

*Benedikt Kleinert*

***Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives  
blendfreies Abblendlicht bei spiegelnden Fahrbahnoberflächen***

**URN:** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017200513

---

*Zuerst als Druckausgabe erschienen:*

Kleinert, Benedikt:

Anforderungen / Benedikt Kleinert. - Friedrichstadt : Der Andere Verlag, 2016. -  
IV, 208 Seiten.

(Publikationsreihe des Fachgebietes Lichttechnik in Ilmenau ; Nummer 19)

ISBN 978-3-86247-614-5





# **Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht bei spiegelnden Fahrbahnoberflächen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

vorgelegt der  
Fakultät für Maschinenbau der  
Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

**M.Eng. Benedikt Kleinert**

geboren am 02.12.1985 in Neustadt a.d. Aisch

Tag der Einreichung: 26.04.2016

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 04.11.2016

Erstgutachter: Univ.-Prof. Dr. sc. nat. habil. Christoph Schierz

Zweitgutachter: Univ.-Prof. Dr. Ing. habil. Stephan Völker

Drittgutachter: Dr. rer. nat. Michael Marutzky



## Danksagung

Kaum zu glauben, alle erzielten Erkenntnisse sind zu Papier gebracht und das „Licht“ am Ende des Tunnels erreicht. Es ist mir ein großes Anliegen, mich auf diesem Weg bei all denjenigen zu bedanken, die diese Arbeit haben Wirklichkeit werden lassen.

Die Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur bei IAV Automotive Engineering in Gifhorn, in der Abteilung Licht & Sicht. Daher möchte ich mich zunächst bei meinen Vorgesetzten Sven Bogdanow und Christopher Wolf bedanken, die es mir ermöglicht haben, dieses Projekt unter „blendenden“ Bedingungen bis ans Ende zu gestalten. Auch möchte ich mich bei Dr. Michael Marutzky bedanken, der seitens IAV die wissenschaftliche Betreuung übernommen hat. Sven Bogdanow und Dr. Michael Marutzky danke ich insbesondere für die anregenden und konstruktiven Gespräche.

Ebenso gilt mein besonderer Dank Univ.-Prof. Dr. Christoph Schierz für die Übernahme der hochschulseitigen Betreuung an der TU Ilmenau. Vielen Dank für das entgegengebrachte Interesse an diesem Thema, die aufgebrauchte Zeit und den wissenschaftlichen Austausch.

Bei Univ.-Prof. Dr. Stephan Völker möchte ich mich für die Zweitbetreuung und die anregenden Hinweise zur Versuchsplanung der Probandenstudie bedanken. Für die zusätzlichen wissenschaftlichen Hinweise zur Versuchsplanung möchte ich an dieser Stelle auch Dr. Jürgen Locher danken.

Dass ich überhaupt auf das spannende Thema aufmerksam wurde, verdanke ich Prof. Dr. Alexander von Hoffmann, auch wenn mich seitdem die „Blendkeulen“ ständig verfolgen.

Des weiteren gilt ein großer Dank allen von mir betreuten Studierenden und den Arbeitskollegen der Abteilung Licht & Sicht. Ihnen danke ich vielfach für ihren Einsatz, egal zu welchen Tages- und Nachtzeiten und vor allem unter Wetterbedingungen. Zudem ein großes Dankeschön an alle Probandinnen und Probanden, die an den nächtlichen Versuchen teilgenommen haben.

Meinem Freundeskreis danke ich für all die unterstützenden Worte und vor allem das entgegengebrachte Verständnis, wenn ich den Schreibtisch wieder einmal vorgezogen habe.

Ebenso bedanke ich mich bei den fleißigen Korrekturlesern. Dank ihrer Hilfe ist es gelungen unverständliche Passagen aufzudecken, die Arbeit verständlicher zu formulieren und ihr auch optisch den letzten Feinschliff zu verleihen.

