3-18*). Im Folgenden wird diese Korrelation verwendet, um von den psychologischen Ergebnissen aus Kapitel 6, den Schwellkontrast zu bestimmen. Der daraus errechnete Schwellkontrast wird im Anschluss mit bereits erlangten Ergebnissen verglichen und auf Plausibilität überprüft. In *Abbildung 7-9* werden die berechneten Schwellkontraste für trockene und nasse Fahrbahn, jeweils mit und ohne Blendquelle dargestellt. Die berechneten Schwellkontraste basieren auf den in *Abbildung 6-6* gezeigten medianen de Boer Bewertungen.

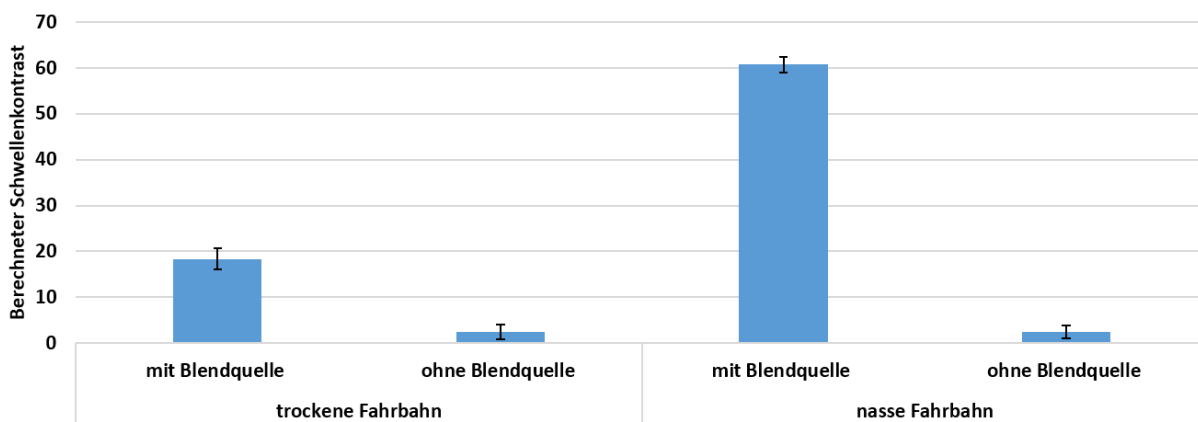


Abbildung 7-9: Berechneter Schwellkontrast nach Kapitel 3.4

Auch ohne eine Signifikanzanalyse durchzuführen ist ersichtlich, dass mit vorhandener Blendquelle, ein deutlich erhöhter Schwellkontrast bei nasser Fahrbahn erscheint. Die gezeigte Erhöhung des Schwellkontrastes würde zu einer Beeinträchtigung der Sehleistung führen, wodurch auch die Detektionsabstände stark voneinander variieren würden. In *Abbildung 6-15* wird allerdings das Gegenteil gezeigt. Die in Kapitel 3.4 gezeigte Korrelation zwischen der physiologischen mit der psychologischen Blendung ist demzufolge nur bedingt zulässig. Auf diese Aussage weisen viele Literaturstellen hin, dass die Effekte voneinander unabhängig zu betrachten sind und auch unabhängig voneinander auftreten können [75], [76], [137], [138]. Ein potentieller Grund dafür, dass die in Kapitel 3.4 gezeigte Korrelation nicht übertragbar ist, könnte in den unterschiedlichen Spektren der untersuchten Scheinwerfer liegen. Während in Kapitel 3.4 Halogen-, HID- und LED-Scheinwerfer verwendet wurden, werden im Kapitel 6 lediglich LED-Scheinwerfer verwendet. Dies führt beispielsweise Anhand von Vos, BULLOUGH, BOUMA und FLANNAGAN zu einer Erhöhung der physiologischen nicht aber der psychologischen Blendung [76], [79], [80], [81], [82], [83], [86]. Ein weiterer potentieller Grund könnte in der Größe und im Abstand der Blendquelle liegen. Während bei trockener Fahrbahn, die direkten Lichtstrahlen für die Blendung des Gegenverkehrs verantwortlich sind, sind es bei nasser Fahrbahn die indirekten Reflexionen von der Fahrbahn [133]. Ebenfalls ändert sich der Abstand und demzufolge auch der Winkel, in dem die maximale Beleuch-

tungsstärke bei nasser Fahrbahn erscheint [129], [130]. Dies beeinflusst beispielsweise nach BOCKELMANN und FLANNAGAN wiederum die physiologische Blendung aber nicht die psychologische [83], [71].

Zur Bestimmung der physiologischen Blendung bestehen in der Literatur verschiedene Modelle, die in ihrer Mehrheit aus Laboruntersuchungen bestimmt wurden. Im Folgenden wird untersucht, inwieweit die Modelle im realen Straßenverkehr angewendet werden können. Bewegt sich eine Blendquelle vom peripherem in den fovealen Bereich, erhöht sich in der Regel die Blendung des Beobachters. Dies wird in den gängigen Blendungsmodellen dadurch zum Ausdruck gebracht, dass der Blendwinkel antiproportional zur Blendbeleuchtungsstärke ist. Dem gegenüber steht bei einer realen Begegnungssituation, dass große Abstände zu kleineren Blendwinkel führen und sich der Sehwinkel eines Scheinwerfers mit abnehmendem Abstand vergrößert. Je nach Gewichtung des Blendwinkels, führt dieses Vorgehen zu widersprüchlichen Ergebnissen der alltäglichen Beobachtung, dass die Blendung im Gegenverkehr mit zunehmender Entfernung kleiner wird.

Die Holladay-Gleichung nach (2-5) als Beispiel nehmend, würde die Schleierleuchtdichte mit abnehmendem Blendwinkel quadratisch zunehmen, unter der Bedingung, dass die Lichtquelle unverändert betrachtet würde. Bei einer Begegnungssituation allerdings verändert sich der Abstand und die Größe der Lichtquelle, wodurch die Beleuchtungsstärke, anhand des photometrischen Entfernungsgesetztes quadratisch abnimmt. Beide Effekte würden sich demzufolge aufheben und ein Scheinwerfer würde unabhängig von der Entfernung immer gleich stark blenden. Eine Anwendung der Holladay-Formel auf den realen Verkehrsraum erscheint demzufolge ungeeignet, da eine solche Gegebenheit nicht vorliegt.

Bei der CIE-Formel nach (2-6) bzw. (2-7) fließt der Blendwinkel sogar kubisch in die Berechnung der äquivalenten Schleierleuchtdichte mit ein, weshalb eine noch schlechtere Übereinstimmung mit Realitätsbedingungen sich zeigt (vgl. *Abbildung A-16* bis *Abbildung A-18*). Anhand der Gleichung wird bei größerem Abstand, eine höhere Blendung vorausgesagt, da der Blendwinkel kubisch abnimmt, die Beleuchtungsstärke jedoch nur quadratisch. Lediglich die überarbeitete Holladay-Gleichung mit dem Winklexponent von $n = 0,5$ nach TOTZAUER scheint einen auf die Realität übertragbaren Verlauf aufzuweisen. Da TOTZAUER die Formel unter realen Feldtest bestimmt hat und die physiologische Blendung nach VOS Wellenlängenunabhängig ist, liegt die Vermutung nahe, dass die Unterschiede in der Adaptation zu finden sind. Dies bestätigt auch beispielsweise DAMASKY, der eine Abhängigkeit der Kontrastwahrnehmung von der Vorfeldbeleuchtung der eigenen Scheinwerfer, feststellte [44].

Unabhängig davon, ob eine Korrelation zwischen der physiologischen und der psychologischen Blendung besteht oder nicht, so ist beim nach TOTZAUER ermittelten Verlauf, ein realistischer Zusammenhang zwischen der äquivalenten Schleierleuchtdichte und dem Abstand festzustellen. Mit zunehmendem Abstand zwischen Blendfahrzeug und Testfahrzeug in dem der Proband sitzt, wird die äquivalente Schleierleuchtdichte geringer. Dieses Ergebnis lässt vermuten, dass die bisher unter Laborbedingungen durchgeführten Untersuchungen nicht ohne weiteres auf reale Straßenbedingungen angewendet werden können. Dieser Ansicht sind auch SPRUTE und TOTZAUER, die gängige Modelle auf ihre Praxisnähe untersucht haben. [13], [64]

8 Kritik, Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel gibt eine kritische Übersicht über die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und beschreibt Anregungen für weiterführende Untersuchungen. Generell beschäftigt sich diese Arbeit mit insgesamt zwei Themengebieten hinsichtlich der von Kraftfahrzeugscheinwerfern ausgehenden Blendung, die in vier Feldversuchen überprüft wurden.

1. Besteht bei Scheinwerfern, die einen Lichtstrom unter 2000 lm aufweisen und somit keine aLWR bzw. SRA verbaut haben müssen, ein geringeres Blendungsrisiko?
2. Inwieweit können blendfreie Fernlichtsysteme bei alltäglichen Begegnungssituationen hinsichtlich Blendung und Detektion optimiert werden?

Zur Klärung der ersten Frage, wurde bei zwei unabhängig voneinander durchgeführten Feldtest, die Blendung von Scheinwerfern mit einer Lichtquelle unter 2000 lm untersucht und mit Scheinwerfern über 2000 lm verglichen. Beim ersten Feldtest wurden dazu der Einfluss der Beladung sowie der Fahrwerkshärte bei aktivierter und deaktivierter dLWR auf die physiologische und psychologische Blendung untersucht. Verwendet wurden Fahrzeuge mit Halogen-, HID- und LED-Scheinwerfer, die dynamisch auf statisch positionierte Fahrzeuge zufuhren, in denen Probanden die Blendung bewerteten. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Deaktivierung der vorgeschriebenen dLWR unabhängig von den verwendeten Scheinwerfern, zu einer Steigerung der physiologischen und psychologischen Blendung führt. Hierbei wurden Unterschiede in der Regelung der dLWR gezeigt, die abhängig von den Nickbewegungen des Fahrzeuges, zu Abweichungen in den Latenzzeiten der dLWR führen. Es hat sich herausgestellt, dass die Nickbewegungen des Fahrzeuges mit der Härte des Fahrwerkes in Verbindung stehen, wodurch eine Verhärtung der Fahrwerke, zu einer Steigerung der beiden Blendungsarten führt. Die erzielten Ergebnisse konnten durch photometrische Messungen bestätigt werden. Bei einem Fahrzeug wurden die HID-Scheinwerfer mit Halogen-Scheinwerfern getauscht, um einen direkten Vergleich, unabhängig der Fahrzeugdynamik zu erhalten. Entgegen der Erwartung, stellte sich eine signifikant höhere psychologische Blendung bei den Halogen-Scheinwerfern heraus. Bei einem zweiten Fahrzeug mit Halogen-Scheinwerfern und gleichen Leuchtmittel stellte sich dagegen sowohl messtechnisch als auch blendungstechnisch ein geringerer Einfluss auf das Empfinden der Probanden heraus. Demzufolge sind eine Vielzahl an Parameter dafür verantwortlich, ob ein Scheinwerfer als blendend bewertet wird oder nicht. Allerdings kann der Einfluss auf die Blendung von Scheinwerfern mit Lichtquellen unter 2000 lm, nicht vernachlässigt werden, weshalb empfohlen wird, eine aLWR bzw. dLWR mit geringer Latenzzeit in jedem Fahrzeug zu verbauen.

Da neben der aLWR auch die SRA mit der 2000 lm Grenze verknüpft ist und deren Wegfall zu verschmutzten Scheinwerfern führen würde, wird beim zweiten Feldtest der Einfluss der Verschmutzung auf die Lichtverteilung untersucht. Hierfür wurde auf einem abgesperrten Rundkurs, die Fahrbahn manuell verschmutzt und die Lichtverteilung der verschmutzten, SRA- und handgereinigten Scheinwerfer in Form einer Leuchtdichteaufnahme vermessen. Verwendet wurden Fahrzeuge mit Halogen- und LED-Scheinwerfer, die nach einer zurückgelegten Strecke von 1,2 km bis 9,6 km vermessen wurden. Neben den Lichtverteilungen für Abblendlicht, wurden auch blendfreie Lichtverteilungen untersucht, die einen ausgeblendeten Bereich von 3° aufweisen und somit die Verkehrssituation eines entgegenkommenden Fahrzeuges in 50 m simulieren. Die Ergebnisse bei

den Abblendlichtverteilungen zeigen, dass die HDG bei Verschmutzung als Streulichtübergang dient. Im Bereich unterhalb der HDG, der für die Sichtweite des Fahrers verantwortlich ist, verringert sich die Intensität, während oberhalb der HDG, im Blend-Bereich, Streulicht entsteht. Das meiste Streulicht entsteht dabei in der Region, in der auch die höchste Intensität unterhalb der HDG auftritt. Da der untersuchte Halogen-Scheinwerfer, absolut betrachtet, die höchsten Intensitäten aufweist, wird dieser durch die Verschmutzung stärker beeinflusst als der LED-Scheinwerfer. Ein weiterer potentieller Grund für die erhöhten Streulichtwerte des Halogen-Scheinwerfers könnte in der Art des lichterzeugenden Systems liegen. Während der Halogen-Scheinwerfer ein Reflexionssystem verwendet, wird beim LED-Scheinwerfer ein Projektionssystem benutzt. Lichtstrahlen können an der verschmutzten Abschlusscheibe wieder in den Reflektor hinein reflektiert und erneut hinausreflektiert werden. Beim Projektionssystem dagegen werden aufbaubedingt, die in den Scheinwerfer hineinreflektierenden Lichtstrahlen größtenteils absorbiert. Um dies zweifelsfrei zu klären, wären weitere Untersuchungen notwendig, die den Strahlengang im Scheinwerfer analysiert. Blendfreie Fernlichtsysteme weisen bei steigendem Verschmutzungsgrad, durch die drei HDG, einen exponentiellen Anstieg des Streulichts im ausgeblendeten Bereich auf. Dies führt zu einer höheren Blendungsbelastung anderer Verkehrsteilnehmer. Durch die Verwendung einer SRA wird der handgereinigte Zustand bei keinem geprüfem System erreicht, allerdings verringert die Verwendung einer SRA die Blendung bei hohen Verschmutzungen und führt gleichzeitig zu einer besseren Sichtweite des Fahrers.

Die beiden Feldtests haben gezeigt, dass Fahrzeugdynamikbewegungen zu einer erhöhten Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führen und verschmutzte Scheinwerfer darüber hinaus, auch eine reduzierte Sichtweite des Fahrers verursachen. Einige der untersuchten Halogen-Scheinwerfer, die unterhalb der 2000 lm Grenze sind, verursachen ein höheres bzw. gleiches Blendungsrisiko wie HID- und LED-Scheinwerfer, die oberhalb der 2000 lm Grenze sind. Am Beispiel der dLWR konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung der dLWR die psychologische Blendung um etwa 2 Bewertungspunkte und die physiologische Blendung um etwa 35 % gesenkt werden konnte. Kombiniert man beide Aussagen, so wird empfohlen, die dLWR unabhängig von Lichtstrom in jedem Fahrzeug zu verbauen. Eine SRA sollte dagegen lediglich in winterlichen Regionen verpflichtend sein, in denen eine hohe Verschmutzung der Scheinwerfer auftauchen kann.

Der dritte und vierte Feldtest dieser Arbeit widmen sich der zweiten Fragestellung, inwieweit blendfreie Lichtsystem unter alltäglichen Situationen optimiert werden können. Hierzu wurde beim dritten Feldtest eine Begegnungssituation mit Verkehrszeichen untersucht, da diese durch ihre retroreflektierende Eigenschaft das auftreffende Fernlicht zurück zum Fahrer reflektieren und diesen einerseits blenden und andererseits zu einem verschlechterten Lesbarkeitsabstand führen. Die Verkehrszeichen befanden sich an den häufigsten im Straßenverkehr befindlichen Positionen, links, rechts, beidseitig und frontal, wobei letzteres ein Verkehrszeichen vor einer Kurve simuliert. Verwendet wurden Verkehrszeichen, die den höchsten Rückstrahlwert besitzen und deshalb meist auf Autobahnen und Landstraßen zu finden sind. Als Testfahrzeug wurde ein Fahrzeug verwendet, bei dem das komplette Fernlicht stufenlos abgedunkelt werden konnte, wodurch die Verkehrsschilder mit unterschiedlichen Helligkeiten angeleuchtet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass eine optimale Helligkeitsbewertung bei einer Lichtstärke von etwa 35000 cd erreicht wird, bei dem die Blendungswahrscheinlichkeit unter 5 % liegt und ein Lesbarkeitsgewinn von etwa 25 m, im Vergleich zu Abblendlicht, erzielt wird. Ein Unterschied, der auf die unterschiedliche Positionierung

bzw. Farbkontraste der Verkehrszeichen zurückzuführen ist, konnte nicht bestätigt werden. Alle Verkehrszeichen werden bei einem Sehwinkel von $0,4^\circ$ gelesen, wobei zum Zeitpunkt der Lesbarkeit, eine Leuchtdichte von etwa 170 cd/m^2 gemessen wurde. Aus Gründen der Reproduzierbarkeit wurde im vorliegendem Feldtest, das komplette Fernlicht abgedunkelt. Unter realen Straßenbedingungen würde das blendfreie Fernlichtsystem allerdings lediglich den Bereich abdunkeln, indem sich das Verkehrszeichen befindet. Auftretende Negativkontraste könnten die Lesbarkeit des Verkehrsschildes beeinflussen. Aus diesem Grund könnte in zukünftigen Arbeiten dieser Effekt näher untersucht werden, wobei auch die Breite und die Schaltzeit des abgedunkelten Bereichs, näher analysiert werden sollten. In einer Simulation wurde die dynamische Anleuchtung des Verkehrszeichens nachempfunden, bei der es abstandsabhängig, stets mit einer Leuchtdichte von 170 cd/m^2 angeleuchtet wird. Die Ergebnisse zeigen, dass der Abstand der ersten Abdunkelung, von der Größe des Verkehrszeichens abhängig ist und eine minimale Auflösung der Kamera von $0,1^\circ$ nötig ist. Diese Verteilung könnte unter realen Bedingungen validiert werden.

Beim vierten und letzten Feldtest wurde der Einfluss einer nassen Fahrbahn auf die Blendung von entgegenkommenden Verkehrsteilnehmern und die Sichtweite des Fahrers untersucht. Hierfür wurde eine Begegnungssituation, mit einem stehendem Blendfahrzeug und einem dynamisch darauf zufahrenden Testfahrzeug, nachgestellt. Bei beiden Fahrzeugen wurde das Abblendlicht abgedunkelt und die Helligkeit, Blendung sowie die Sichtweite, in Form der Detektion eines Objektes, untersucht. Nachdem die Fahrten auf trockener Fahrbahn durchgeführt worden sind, wurde die Fahrbahn bewässert und die Fahrten auf der nun nassen Fahrbahn wiederholt. Bewässert wurden die beiden Spuren vor dem Blendfahrzeug über eine Länge von 100 m mit 2500 l Wasser. Dies entspricht dem doppelten Tages-Niederschlagsdurchschnitt von Deutschland und korrespondiert wegen der kurzen Zeitdauer in der das Wasser auf der Fahrbahn verteilt wird, mit Starkregen. Ein Vergleich mit den aus der Literatur bekannten Bewässerungsmengen weist Unterschiede auf, die sich zwischen „Starkregen“ und „Gewitterregen“ aufzeigen. Um eine vergleichbare Bewässerungsmenge zu bekommen, müsste statt der verwendeten 2500 l Wasser, mindestens 650 l mehr Wasser verwendet werden. Dies gestaltete sich nicht möglich, da mit dem Gewicht des Wassers, die maximale Achslast des Anhängers, bzw. die maximale Zuglast des Fahrzeuges schon überschritten war. Eine erneute Befüllung des Anhängers, kam aus Zeitgründen nicht in Frage, um die Probanden nicht zusätzlich zu belasten bzw. einer Ermüdung vorzubeugen. Zukünftige Arbeiten könnten eine potentielle Korrelation zwischen dem Nässegrad und der Vorwärtsreflexion aufdecken. Bei trockener Fahrbahn wird eine optimale Helligkeit bei nicht abgedunkelten Scheinwerfern erzielt. Bei nasser Fahrbahn dagegen, weist das Helligkeitsempfinden eine starke Abhängigkeit, von der Helligkeit beider Fahrzeuge auf. Die Blendungsbewertung hängt, sowohl bei trockener und nasser Fahrbahn, von der Helligkeit des entgegenkommenden Fahrzeuges ab, wobei eine nasse Fahrbahn, höhere Blendung durch Vorwärtsreflexionen verursacht. Durch eine Abdunkelung von 50 % des Abblendlichtes ist es möglich, die de Boer Bewertung auf einen Wert von 5 zu senken, wobei gleichzeitig die Detektionswahrscheinlichkeit erhöht werden kann. Eine separate Anpassung der Helligkeit der Seitenausleuchtung, wie es in einigen Literaturquellen beschreiben ist, wurde nicht explizit untersucht. Dies könnte in zukünftigen Arbeiten weiterer Berücksichtigung finden. Allerdings konnte eine dynamische Vorfeldbeleuchtung abgeleitet werden, die eine partielle Abdunkelung der Vorfeldbeleuchtung beschreibt.

Die beiden letzten vorgestellten Feldtests zeigen, inwieweit blendfreie Fernlichtsysteme bei alltäglichen Blendungssituationen hinsichtlich Blendung und Sichtweite des Fahrers optimiert werden können. Hierbei sind lediglich kleine Anpassungen im Algorithmus des blendfreien Fernlichtsystems nötig, um die Verkehrssicherheit zu erhöhen. So kann beispielsweise ein Verkehrszeichen, mit der optimalen Anleuchtung, bis zu 25 m früher erkannt werden, ein Abstand, der bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h einen zusätzlichen Gewinn von etwa einer Sekunde bedeutet. Eine Reduzierung der Helligkeit des Abblendlichtes, kann bei nasser Fahrbahn die psychologische Blendung um etwa 2 Bewertungspunkte verringern und gleichzeitig zu einer höheren Detektionswahrscheinlichkeit führen.

Hinsichtlich der psychologischen Blendung, konnte eine Korrelation gefunden werden, mit der aus dem Beleuchtungsstärkeverlauf, eine Blendungsbewertung auf der de Boer Skala abgeleitet werden kann. Diese Korrelation besteht aus dem Zusammenhang der maximal auftretenden Beleuchtungsstärke zur Adaptations-Beleuchtungsstärke und beschreibt eine Grenzlinie zwischen blendend und nicht blendend. Die Adaptations-Beleuchtungsstärke besteht aus dem gleitendem Mittelwert, fünf Sekunden vor Erreichen des Maximums. Der Zusammenhang ist auch auf Lichtpulse übertragbar, die beispielsweise durch Fahrzeugdynamikbewegungen auftreten können. Eine Validierung dieses Zusammenhangs erfolgte an zwei weiteren Feldtests, wobei auf die Streuung der de Boer Bewertungen zu achten ist, die bei Daten nahe der Grenzlinie zu Unsicherheiten führen kann. Der Vorteil dieses Zusammenhangs besteht darin, dass aus der LVK eines Scheinwerfers, dessen potentielle Blendung bewertet werden kann. Ebenfalls hat sich herausgestellt, dass die psychologische Blendung Anhand der de Boer Bewertung, mit der maximalen Beleuchtungsstärke während einer Begegnungssituation korreliert. Die maximale Beleuchtungsstärke tritt dabei meistens in geringen Begegnungsentfernungen auf und bildet somit den Abschluss der zu bewertenden Fahrt. Da die de Boer Bewertung im Grunde aus dem Mittelwert des Blendeindrucks während der Begegnungssituation besteht, wird dieser maßgeblich von den hohen Beleuchtungsstärken am Ende einer Fahrt beeinflusst. Dieser Zusammenhang konnte in zwei Feldtests beobachtet werden, bei denen die psychologische Blendung bei einer Begegnungssituation bewertet wurde.

Die physiologische Blendung wird maßgeblich durch eine photometrische Größe, der Blendbeleuchtungsstärke, sowie dessen Winkel beeinträchtigt. Aus diesen beiden Größen kann die äquivalente Schleierleuchtdichte bestimmt werden, die zu einer Kontrastreduzierung führt, wodurch die Sehleistung beeinträchtigt wird. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Grenzwert der physiologischen Blendung durch die Ergebnisse von SPRUTE, sowie aus eigenen Ergebnissen abgeleitet und mit den berechneten äquivalenten Schleierleuchtdichten verglichen. Zur Bestimmung der äquivalenten Schleierleuchtdichte bestehen viele Methoden, von denen drei ausgewählt wurden und deren Ergebnisse miteinander verglichen. Während bei der Holladay- und der CIE-Formel eine starke Winkelabhängigkeit besteht, die zu unrealistischen Ergebnissen führt, konnte bei dem nach TOTZAUER [64] ermittelten Verlauf, ein realitätsnaher Zusammenhang zwischen der äquivalenten Schleierleuchtdichte und dem Abstand festgestellt werden. Dadurch konnte der ermittelte Grenzwert bestätigt werden, indem die daraus resultierende physiologische Blendung, mit den gemessenen Detektionseinstellungen verglichen wurde.

Unabhängig davon, ob eine Korrelation zwischen der physiologischen und der psychologischen Blendung besteht oder nicht, so konnte beim nach TOTZAUER [64] ermittelten Verlauf, ein auf die Realität übertragbarer Zusammenhang festgestellt werden. Dieses Ergebnis lässt vermuten, dass

die bisher unter Laborbedingungen durchgeführten Untersuchungen nicht ohne weiteres auf reale Straßenbedingungen angewendet werden können. Die Ergebnisse der durchgeführten Feldtests haben allerdings gezeigt, dass die Beleuchtungsstärke am Fahrerauge beide Blendungsarten beeinflusst. Durch die Ermittlung des messtechnischen Verlaufs der Beleuchtungsstärke, kann an Hand der gezeigten Ergebnisse, die physiologische und psychologische Blendung abgeleitet werden.

9 Literaturverzeichnis

- [1] SCHLAG, B.: Mehr Licht - mehr Sicht - mehr Sicherheit? – Zur Wirkung verbesserter Licht- und Sichtbedingungen auf das Fahrerverhalten, Wiesbaden, VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH, 1. Aufl., 1 online resource (128, 2009, ISBN 978-3-531-16527-1.
- [2] WINNER, H., HAKULI, S., LOTZ, F., SINGER, C., Hrsg.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZ Handbuch, Wiesbaden, Springer Fachmedien, 2014.
- [3] VOLKSWAGEN AG: ViaVision – Volkswagen Group - Nachrichten aus der mobilen Zukunft, 8 S.,
Quelle: <http://www.viavision.org/ftp/657.pdf>, VOLKSWAGEN AG, HRSG., 2011, abgerufen am 23.04.2018.
- [4] BAST: Unfälle in der Dunkelheit – Schriftenreihe Verkehrsrecht, Bonn, Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V., 24 S., 2003.
- [5] STATISTA: Anzahl der Getöteten bei Nachtunfällen im Straßenverkehr in Deutschland in den Jahren 1991 bis 2017,
Quelle: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/192487/umfrage/anzahl-der-getoeteten-bei-nachtunfaellen--in-deutschland/>, 2018, abgerufen am 28.09.2018.
- [6] ZDK: Licht-Test 2017,
Quelle: <http://www.licht-test.de/>, ZENTRALVERBAND DEUTSCHES KRAFTFAHRZEUGGEWERBE E. V., HRSG., 2017, abgerufen am 23.04.2018.
- [7] DR. DIETER ELLINGHAUS: Fahren bei Nacht – Eine Untersuchung über die objektive Gefährdung und das subjektive Erleben, Köln, GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE SOZIALPLANUNG UND PLANUNG MBH, HRSG., 1991.
- [8] STATISTA: Wovor fürchten Sie sich, wenn Sie im Dunkeln Auto fahren? – Autofahrer - Gefahren in der Dunkelheit,
Quelle: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/160048/umfrage/ Gefahren-fuer-autofahrer-bei-dunkelheit/>, 2008, abgerufen am 28.09.2018.
- [9] WALLENTOWITZ, H.; REIF, K.: Handbuch Kraftfahrzeugelektronik – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen, Wiesbaden, Friedr.Vieweg & Sohn Verlag GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, Online-Ressource, 2006, ISBN 3834891215.
- [10] HAMM, M.; HUHN, W.: Voll-LED-Scheinwerfer im Audi R8.
In: Automobiltechnische Zeitschrift, 10, 2008, S. 894–900.
- [11] WICHERT, G.: Gedanken zur Verbesserung des Kraftfahrzeug-Scheinwerferlichts.
In: Lichttechnik 22, 1970, S. 589–595.
- [12] HAMM, M.: Intelligente, adaptive Scheinwerfersysteme – Die Fahrzeug-Außenbeleuchtung der Zukunft.
In: Automobiltechnische Zeitschrift, 12, 2000, S. 1042–1047.
- [13] SPRUTE, J. H.: Entwicklung lichttechnischer Kriterien zur Blendungsminimierung von adaptiven Fernlichtsystemen, Dissertation.
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 2012.
- [14] AMSEL, C.: Die nächste Generation lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme.
In: Automobiltechnische Zeitschrift, 10, 2010, S. 758–763.

-
- [15] ZYDEK, B. W.: Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern unter dynamischen Bedingungen, Dissertation.
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 2014.
- [16] KHANH, T. Q.: Fahrzeugbeleuchtung, Festschrift 100 Jahre LiTG 1912 – 2012.
- [17] WELT.DE: Scheinwerfer-Reinigung vor dem aus – Konsequenz aus der neuen LED-Technik, 1 S.,
Quelle: <https://www.welt.de/motor/news/article121026536/Konsequenz-aus-der-neuen-LED-Technik.html>, 2013, abgerufen am 24.04.2018.
- [18] AUSTERSCHULTE, A.; DREIER, B.; ROSENHAHN, E.-O.: Analysis of Safety Aspects for LED Matrix High Beam Functions.
In: KHANH, T. Q., Hrsg., Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Herbert Utz Verlag GmbH, München, S. 330–339, 2013, ISBN 978-3-8316-4291-5.
- [19] KOBBERT, J.; KHANH, T. Q.: Feldtest zu Sichtbarkeitsweiten und Kontrastanalyse – Vergleich zwischen LED und Laserscheinwerfersystemen.
In: Automobiltechnische Zeitschrift, 2/2018, 2018, S. 68–71.
- [20] ALBOU, P.; BOINET, L.; RAVIER, J. P.: Very thin headlamp with laser sources.
In: KHANH, T. Q., Hrsg., Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Herbert Utz Verlag GmbH, München, S. 128–139, 2013, ISBN 978-3-8316-4291-5.
- [21] REISS, B.; RIPPERGER, J.: Lasertechnik für Außenbeleuchtung von Fahrzeugen.
In: Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 2017, 11, 2017, S. 54–58.
- [22] HELLA KGAA HUECK & CO.: LED Scheinwerfer – Hier finden Sie nützliches Wissen und wichtige Tipps rund um das Thema LED Scheinwerfer bei Fahrzeugen,
Quelle: <https://www.hella.com/techworld/de/Technik/Beleuchtung/LED-Scheinwerfer-833/>, abgerufen am 28.04.2018.
- [23] BERLITZ, S.; HAMM, M.; FUNK, C.: Matrix-LED-Scheinwerfer von Audi.
In: Automobiltechnische Zeitschrift, 3, 2014, S. 10–15.
- [24] LACHMAYER, R.; GÖTZ, M.; KLEINKES, M.; POHLMANN, W.: LED-Technik im Scheinwerfer – Neue Möglichkeiten mit Leuchtdioden.
In: Automobiltechnische Zeitschrift, 11, 2006, S. 956–961.
- [25] HAMM, M.: Safety Improvement generated by Pioneering New Matrix and Direction Indicator Functionalities.
In: KHANH, T. Q., Hrsg., Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Herbert Utz Verlag GmbH, München, S. 310–315, 2013, ISBN 978-3-8316-4291-5.
- [26] MAIER, M.; MOISEL, J.; HEROLD, F.: Multibeam-Scheinwerfer in der Mercedes-Benz CLS Klasse.
In: Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 117, 2, 2015, S. 16–21.
- [27] MBPASSIONBLOG: Autolicht der Zukunft: Intelligenter LED-Scheinwerfer mit 1024 Pixel,
Quelle: <https://blog.mercedes-benz-passion.com/2016/10/forschungsverbund-%CE%BCcfs-zeigt-autolicht-der-zukunft-intelligenter-led-scheinwerfer-mit-1-024-pixel/>, abgerufen am 25.09.2018.
-

-
- [28] ALFRED VOLLMER: Active-Matrix-LED-Licht (Pixellicht) für Frontscheinwerfer: 2020 in Serie – Matrix Reloaded,
Quelle: <https://www.all-electronics.de/active-matrix-led-licht-pixellicht-fuer-frontscheinwerfer-geht-2020-in-serie/>, AUTOMOBIL-ELEKTRONIK, HRSG., 2016, abgerufen am 24.09.2018.
- [29] DREIER, B.; ROSENHAHN, E.-O.: Camera Controlled Adaptive Cut-off and Adaptive Partial High Beam Application.
In: KHANH, T. Q., Hrsg., Proceedings of the 8th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Herbert Utz Verlag GmbH, München, S. 278–286, 2009, ISBN 978-3-8316-0904-8.
- [30] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN: Merkblatt für die Wahl der lichttechnischen Leistungsklasse von vertikalen Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen : M LV, Köln, 2011, ISBN 9783941790964.
- [31] DIN 67520-4, 67520, DIN EN: Retroreflektierende Materialien zur Verkehrssicherung Teil 4: Lichttechnische Mindestanforderungen an Reflexstoffe mikroprismatischer Materialien, 2005.
- [32] ORAFOL: Reflektierende Lösungen für Verkehrszeichen und Warnmarkierungen,
Quelle: https://www.orafol.com/tl_files/content/downloads/Brochures/rs/europe/de/orafol-rs-traffic-signs-and-construction-zones-de.pdf, 2015, abgerufen am 28.09.2018.
- [33] UNECE, R48, Regelung: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices [2016/1723], 7. Aufl., 30.09.2016.
- [34] UNECE, R45, Regelung: R45 - Uniform provisions concerning the approval of headlamp cleaners and of power-driven vehicles with regard to headlamp cleaners, 44. Aufl., 30.09.2014.
- [35] HAGENREINER, T.; KÖHLER, P.: Komponenteoptimierung durch wissensbasierte Konstruktionsmethoden.
In: Automobiltechnische Zeitschrift, 1, 2015, S. 74–79.
- [36] BMW-SCENE: Scheinwerferreinigungsanlage,
Quelle: <http://bmw-scene.de/information/news/detailansicht/article/scheinwerferreinigungsanlage.html>, abgerufen am 24.09.2018.
- [37] HUHN, W.: Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen der ECE-Regelungen, Dissertation.
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 1999.
- [38] JEBAS, C.: Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen, Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen. Fahrzeugtechnik, 73 S., 2008, ISBN 9783865098221.
- [39] WÖRDENWEBER, B.: Automotive lighting and human vision, Berlin, New York, Springer, 2007, ISBN 978-3-540-36696-6.
- [40] KASABA, Y.: An auto-leveling system using an acceleration sensor.
In: KHANH, T. Q., Hrsg., Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Herbert Utz Verlag GmbH, München, S. 29–37, 2015, ISBN 978-3-8316-4481-0.
-

-
- [41] HELLA KGAA HUECK & Co.: Leuchtweitenregulierung – Hier finden Sie nützlich Tipps rund um das Thema Leuchtweitenregulierung von Fahrzeugen, Deutschland, Quelle: <https://www.hella.com/techworld/de/Technik/Beleuchtung/Leuchtweitenregulierung-838/>, abgerufen am 28.04.2018.
- [42] GALL, D.; THIELE, E.: Adaptationsleuchtdichte und mittlere Leuchtdichte bei direktem und indirektem Sehen.
In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Ilmenau, Vol. 14, 3, 1968, S. 321–325.
- [43] LACHENMAYR, B. J.; FRIEDBURG, D.; HARTMANN, E.: Auge, Brille, Refraktion – Schober-Kurs: verstehen, lernen, anwenden,
Thieme e-book library, Stuttgart [u.a.], Thieme, 4. Aufl., Online-Ressource, 2006, ISBN 9783131395542.
- [44] DAMASKY, J.: Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer, Dissertation.
Technische Hochschule Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 1995.
- [45] FREIDING, A.: Untersuchungen zur spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges im mesopischen Bereich, Dissertation.
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, München, 2010.
- [46] SCHÄFER, S.: Rezeptororientierte Charakterisierung breitbandiger Spektren als Basis einer mesopischen Hellempfindung, Dissertation.
Technischen Universität Berlin, Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik, Berlin, 2012.
- [47] SCHMIDT, R. F., LANG, F., THEWS, G., Hrsg.: Physiologie des Menschen – mit Pathophysiologie,
Springer-Lehrbuch, Berlin, Heidelberg [u.a.], Springer, 994 S., 2005, ISBN 3-540-21882-3.
- [48] BAER, R., BARFUß, M., SEIFERT, D., Hrsg.: Beleuchtungstechnik, Berlin, Huss-Medien GmbH, 493 S., 2016, ISBN 9783341016343.
- [49] HENTSCHEL, H.-J., Hrsg.: Licht und Beleuchtung – Grundlagen und Anwendungen der Lichttechnik, Heidelberg, Hüthig, 386 S., 2002, ISBN 3-7785-2817-3.
- [50] GREEN, M., ALLEN, M. J., ABRAMS, B. S., WEINTRAUB, L., Hrsg.: Forensic vision with application to highway safety, Tucson, AZ, Lawyers & Judges Pub. Co., 496 S., 2008, ISBN 978-1-933264-54-7.
- [51] ROSENHAHN, E.-O.: Entwicklung von lichttechnischen Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer für Schlechtwetterbedingungen, Dissertation.
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 1999.
- [52] DIN EN 12665 - Entwurf, 12665, DIN EN: Licht und Beleuchtung – Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung; Deutsche und Englische Fassung prEN 12665:2016, 2016.
- [53] CIE, CIE 17.4 / CEI 50(845) / IEC 60050-845:1987, Wörterbuch: Internationales Wörterbuch der Lichttechnik, International Lighting Vocabulary, Commission International de l'Éclairage (CIE), Genf, 1987.
- [54] PARSONS, J. H.: Glare, its causes and effects.
In: The Lancet, Vol. 175, 4508, 1910, S. 234–236.
-

-
- [55] HOLLADAY, L. L.: The fundamentals of glare and visibility.
In: Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, Vol. 12, 1926, S. 271–319.
- [56] LINDNER, H.; KNOCH K.: Anpassungsleistungen des optischen Analysators.
In: Sehleistung des optischen Analysators, 1976.
- [57] GIUSEPPE COLICCHIA; ANDREA KÜNZL; HARTMUT WIESNER: Physik und Medizin – Sehen, München, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Ludwig-Maximilians-Universität München.
- [58] VÖLKER, S.: Blendung durch Kfz-Scheinwerfer im nächtlichen Straßenverkehr – Ein Review bis 2006 - Beschreibung, Maßzahlen, Bewertungsmethoden, Berlin, Universitätsverlag der TU Berlin, 2017, ISBN 978-3-7983-2956-0.
- [59] LANGE, H., Hrsg.: Handbuch für Beleuchtung, Landsberg, ecomed Sicherheit, 722 / Losebl.-Auszg, 1992, ISBN 3-609-75390-0.
- [60] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.: Schwellenleuchtdichteerhöhung als Blendungsbewertungskriterium.
In: Lichttechnik 10, 1971, S. 547–552.
- [61] LERMAN, S.: Radiant energy and the eye,
Functional ophthalmology, New York, Macmillan, xi, 321 s. : ill, 1980, ISBN 9780023699702.
- [62] STILES, W. S.: The Effect of Glare on the Brightness Difference Threshold.
In: Proceedings of the Royal Society of London Series B, 1929, S. 322–351.
- [63] CIE, CIE 146:2002, Wörterbuch: Collection on Glare, Commission International de l'Éclairage (CIE), Genf, 2002.
- [64] TOTZAUER, A.: Kalibrierung und Wahrnehmung von blendfreiem LED-Fernlicht, Dissertation.
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 2013.
- [65] IFA: Blendung - Theoretischer Hintergrund, 13 S., INSTITUT FÜR ARBEITSSCHUTZ DER DEUTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNG (IFA), Hrsg., abgerufen am 31.07.2015.
- [66] MAINSTER, M. A.; TIMBERLAKE, G. T.: Why HID headlights bother older drivers.
In: British Journal of Ophthalmology, 2003, S. 113–117.
- [67] LUCKIESH, M.: Brightness in visual field at borderline between comfort and discomfort (BCD).
In: Illuminating Engineering, 1949.
- [68] DE BOER, J. B., Hrsg.: Public Lighting,
Philips Technical Library, London, Cleaver-Hume, 1967.
- [69] DE BOER, J. B.; VAN HEEMSKERCK, V. J. F. T.: Observations on discomfort glare in street lighting; influence of the colour of the light, Zürich, 1955.
- [70] GELLATLY, A. W.; WEINTRAUB, D. J.: User Reconfigurations of the de boer rating scale for discomfort glare, UMTRY-90-20,
Quelle: <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/64065/79690.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, 1990.
- [71] BOCKELMANN, W.: Auge, Brille, Auto – Besser sehen, sicher fahren, Berlin, , New York, Springer Verlag, 2. Aufl., xiv, 672, 1987, ISBN 3540164294.
- [72] SIVAK, M.; SIMMONS, C. J.: Effect of headlamp area on discomfort glare.
In: Lighting Research and Technology, 1988.
-

-
- [73] MANZ, K., Hrsg.: The influence by size of headlamp on discomfort glare, Utz Verlag GmbH. Progress in Automobile Lighting Symposium, 2001.
- [74] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.; BINDELS, J. T. H.: Assessment of discomfort glare in motor vehicle lighting.
In: Lighting Research and Technology, Vol. 6, 2, 1974, S. 79–88.
- [75] THEEUWES, J.; ALFERDINCK, J. W. A. M.: The relation between discomfort glare and driving behavior, Report No. DOT HS 1996.
- [76] VOS, J. J.: Reflections on glare.
In: Lighting Research and Technology, Vol. 2003, 2, 2003, S. 163–176.
- [77] VOS, J. J.: On the cause of disability glare and its dependence on glare angle, age and ocular pigmentation.
In: Clinical and Experimental Optometry, Vol. 86, 2003, S. 363–370.
- [78] SCHREUDER, D. A.: White or yellow lights for vehicle head-lamps? – Technical Report, Voorburg, Netherlands, 1976.
- [79] BULLOUGH, J. D.; FU, Z.; VAN DERLOFSKE, J.: Discomfort and Disability Glare from Halogen and HID Headlamp Systems.
In: SAE INTERNATIONAL, Hrsg., Proceedings of the SAE World Congress 2002, 2002.
- [80] BOUMA P. J.: The problem of glare in highway lighting.
In: Philips Technical Review, 1936, S. 225–229.
- [81] FLANNAGAN, M. J.; SIVAK, M.; SIMMONS, C. J.: Effect of wavelength on discomfort glare from monochromatic sources, 1989.
- [82] BULLOUGH, J. D.: Traffic signal luminance and visual discomfort at night.
In: Transportation Research Record, 1754, 2001, S. 42–47.
- [83] FLANNAGAN, M. J.: Subjective and objective aspects of headlamp glare: effects of size and spectral power distribution;, UMTRI-99-36, TRANSPORTATION RESEARCH INSTITUTE (UMTRI), Hrsg., 1999.
- [84] LOCHER, J.; VÖLKER, S.: The influence of vehicle beam patterns on safety and acceptance, SAE (Hg.) 2004 – SAE 2004 World Congress & Exhibition.
- [85] OLSON, P. L.; SIVAK, M.: Discomfort glare from automobile headlights.
In: Illuminating Engineering, 13, 1984, S. 296–303.
- [86] FLANNAGAN, M. J.; SIVAK, M.; GELLATLY, A. W.: A field study of discomfort glare from high-intensity discharge headlamps, UMTRI 92-16, TRANSPORTATION RESEARCH INSTITUTE (UMTRI), Hrsg., 1992.
- [87] SIVAK, M.; FLANNAGAN, M. J.; SCHOETTLE, B.; MEFFORD, M. L.: Driving performance with and preference for HID headlamps,
UMTRI Reports, UMTRI-2002-3, Ann Arbor, UNIVERSITY OF MICHIGAN, HRSG., 2002.
- [88] BULLOUGH, J. D.; VAN DERLOFSKE, J.; DEE, P.; CHEN, J.; AKASHI, Y.: An Investigation of Headlamp Glare: – Intensity, Spectrum and Size, DOT 809 672, DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (DOT), NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA), Hrsg., 2003.
- [89] SIVAK, M.; SCHOETTLE, B.; MINODA, T.; FLANNAGAN, M. J.: Blue content of LED headlamps and discomfort glare,
UMTRI Reports, UMTRI-2005-2, Ann Arbor, UNIVERSITY OF MICHIGAN, HRSG., 2005.
-

-
- [90] SCHILLER, C.; SPRUTE, J. H.; HAFERKEMPER, N.; BODROGI, P. Z.; KHANH, T. Q.: Discomfort Glare of Tungsten Halogen and High Intensity Discharge Headlamps.
In: *Automobiltechnische Zeitschrift*, Vol. 111, 2, 2009, S. 132–138.
- [91] LOCHER, J.: Disability glare of Halogen, Xenon and LED headlamp systems.
In: KHANH, T. Q., Hrsg., *Proceedings of the 7th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Herbert Utz Verlag GmbH, München, S. 700–706, 2007, ISBN 978-3-8316-0711-2.
- [92] BÖHM, M.; LOCHER, J.: A Field Approach for Assessing Discomfort Glare from Automobile Headlamps.
In: KHANH, T. Q., Hrsg., *Proceedings of the 7th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Herbert Utz Verlag GmbH, München, 2007, ISBN 978-3-8316-0711-2.
- [93] SPRUTE, J. H.; SÖLLNER, S.; KHANH, T. Q.: Reduzierung der Blendung durch automatisch abblendende Fernlichtassistenten bzw. automatisch abblendende Innen- und Außenspiegel – Abschlussbericht REBLAFAIA - Forschungsauftrag der BAST, 82.352, BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN (BAST), Hrsg., 2011.
- [94] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.: Criteria for the visibility of road markings, Darmstadt, Technische Universität Darmstadt; Fachgebiet Lichttechnik, 2001.
- [95] KOSMAS, K.; KOBBERT, J.; KHANH, T. Q.: Anforderungen an die dynamische Leuchtweitenregelung zur Vermeidung der Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer, 82.0611, BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN (BAST), Hrsg., 2019.
- [96] LEHNERT, P.: Disability and Discomfort Glare under dynamic Conditions – The Effect of Glare Stimuli on the Human Vision.
In: SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J., Hrsg., *Proceedings of the Symposium Progress in Automobile Lighting*, Utz Verlag GmbH, München, S. 582–592, 2001.
- [97] FLANNAGAN, M. J.; SIVAK, M.; SCHOETTLE, B.: Benefits of headlamp leveling and cleaning for current U.S. low beams, UMTRI-2007-46, TRANSPORTATION RESEARCH INSTITUTE (UMTRI), Hrsg.,
Quelle: <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/58733/100247.pdf>, 2007.
- [98] FOTIOS, S.; GIBBONS, R. B.: Road lighting research for drivers and pedestrians: – The basis of luminance and illuminance recommendations, *Lighting Research and Technology LRT* 2018, S. 154–186.
- [99] ZYDEK, B. W.; HAFERKEMPER, N.; KHANH, T. Q.: Klettwitz Levelling Test: Analysis of Photometric Data and Comprehension.
In: KHANH, T. Q., Hrsg., *Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Herbert Utz Verlag GmbH, München, S. 110–115, 2013, ISBN 978-3-8316-4291-5.
- [100] § 50 Scheinwerfer für Fern- und Abblendlicht – StVZO, 2012.
- [101] STATISTA: Automodelle mit den meisten Neuzulassungen in Deutschland im Jahr 2016, Quelle: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/3149/umfrage/automodelle-mit-den-meisten-neuzulassungen-in-deutschland/>, 2017, abgerufen am 05.04.2018.
- [102] LEHNERT, P.: Auswirkungen der Fahrzeugdynamik auf die Lichtverteilung von Scheinwerfern, Dissertation.
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Darmstadt, 2001.
-

-
- [103] LOHNINGER, H.: Grundlagen der Statistik – z-Transformation,
Quelle: http://www.statistics4u.info/fundstat_germ/ee_ztransform.html, 2017, abgerufen am 09.04.2018.
- [104] JANSSEN, J.; LAATZ, W.: Statistische Datenanalyse mit SPSS – Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul Exakte Tests von Jürgen Janssen, Wilfried Laatz, Berlin, Heidelberg, Imprint: Springer, 804 S., 2013.
- [105] HEDDERICH, J.; SACHS, L.: Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R, Berlin, Heidelberg, Springer Spektrum, 15. Aufl., 969 S., 2016, ISBN 978-3-662-45691-0.
- [106] M. GREEN: How Long Does It Take to Stop? – Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times, *Transportation Human Factors*, 2010, S. 195–216.
- [107] KOSMAS, K.; KOBBERT, J.; KHANH, T. Q.: Optimale Verkehrszeichen-Leuchtdichte durch blendfreies Fernlicht.
In: *Automobiltechnische Zeitschrift*, 9, 2018, S. 84–87.
- [108] LINDAE, G.: Die Sichtweite des Abblendlichtes bei verschmutzten Streuscheiben.
In: *Bosch Technische Berichte*, Vol. 2, 4, 1968, S. 193–196.
- [109] RUMAR, K.: Dirty Headlights - Frequency and Visibility Effects.
In: *Ergonomics*, Vol. 17, 4, 1974, S. 529–533.
- [110] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.: Einfluß der Verschmutzung von Scheinwerfer-Streuscheiben auf die Sehweite von Kraftfahrern.
In: *Automobiltechnische Zeitschrift*, Vol. 80, 11, 1978, S. 519–521.
- [111] VAN LAARHOVEN, W.: The measurement of the influence of dirt on a round H4 headlamp, a modern aerodynamic H4 headlamp and a headlamp equipped with a gasdischarge light source, Arnhem, The Netherlands, 1994.
- [112] SIVAK, M.; FLANNAGAN, M. J.; TRAUBE, E. J.; KOJIMA, S.; AOKI, M.: Effects of realistic levels of dirt on light distribution of low-beam headlamps,
UMTRI Reports, UMTRI-96-10, Ann Arbor, UNIVERSITY OF MICHIGAN, HRSG., 1996.
- [113] SÖLLNER, S.; POLIN, D.; HAFERKEMPER, N.; KHANH, T. Q.: Wirksamkeit und Nutzen von Scheinwerferreinigungsanlagen.
In: *Automobiltechnische Zeitschrift*, Vol. 114, 2, 2012, S. 174–181.
- [114] SCHILLER, C.; KOSMAS, K.; KOBBERT, J.; KHANH, T. Q.: Influence of dirty headlamps on straylight and glare – A test series under real driving conditions.
In: CIES, Hrsg., *Proceedings of the 4th International Forum on Automotive Lighting (IFAL)*, S. 69–74, 2016.
- [115] SCHILLER, C.; KOSMAS, K.; KOBBERT, J.; KHANH, T. Q.: Dirty Headlamps - efficiency of Headlamp Cleaning Devices and the Impact on Stray light – Method and first results.
In: KHANH, T. Q., Hrsg., *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Herbert Utz Verlag GmbH, München, S. 145–154, 2017.
- [116] §3 Geschwindigkeit – StVZO.
- [117] BUßGELDKATALOG: Abstand im Straßenverkehr,
Quelle: <https://www.bussgeldkatalog.de/abstand/>, abgerufen am 25.09.2018.
- [118] KOSMAS, K.; KOBBERT, J.; KHANH, T. Q.: Field-test to determine the optimal traffic sign illumination based on glare-free high beam.
In: KHANH, T. Q., Hrsg., *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Herbert Utz Verlag GmbH, München, 2017.
-

-
- [119] AULBACH, J.: Ermittlung optimaler Farben und Formen zur Verbesserung von Leiteinrichtungen, insbesondere bei Dunkelheit – Abschlussbericht - Forschungsauftrag BAST, BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN (BAST), Hrsg., 1992.
- [120] FRANK, H.: Lichttechnische Anforderungen an vertikale Verkehrszeichen bei Dunkelheit, Dissertation.
Technische Universität Darmstadt, Fachbereich 17 - Elektrische Energietechnik, Darmstadt, 1994.
- [121] AULBACH, J.; FRANK, H.; MESEBERG, H.-H.: Research on the illuminance at traffic sign surfaces in real road situation caused by different headlamp types, Proceedings of PAL 1999.
- [122] LACHMAYER, R.; JURGENS, C.: Eigenblendung an retroreflektierenden Verkehrsschildern, VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik, S. 87–94.
- [123] DIN 67520, 67520, DIN: Retroreflektierende Materialien zur Verkehrssicherung – Lichttechnische Mindestanforderungen an Reflexstoffe, 2008, abgerufen am 2008.
- [124] UNECE, ECE R123, Regelung: Regelung Nr. 123 der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von adaptiven Frontbeleuchtungssystemen (AFS) für Kraftfahrzeuge, 2010.
- [125] SCHREIER, P.: Untersuchungen zur Eigenblendung des Fahrzeugführers durch Streulicht bei Nebel und Schnee sowie durch retroreflektierende Verkehrszeichen, Dissertation.
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Ilmenau, 2016.
- [126] KOSMAS, K.; KOBBERT, J.; KHANH, T. Q.: Glare-free High Beam: Optimal Traffic Sign Illumination, International Forum on Automotive Lighting, 2017.
- [127] KREBS, H. G.; BÖLLINGER, G.: Beurteilung und Erfassung von Nässezuständen auf der Fahrbahn – Schlussbericht FA 4075 G 79 G, INSTITUT FÜR STRAßENBAU UND EISENBAHNWESEN, HRSG., 1981.
- [128] WAMBSGANß, H.: Lichttechnische Anforderungen an Fahrbahnmarkierungen bei Dunkelheit, Dissertation.
Technische Universität Darmstadt, Fachbereich 17 - Elektrische Energietechnik, Darmstadt, 1996.
- [129] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.; SCHWENKSCHUSTER, L.: Einfluß der Helligkeit und des Reflexionsverhaltens von nassen Fahrbahnoberflächen auf die Seh- und Wahrnehmungsbedingungen von Kraftfahrern bei Nacht,
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn- Bad Godesberg, Bundesmin. für Verkehr Bau- und Wohnungswesen Abt. Straßenbau Straßenverkehr, 63 S., 2001, ISBN 3934458467.
- [130] HOFFMANN, A.: Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen.
TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Ilmenau, 2003.
- [131] KÖHLER, S.: Messtechnische Bestimmung von Leuchtdichtekoeffizienten für Fahrbahn-deckschichten unter flachen Anstrahlwinkeln, Dissertation.
TU Berlin, Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik, Berlin, 2011.
- [132] FISCHER, J.: Entwicklung eines adaptiven Schlechtwetterlichtsystems zur Reduzierung der indirekten Blendung bei nassen Fahrbahnen, Dissertation.
Gottfried Wilhelm Leibnitz Universität Hannover, Fakultät Maschinenbau, Hannover, 2015.
-

-
- [133] KLEINERT, B.: Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht bei spiegelnden Fahrbahnoberflächen, Dissertation. TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Ilmenau, 2016.
- [134] UNECE, R112, Regelung: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps emitting an asymmetrical passing-beam or a driving-beam or both and equipped with filament lamps and/or light-emitting diode (LED) modules, 4. Aufl., 15.07.2013.
- [135] STATISTA: Durchschnittlicher monatlicher Niederschlag in Deutschland von Juli 2017 bis Juli 2018, Quelle: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5573/umfrage/monatlicher-niederschlag-in-deutschland/>, 2018, abgerufen am 15.07.2018.
- [136] UNECE, R98, Regelung: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps equipped with gas-discharge light sources, 4. Aufl., 15.07.2013.
- [137] CIE, CIE 146:2002 & CIE 147:2002, Report: CIE Collection on Glare 2002, Commission International de l'Éclairage (CIE), Wien, 2002.
- [138] VAN DERLOFSKE, J.; BULLOUGH, J. D.; DEE, P.; CHEN, J.; AKASHI, Y.: Headlamp Parameters and Glare. In: SAE, Hrsg., SAE 2004 World Congress & Exhibition, SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2004.
- [139] BORTZ, J.; SCHUSTER, C.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, Berlin [u.a.], Springer, 7. Aufl., XVI, 655 S., 2010, ISBN 978-3-642-12769-4.
- [140] RAZALI, N. M.; WAH, Y. B.: Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. In: Journal of Statistical Modeling and Analytics, Vol. 2, 1, 2011, S. 21–33.
- [141] FAHRMEIR, L.: Statistik – Der Weg zur Datenanalyse, Springer-Lehrbuch, Berlin [u.a.], Springer, 613 S., 2004, ISBN 978-3-540-21232-4.
- [142] BORTZ, J.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 6. Aufl., 882 S., 2005, ISBN 354021271X6.

Anhang

Statistik

In diesem Abschnitt werden die verwendeten statistischen Methoden dargestellt, die für die Auswertung der Ergebnisse der vier Feldtest verwendet wurden. Bei der Prüfung von signifikanten Zusammenhänge stellt die Statistik verschiedene Methoden zur Auswahl, die in der Regel an Voraussetzungen bei der Datenerhebung und Struktur gebunden sind. Bevor auf diese näher eingegangen wird, wird nachfolgend ein kurzer Überblick der verwendeten Grundbegriffe und grundlegende Definitionen gegeben.

Abhängige und unabhängige Stichproben und Variablen

Eine Variable ist ein Merkmal, die im Unterschied zu einer Konstanten, in mindestens zwei Abstufungen vorkommt. Als unabhängige Variablen werden nach BORTZ diejenigen Merkmale verstanden, deren Auswirkungen auf andere Merkmale, die abhängigen Variablen, überprüft werden sollen [139]. Als abhängige Variable ist bei allen durchgeführten Feldtest die Beleuchtungsstärke bzw. Leuchtdichte und die daraus abgeleitete Blendung zu nennen.

Eine Unterscheidung zwischen abhängigen und unabhängigen Stichproben findet bereits bei der Auslegung des Versuches statt. Unabhängigkeit heißt in diesem Sinne, dass die Messungen sich nicht gegenseitig beeinflussen und untereinander austauschbar sind. Als Beispiel zu nennen wären zwei Gruppen, die unter denselben Bedingungen untersucht werden. Die auf diese Weise gewonnenen Daten lassen sich als Zufallsvariablen auffassen und ermöglichen Aussagen, die über den Beobachtungsbereich hinaus gültig sind. Wenn hingegen dieselben Probanden zwei oder mehr unterschiedliche Situationen bewerten, handelt es sich um abhängige Stichproben [105].

Beim ersten durchgeführten Feldtest über den Einfluss der dLWR auf die Blendung, sind drei unabhängige Variablen, auch Faktoren genannt, vorhanden. Diese sind die dLWR (aktiviert und deaktiviert), die Härte des Fahrwerks (weich, mittel und hart) und der Beladungszustand (unbeladen und beladen). Beim zweiten Feldtest über den Einfluss der Verschmutzung auf die Lichtverteilung ist ein Faktor vorhanden. Dieser ist der Verschmutzungsgrad, der von handgereinigt über SRA gereinigt bis hin zu verschmutzt reicht. Beim dritten und vierten Feldtest, bei dem die optimale Verkehrszeichenanleuchtung und die Auswirkungen einer nassen Fahrbahn untersucht werden, ist die unabhängige Variable, das Fernlichtniveau, mit dem das Verkehrszeichen bzw. die Straße angeleuchtet wird.

Parametrische und nicht-parametrische Tests

Parametrische Test setzen eine normalverteilte und gegebenenfalls Varianzhomogenität voraus und werden in der Forschung bevorzugt verwendet, da sie eine höhere Teststärke aufweisen als nicht-parametrische Test. Diese werden auch als verteilungsunabhängig bezeichnet und verlangen weniger und schwächere Voraussetzungen (vgl. [105], [139]).

Anhang zu Kapitel 3

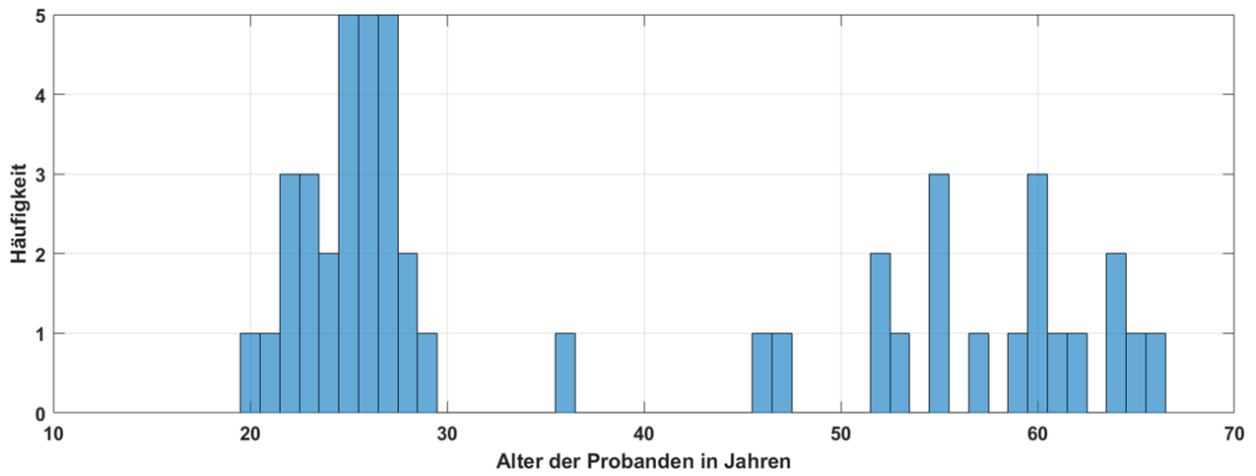


Abbildung A-2: Histogramm mit dem Alter der teilgenommenen Probanden aus Kapitel 3

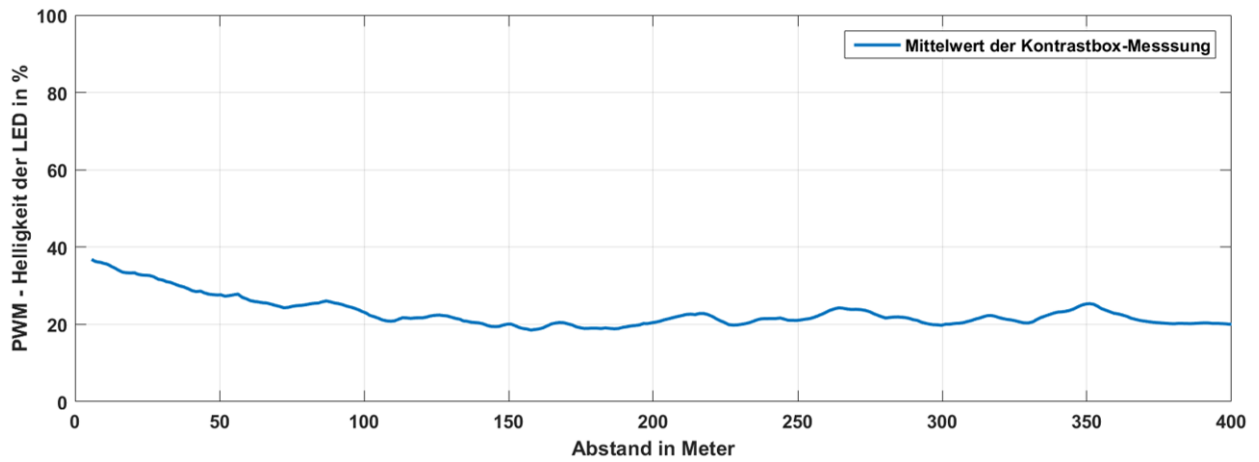


Abbildung A-3: Verlauf der Kontrastbox-Messung: Mittelwerte für eine Fahrt über alle Probanden. Die PWM-Helligkeit der LED kann in den Schwellkontrast umgerechnet werden

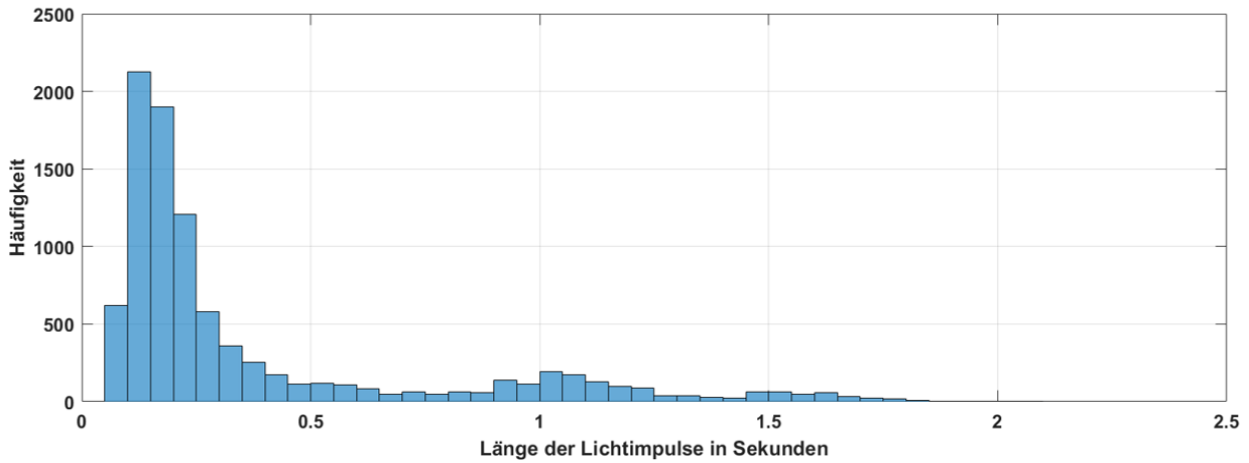


Abbildung A-4: Histogramm mit der Dauer der gemessenen Lichtpulse die während des Feldtests in Kapitel 3 ermittelt wurden

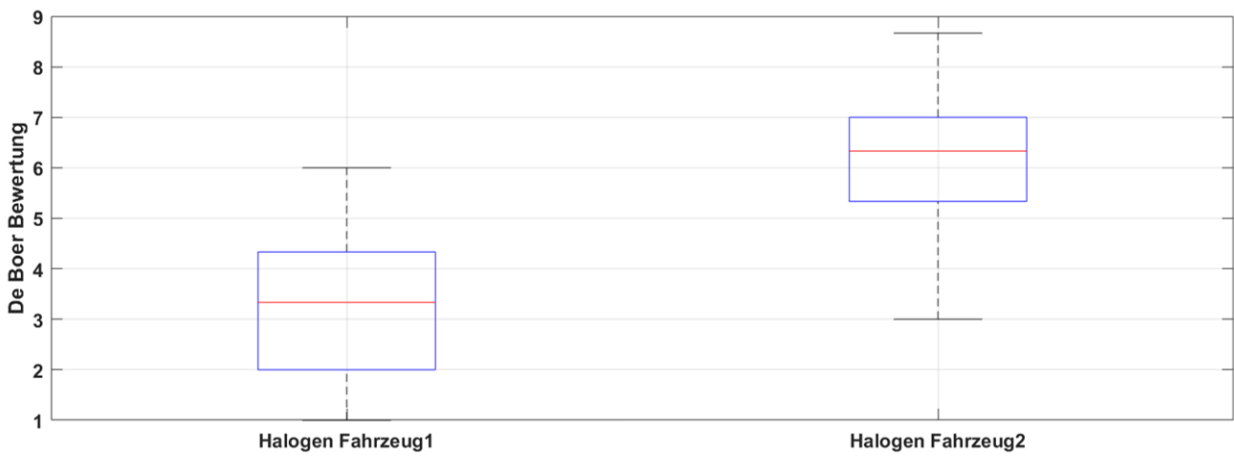


Abbildung A-5: Vergleich der inversen de Boer Bewertungen der Fahrzeuge mit Halogen-Scheinwerfer. Die Scheinwerfer der untersuchten Fahrzeuge haben beide das gleiche H7 Leuchtmittel verbaut

Anhang zu Kapitel 4

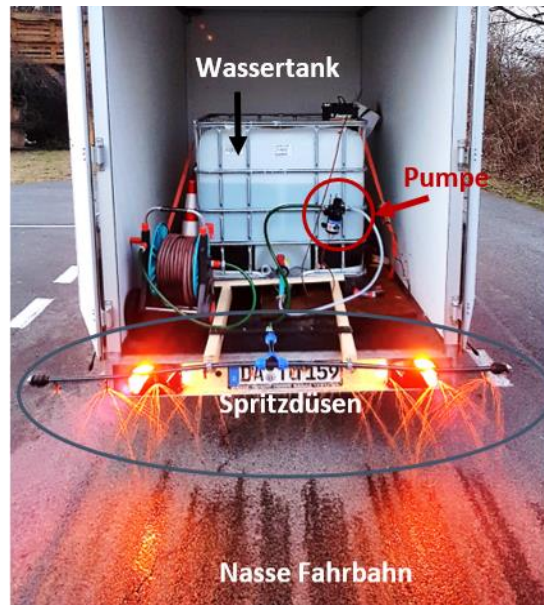


Abbildung A-6: Selbst entwickeltes Bewässerungssystem zum Bewässern der Fahrbahn. Dieses besteht aus einer Pumpe, die das Wasser aus einem Wassertank über Spritzdüsen auf der Fahrbahn verteilt. Das Salz wurde zuvor auf die Fahrbahn gestreut

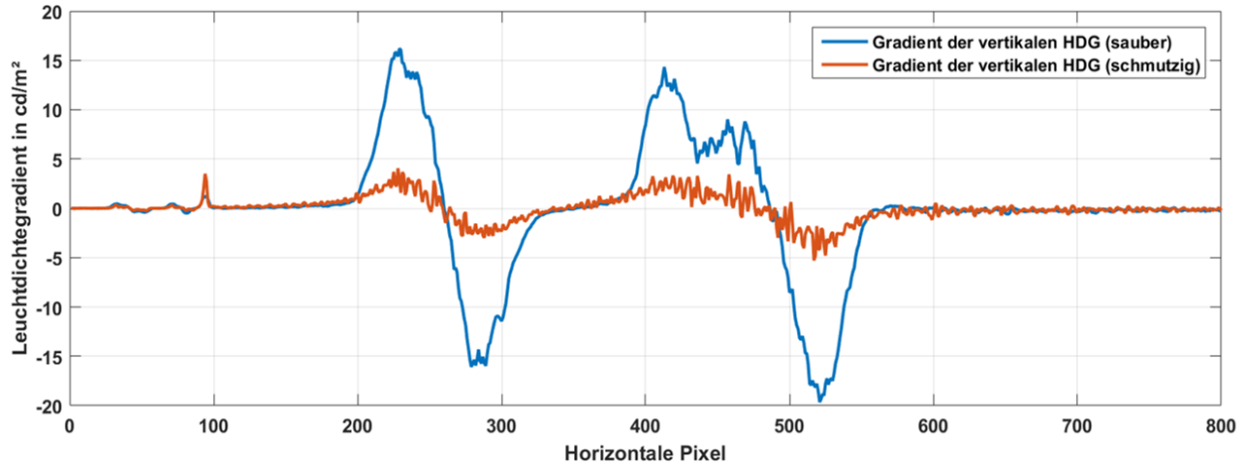


Abbildung A-7: Vergleich des Gradienten an der vertikalen HDG beim blendfreien Fernlichtsystem bei der sauberen und schmutzigen Leuchtdichteaufnahme

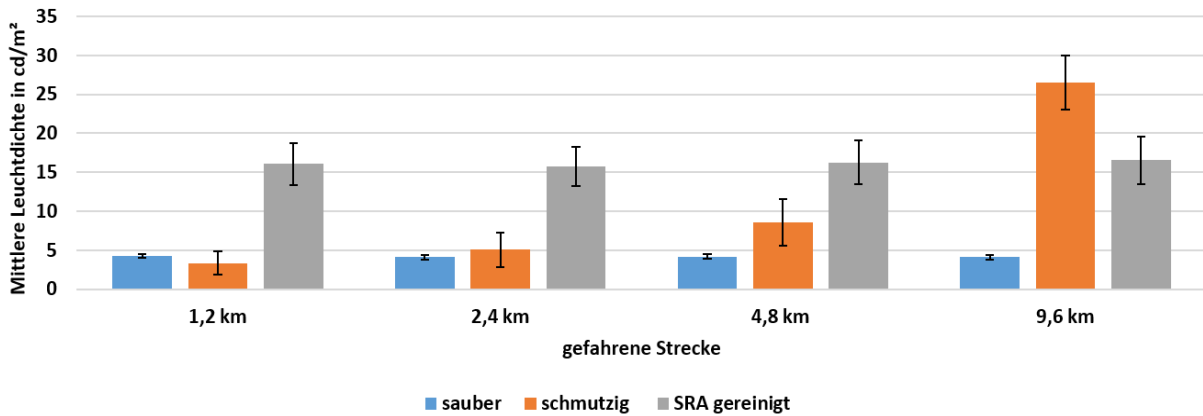


Abbildung A-8: Gemessene mittlere Leuchtdichten für den Bereich oberhalb der HDG aufgeteilt in sauber, schmutzig und SRA gereinigt in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke

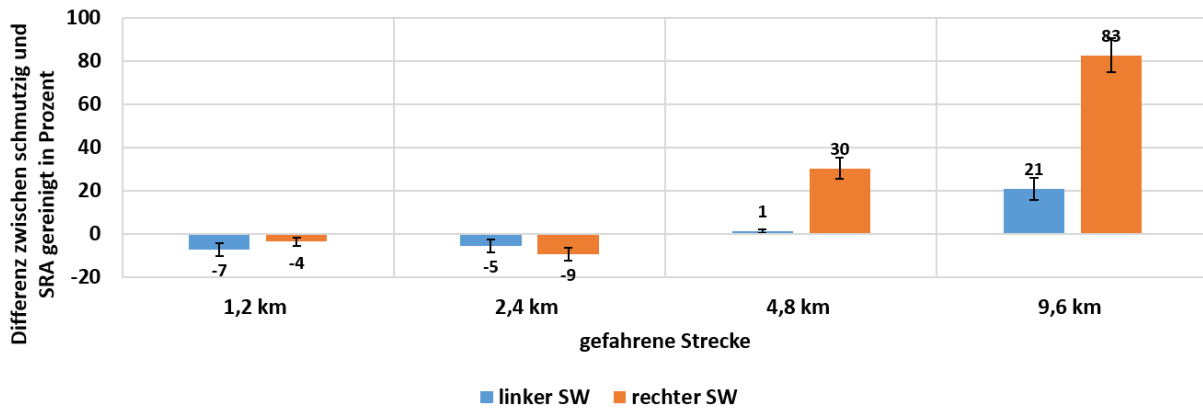


Abbildung A-9: Prozentuale Differenz zwischen schmutzig und SRA gereinigt für den Bereich unterhalb der HDG bei Ablendlicht

Anhang zu Kapitel 5

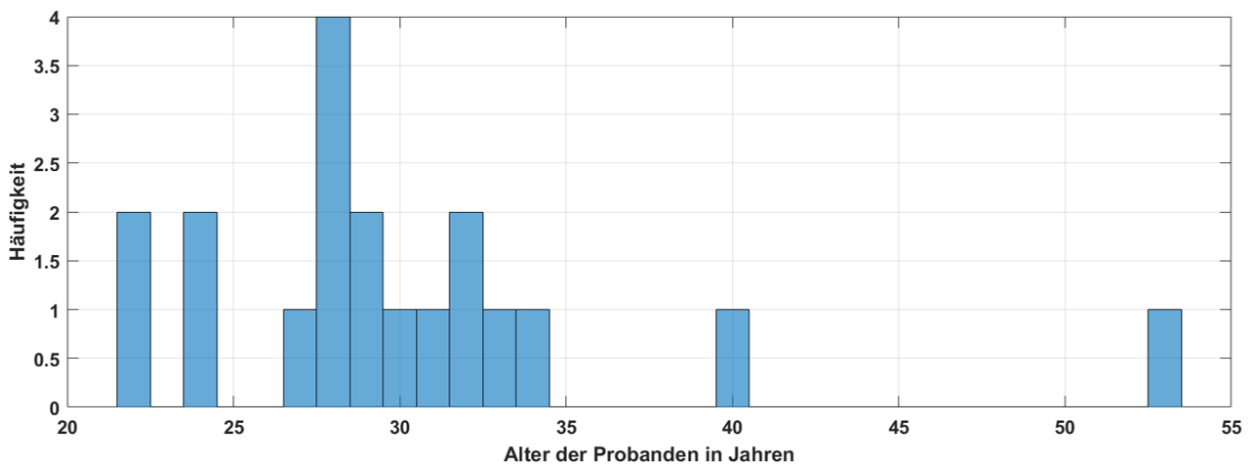


Abbildung A-10: Histogramm mit dem Alter der teilgenommenen Probanden aus Kapitel 5

Anhang zu Kapitel 6

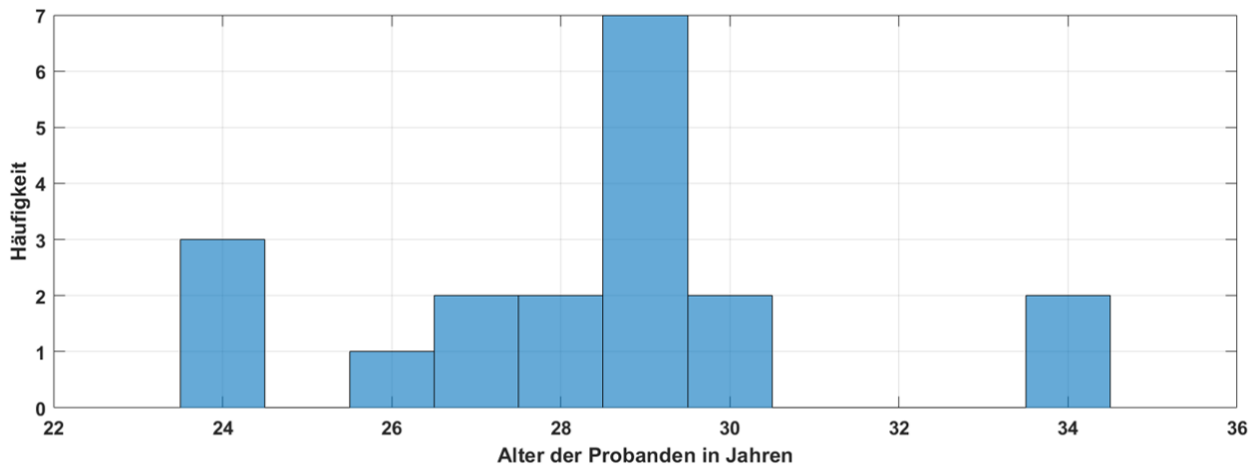


Abbildung A-11: Histogramm mit dem Alter der teilgenommenen Probanden aus Kapitel 6

Tabelle A-1: Helligkeitsbewertung bei trockener Fahrbahn, 1: zu dunkel, 3: optimal und 5: zu hell

		Intensität des Testfahrzeuges	
		100 %	50 %
Intensität des Blendfahrzeuges	100 %	2,60	2,13
	75 %	3,07	2,07
	50 %	3,01	2,20
	0 %	2,87	1,73

Tabelle A-2: Helligkeitsbewertung bei nasser Fahrbahn, 1: zu dunkel, 3: optimal und 5: zu hell

		Intensität des Testfahrzeuges	
		100 %	50 %
Intensität des Blendfahrzeuges	100 %	3,00	2,19
	75 %	3,13	2,19
	50 %	3,94	2,38
	0 %	4,63	3,69

Tabelle A-3: Inverse de Boer Bewertung bei trockener Fahrbahn, 1: keine Blendung, 5: Übergang zwischen blendend und nicht, 5: Blendung

		Intensität des Testfahrzeuges	
		100 %	50 %
Intensität des Blendfahrzeuges	100 %	5,4	5,4
	75 %	5,1	5,3
	50 %	3,5	3,4
	0 %	1	1

Tabelle A-4: Inverse de Boer Bewertung bei nasser Fahrbahn, **1**: keine Blendung, **5**: Übergang zwischen blendend und nicht, **5**: Blendung

		Intensität des Testfahrzeuges	
		100 %	50 %
Intensität des Blendfahrzeuges	100 %	7,6	7,4
	75 %	5,9	5,7
	50 %	5,1	4,8
	0 %	1	1

Tabelle A-5: Detektionsdistanzen bei trockener Fahrbahn

		Intensität des Testfahrzeuges	
		100 %	50 %
Intensität des Blendfahrzeuges	100 %	57,8 m	44,2 m
	75 %	56,8 m	43,0 m
	50 %	58,0 m	47,5 m
	0 %	61,5 m	52,7 m

Tabelle A-6: Detektionsdistanzen bei nasser Fahrbahn

		Intensität des Testfahrzeuges	
		100 %	50 %
Intensität des Blendfahrzeuges	100 %	69,0 m	57,5 m
	75 %	69,6 m	52,5 m
	50 %	73,2 m	56,8 m
	0 %	76,5 m	67,0 m

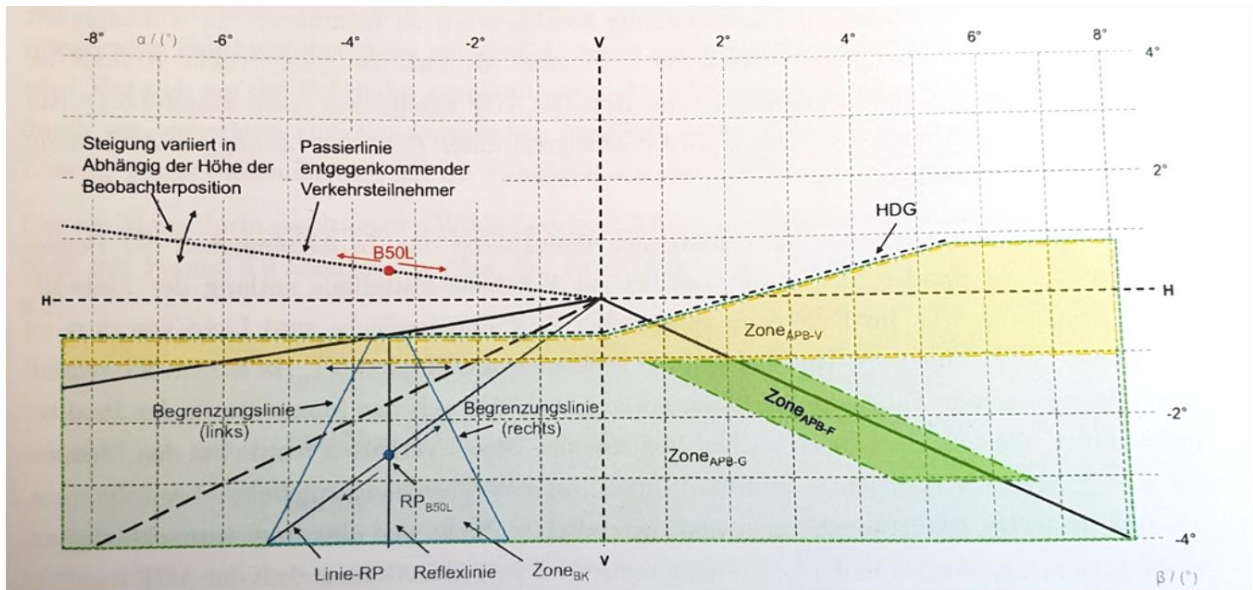


Abbildung A-12: Lichtverteilung eines adaptiven blendfreien Abblendlichts für spiegelnde Fahrbahnoberflächen [133]

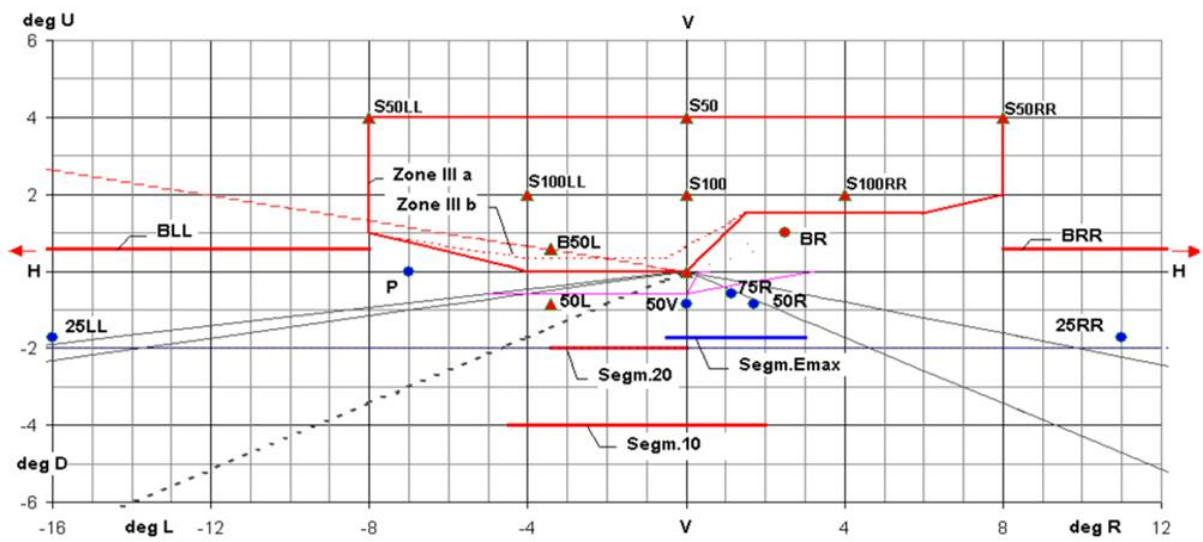


Abbildung A-13: Messschirm über die photometrischen Eigenschaften der Schlechtwetterlichtverteilung [124]

Anhang zu Kapitel 7

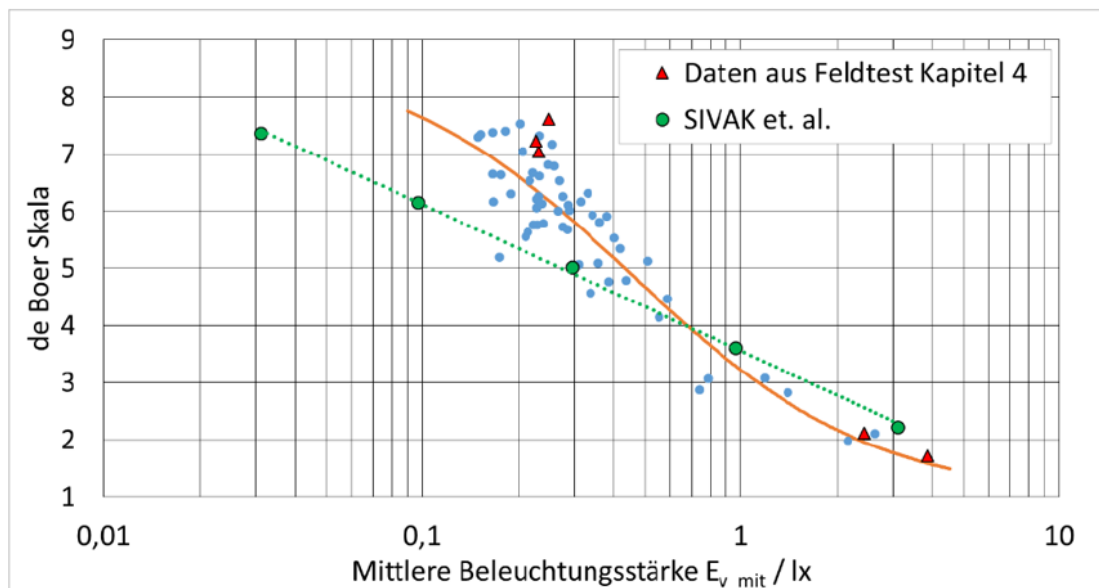


Abbildung A-14: Psychologische Blendung und mittlere Beleuchtungsstärke: Vergleich zwischen den Ergebnissen von ZYDEK [15] („Daten aus Feldtest Kapitel 4“ bei dem die Blendung und Detektionsdistanz von blendfreiem Fernlicht untersucht wurde) und Sivak et al. [72]

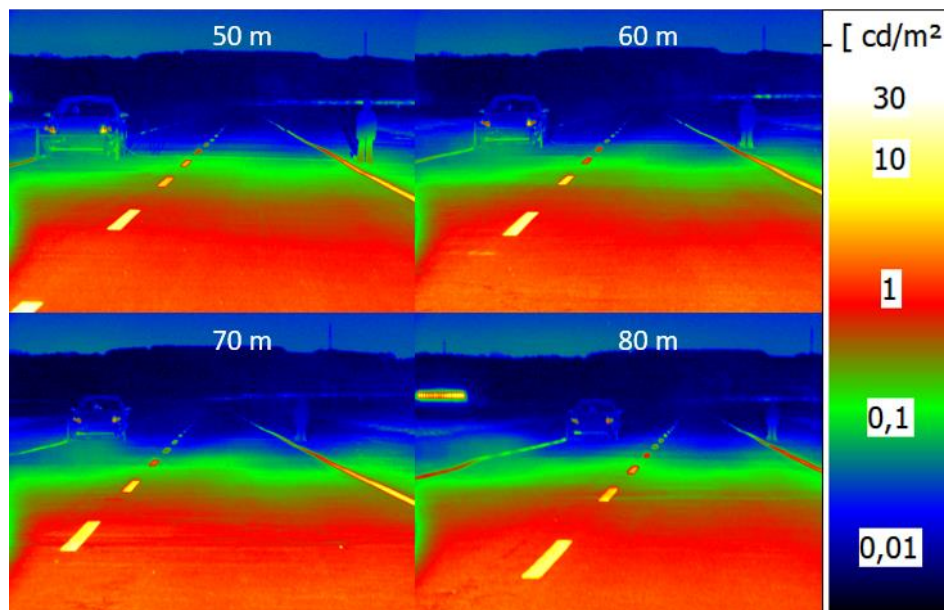


Abbildung A-15: Leuchtdichteaufnahmen aus unterschiedlichen Abständen (50 m bis 80 m) zum Detektionsobjekt bei trockener Fahrbahn

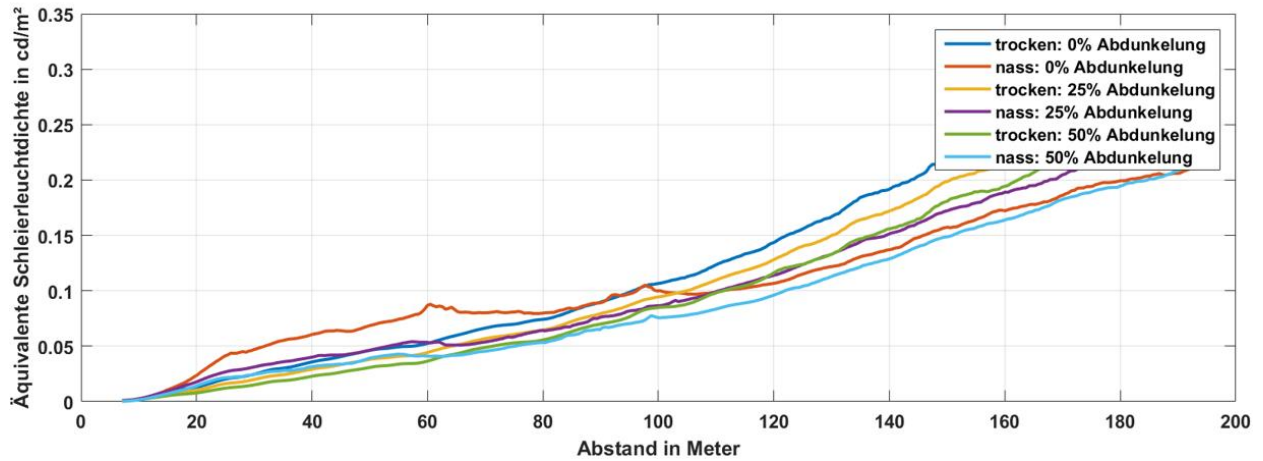


Abbildung A-16: Abstandsabhängiger Verlauf der äquivalenten Schleierleuchtdichte für trockene und nasse Fahrbahn anhand der 3 Abdunkelungsstufen der Abblendlichtscheinwerfer nach HOLLADAY [55]

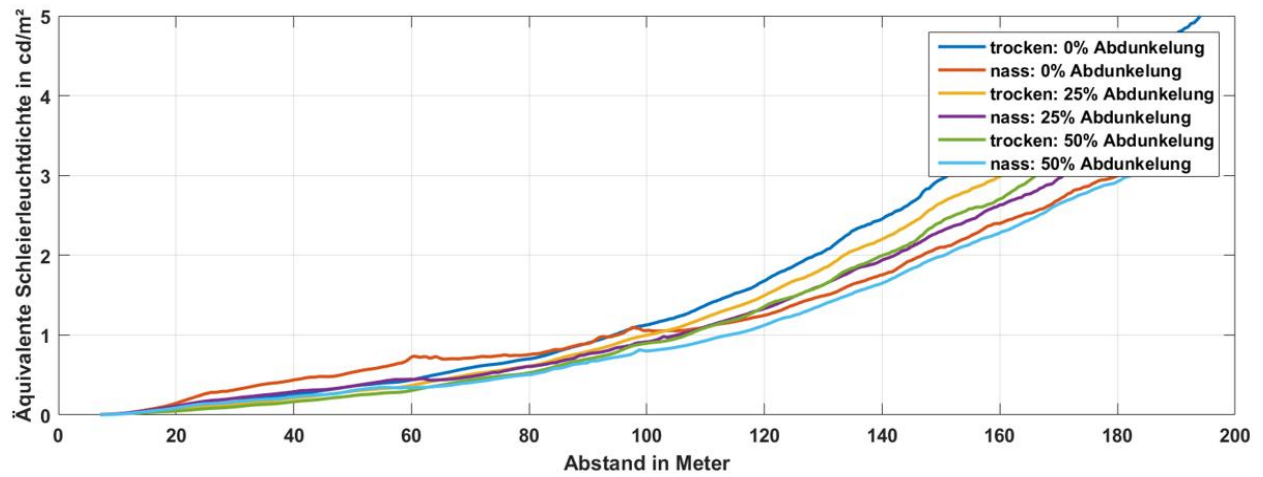


Abbildung A-17: Abstandsabhängiger Verlauf der äquivalenten Schleierleuchtdichte für trockene und nasse Fahrbahn anhand der 3 Abdunkelungsstufen der Abblendlichtscheinwerfer nach CIE [63]

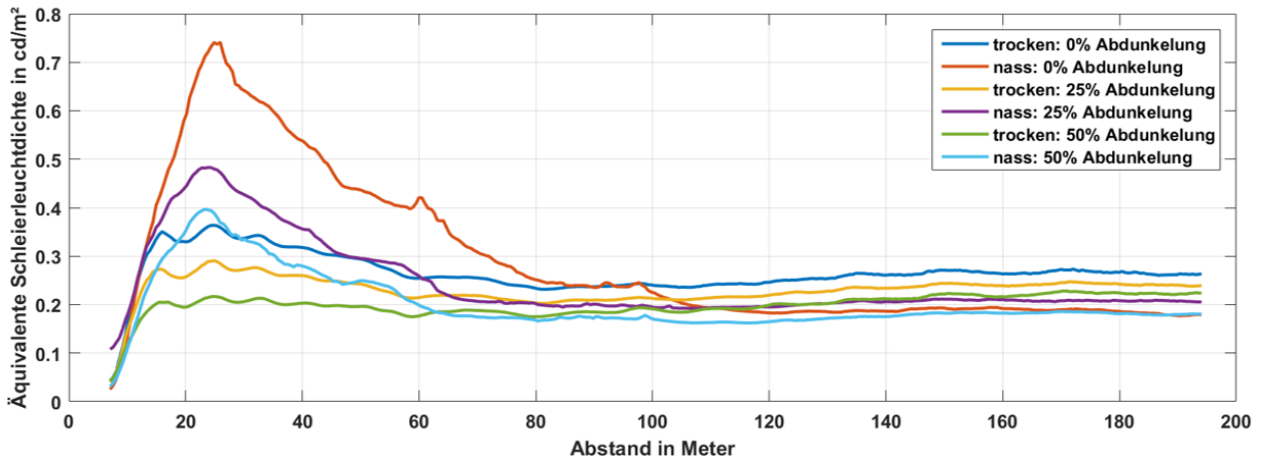


Abbildung A-18: Abstandsabhängiger Verlauf der äquivalenten Schleierleuchtdichte für trockene und nasse Fahrbahn anhand der 3 Abdunkelungsstufen der Abblendlichtscheinwerfer nach TOTZAUER [64]

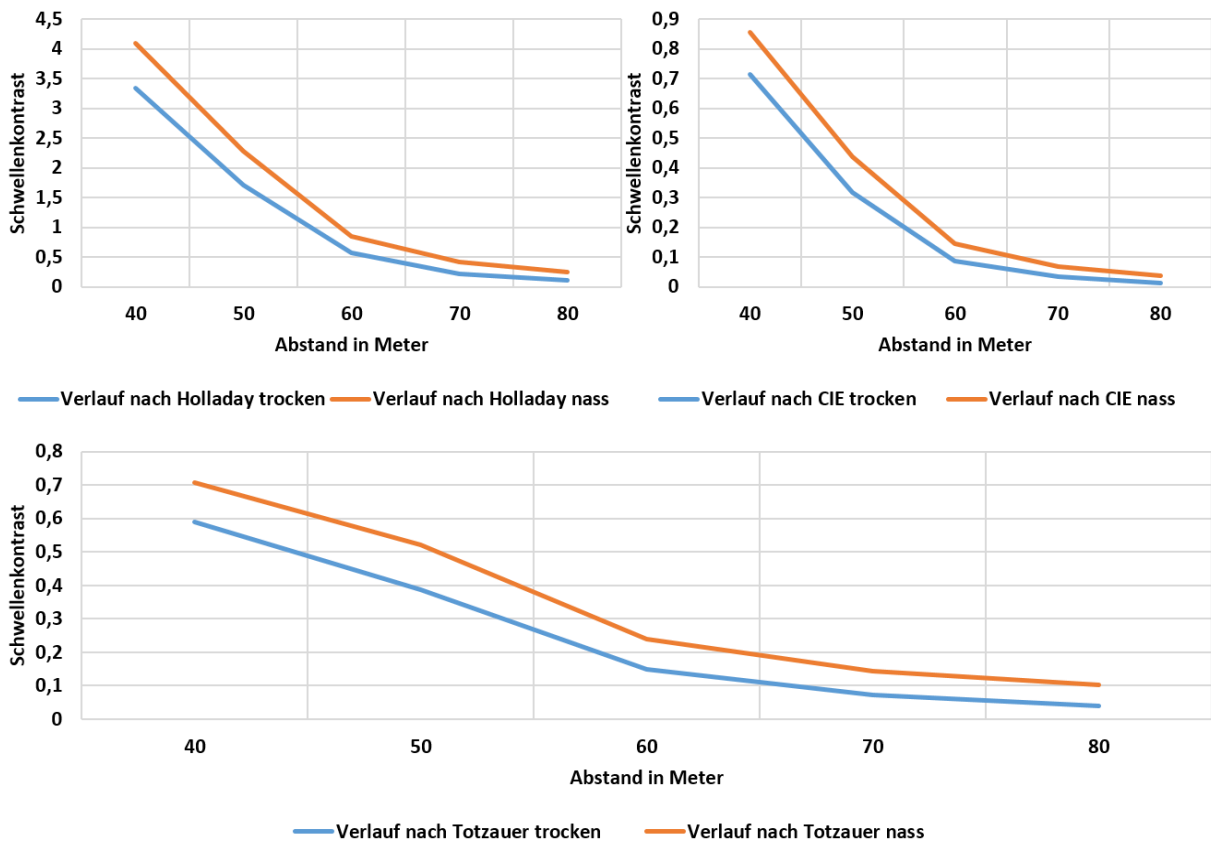


Abbildung A-19: Vergleich der berechneten Schwellkontraste bei trockener und nasser Fahrbahn, **oben links:** nach HOLLADAY, **oben rechts:** nach CIE, **unten:** nach TOTZAUER

Veröffentlichungen und betreute Arbeiten

Veröffentlichungen

Kobbert, Jonas; Kosmas, Kyriakos; Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc: „Field Test of Visibility distances and recognition rates – comparison of LED and Laser systems”, In: International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, Deutschland 2015

Kosmas, Kyriakos; Polin, Dmitrij; Kobbert, Jonas; Schiller, Christoph; Khanh, Tran Quoc: „Dynamic illuminance measurements – Glare-free high beam (ECE) vs. SAE headlamps”, In: International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, Deutschland 2015

Kosmas, Kyriakos; Polin, Dmitrij; Schiller, Christoph; Kobbert, Jonas ; Khanh, Tran Quoc: „Comparing the glare load of low beam, high beam and glare-free high beam under different traffic conditions on the road”, In: International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, Deutschland 2015

Kosmas, Kyriakos; Khanh, Tran Quoc: „Field study of headlamp alignment for avoiding glare and reaching a maximal detection distance”, In: International Forum on Automotive Lighting (IFAL), Kunshan, China 2015

Kobbert, Jonas; Löffler, Wendi; Kosmas, Kyriakos; Khanh, Tran Quoc: „Estimation of glare load from small illuminance peaks in real life driving situations“, In: VISION, Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving, Paris, Frankreich 2016

Kobbert, Jonas; Kosmas, Kyriakos; Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc: „Field test of visibility distances and recognition rates - comparison of LED and Laser Systems“, In: SAE World Congress, Detroit, USA 2016

Schiller, Christoph; Kosmas, Kyriakos; Kobbert, Jonas; Khanh, Tran Quoc: „Influence of dirty headlamps on straylight and glare - A test series under real driving conditions“, In: 4th International Forum on Automotive Lighting (IFAL), Shanghai, China 2016

Kosmas, Kyriakos; Kobbert, Jonas; Khanh, Tran Quoc: „Field-test to determine the optimal traffic sign illumination based on glare-free high beam“, In: International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, Deutschland 2017

Schiller, Christoph; Kosmas, Kyriakos; Kobbert, Jonas; Khanh, Tran Quoc: „Dirty Headlamps – Efficiency of Headlamp Cleaning Devices and the Impact on Stray Light: Method and first results“, In: International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, Deutschland 2017

Löffler, Wendi; Kobbert, Jonas; Kosmas, Kyriakos; Khanh, Tran Quoc: „Determining the effects of sharp cut-off lines vs. smooth cut-off lines on glare rating“, In: International Forum on Automotive Lighting (IFAL), Shanghai, China 2017

Kobbert, Jonas; Englisch, Daniel; Kosmas, Kyriakos; Khanh, Tran Quoc: „Contrast measurements for detection and recognition with Laser High Beam Systems in real life driving tests”, In: International Forum on Automotive Lighting (IFAL), Shanghai, China 2017

Kosmas, Kyriakos; Kobbert, Jonas; Khanh, Tran Quoc: „Glare-free High Beam: Optimal Traffic Sign Illumination”, In: International Forum on Automotive Lighting (IFAL), Shanghai, China 2017

Kobbert, Jonas; Kosmas, Kyriakos; Englisch, Daniel; Khanh, Tran Quoc: „Feldtest zu Sichtbarkeitsweiten und Kontrastanalyse – Vergleich zwischen LED und Laserscheinwerfersystemen“, In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift (2/2018) pp. 68-71

Kosmas, Kyriakos; Kobbert, Jonas; Khanh, Tran Quoc: „Einfluss der Verschmutzung auf blendfreie Fernlichtsysteme“, In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift (6/2018) pp. 68-71

Kosmas, Kyriakos; Kobbert, Jonas; Khanh, Tran Quoc: „Optimale Verkehrszeichen-Leuchtdichte durch blendfreies Fernlicht“, In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift (9/2018) pp. 84-87

Betreute Arbeiten

Ein Großteil der Beschäftigung als wissenschaftlicher Mitarbeiter ist die Betreuung von studentischen Abschlussarbeiten. Einige der gezeigten Ergebnisse, Messaufbauten und Grafiken dieser Arbeit beruhen dabei auf den unten aufgeführten Abschlussarbeiten. Diese werden allerdings nicht separat zitiert, da deren Ziel in der Entstehung der vorliegenden Arbeit lag.

Erkan, Anil: Bachelorarbeit: „Feldtest und Überprüfung des Scheinwerfereinstellprozesses“, Technische Universität Darmstadt, 2016

Schön, Oliver: Bachelorarbeit: „Entwicklung eines Systems zur Ansteuerung und Auslesung von Stellmotoren der automatischen Leuchtweitenregelung“, Technische Universität Darmstadt, 2016

Hoffmann, David: Bachelorarbeit: „Entwicklung und Validierung eines Systems zur Messung der Fahrzeugdynamik“, Technische Universität Darmstadt, 2016

Yalcin, Keziban: Bachelorarbeit: „Einfluss der Verschmutzung von Scheinwerfern auf Lichtverteilungen von ADB Scheinwerfern“, Technische Universität Darmstadt, 2016

Klingenstein, Markus: Bachelorarbeit: „Simulation und Ansteuerung eines Pixellicht-Scheinwerfers, sowie messtechnische Erfassung relevanter lichttechnischer Größen“, Technische Universität Darmstadt, 2016

Roth, Dennis: Bachelorarbeit: „Ansteuerung und messtechnische Charakterisierung einer Scheinwerfer-Lichttrommel für lichttechnische Versuche“, Technische Universität Darmstadt, 2016

Kramer, Andre: Bachelorarbeit: „Validierung und Einbau eines portablen Eye-Tracking Systems für den Einsatz im Kfz-Bereich und lichttechnische Untersuchungen“, Technische Universität Darmstadt, 2016

Löffler, Wendi: Bachelorarbeit: „Entwicklung und Validierung eines Aufbaus zur Charakterisierung von Blendreizen mit unterschiedlicher Intensität und Dauer“, Technische Universität Darmstadt, 2016

Singer, Timo: Masterarbeit: „Implementierung und Aufbau einer blickgesteuerten Lichtverteilung“, Technische Universität Darmstadt, 2016

Bursasiu, Dan: Masterarbeit: „Optimierung von Pixelscheinwerfergrenzen auf Basis aktueller Verkehrs- und Straßendaten“, Technische Universität Darmstadt, 2016

Bursasiu, Dan: Projektseminar: „Aufbau eines Demonstrators zur Veranschaulichung von Scheinwerferfunktionen“, Technische Universität Darmstadt, 2016

Horn, Lukas: Projektseminar: „Aufbau und Entwicklung eines Demonstrators zur Realisierung eines blickgesteuerten Scheinwerfers“, Technische Universität Darmstadt, 2017

Tang, Chuan: Masterarbeit: „Optisches Verfahren zur automatischen Einstellung von Kfz-Scheinwerfern“, Technische Universität Darmstadt, 2017

El-Moussaoui, Jamal: Bachelorarbeit: „Blendfreies Fernlicht: Dynamische Untersuchung der Eigenblendung durch Verkehrszeichen“, Technische Universität Darmstadt, 2017

Degen, Kai: Bachelorarbeit: „Aufbau und Entwicklung eines schnellen und mobilen Beleuchtungsstärkemessgerätes“, Technische Universität Darmstadt, 2017

Dao, Sinh Duc: Bachelorarbeit: „Entwicklung, Validierung und lichttechnische Vermessung von Detektionsobjekte für lichttechnische Versuche“, Technische Universität Darmstadt, 2017

Erkan, Anil: Fachpraktikum: „Aufbau und Entwicklung eines Pixelscheinwerfers“, Technische Universität Darmstadt, 2018

Erkan, Anil: Masterarbeit: „Blendpotential und Akzeptanz von Retrofit-Led Scheinwerfern“, Technische Universität Darmstadt, 2018

Yalcin, Keziban: Masterarbeit: „Entwicklung und Validierung von Lichtfunktionen im städtischen Bereich für autonom fahrende Fahrzeuge (Level 5)“, Technische Universität Darmstadt, 2018

Bopp, Daniel: Masterarbeit: „Entwicklung und Validierung eines scannenden Scheinwerfe-Systems mit dem hochauflösende Lichtverteilungen erzeugt werden können“, Technische Universität Darmstadt, 2018

Lebenslauf

Ausbildung

- 2013 - 2015
TU Darmstadt: Master Studium in Elektrotechnik und Informationstechnik
Thema der Abschlussarbeit: *Messtechnische Charakterisierung von Scheinwerfern mit adaptivem Fernlicht unter dynamischen Bedingungen*
Abschluss: Master of Science (Note: gut)
- 2002 - 2013
TU Darmstadt: Bachelor Studium in Informations- und Kommunikationstechnik
Thema der Abschlussarbeit: *Entwicklung eines Gerätes zur Einstellung der Lage der Lichtstärkeverteilung von Kfz Scheinwerfern*
Abschluss: Bachelor of Science (Note: befriedigend)
- 1989 - 2002
Deutsche Schule Athen
Athen Griechenland
Leistungskurse: Mathematik, Biologie
Abschluss: Abitur (Note: gut)

Berufspraxis

- seit 01.06.2015
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Lichttechnik
- 01.12.2012 – 31.05.2015
Studentische Hilfskraft
Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Lichttechnik
- 01.11.2012 – 31.03.2013
Studentische Hilfskraft
Ibel & Lotz GmbH & Co. Schneeräumung KG
- 01.06.2012 – 31.03.2013
Studentische Hilfskraft
Wissenschafts- und Kongresszentrum Darmstadt GmbH & Co. KG
- 01.03.2010 – 30.06.2012
Studentische Hilfskraft
Europcar Autovermietung GmbH
Darmstadt
- 01.04.2006 – 31.12.2009
Werksstudent
Nisbau GmbH in Bockenheim
Hersteller von Anlagensystemen und mobiler Betonmischanlagen

01.10.2005 – 31.03.2006

Praktikum
Mesa Mess- und Steueranlagen GmbH
Maintal

01.01.2005 – 31.03.2013

Freiberuflich
Kfz-Reparaturen

01.01.2004 – 31.12.2004

Auslandspraktikum
Raffinerie Hellenic Petroleum
Athen Griechenland

01.06.1999 – 31.07.2002

KFZ-Mechaniker
H. Bekas Auto Werkstatt
Athen-Griechenland

Anmerkung zum Kapitel 3 dieser Dissertation

Dieser Dissertation liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE Nr. 82.0611/2014 durchgeführten Forschungsarbeiten zugrunde.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

This dissertation is based on parts of the research project carried out at the request of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, represented by the Federal Highway Research Institute, under research project No. 82.0611/2014.

The author is solely responsible for the content.

Erklärungen laut Promotionsordnung

§ 8 Abs. 1 lit. c PromO

Ich versichere hiermit, dass die elektronische Version meiner Dissertation mit der schriftlichen Version übereinstimmt.

§ 8 Abs. 1 lit. d PromO

Ich versichere hiermit, dass zu einem vorherigen Zeitpunkt noch keine Promotion versucht wurde. In diesem Fall sind nähere Angaben über Zeitpunkt, Hochschule, Dissertationsthema und Ergebnis dieses Versuchs mitzuteilen.

§ 9 Abs. 1 PromO

Ich versichere hiermit, dass die vorliegende Dissertation selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen verfasst wurde.

§ 9 Abs. 2 PromO

Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, den 02.10.2018

Kyriakos Kosmas