Zu guter Letzt gilt mein ganz besonderer Dank meinen Eltern, meiner Familie und meiner Lebensgefährtin. Sie haben mich stets unterstützt, hatten immer ein offenes Ohr für meine Anliegen und haben mich auch in schwierigen Zeiten an das „Licht“ am Ende des Tunnels erinnert. Dafür danke ich ihnen!

Groß Schwülper, im April 2016

Benedikt Kleinert



## Kurzfassung

Heutige Kfz-Lichtsysteme bieten im nächtlichen Straßenverkehr bestmögliche Sichtbedingungen für den Fahrer, ohne dabei andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Sobald die Straße nass ist, trifft dies nicht mehr zu. Das Problem ist die erhöhte Vorwärtsreflexion aufgrund der spiegelnden Fahrbahnoberfläche. Die Lösung ist ein adaptives blendfreies Abblendlicht, das den Passiervorgang vergleichbar blendfrei, wie bei trockener Fahrbahn gestaltet. Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht daher in der Entwicklung von Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein solches Abblendlicht.

Eine zu Beginn durchgeführte Umfrage bestätigt die Relevanz eines adaptiven blendfreien Abblendlichts. Bei nasser Fahrbahn wird die indirekte Blendung mindestens genauso stark blendend empfunden, wie die direkte. Die in einer Referenzumgebung und im Freien durchgeführten Untersuchungen belegen dies. Bei Nässe ist mit einer verstärkten indirekten Blendung zu rechnen. Besonders eine im Bereich des Reflexpunktes mit Wasser benetzte Stelle führt zu einer nahezu vollständig gerichteten Reflexion des dort auftreffenden Lichtstroms. Form und Größe des relevanten Bereichs sind abhängig von der Scheinwerferanbauhöhe und der Begegnungsentfernung. Zur Vorhersage dieses Bereichs eignet sich das entwickelte Geometriemodell. Zudem wurden die im Passiervorgang maßgeblich zur Blendung beitragenden Reflexlinien analysiert. Diese Analyse wurde erstmals simulativ und innerhalb einer Referenzumgebung mit begrenzter Länge durchgeführt. Die im Freien durchgeführten Untersuchungen bestätigen den Einfluss der Reflexlinien auf die physio- und psychologische Blendung. Systembedingt resultieren im Passiervorgang stark unterschiedliche Blendbeleuchtungsstärken. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit eines adaptiven blendfreien Abblendlichts. Als Lichtfarbe ist eine blaue am geeignetsten. Diese hat einen positiven Effekt auf den Fahrkomfort und führt zu keiner signifikanten Erhöhung der psychologischen Blendung Entgegenkommender. Dies legt den Einsatz von LED nahe.

Aus der vorliegenden Arbeit resultieren Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht. Hervorzuheben ist die entwickelte „Anti-Glare-Funktion“ (AGF), die eine Reduzierung der Leuchtdichte im Bereich der Reflexlinien auf das Niveau einer trockenen Fahrbahn ermöglicht. Mit der entwickelten Software CAGE besteht erstmals die Möglichkeit bereits im Entwicklungsprozess die bei nasser Fahrbahn im Passiervorgang zu erwartende Blendbeleuchtungsstärke vorherzusagen. Die Berücksichtigung der erzielten Erkenntnisse bei der Auslegung eines adaptiven blendfreien Abblendlichts würde somit eine Erhöhung der Verkehrssicherheit und des Fahrkomforts bedeuten.



## **Abstract**

Today's automotive lighting systems offer best visibility conditions for the driver at night, without dazzling other traffic participants. It no longer holds, as soon as the street becomes wet. The problem is the higher ratio of specular reflection due to a wet road surface. An adaptive glare-free passing beam for specular road surfaces, which creates a passing situation like on a dry road, will be the solution. Therefore, it is the objective of this research to develop requirements and assessment methods for such a passing beam.

At the beginning of this research a survey was conducted which confirms the importance of an adaptive glare-free passing beam. On wet roads, the indirect glare is perceived at least as disturbing as the direct glare. The measurements, which were carried out inside a reference area and outside, verify it. Due to a wet road a higher ratio of indirect glare has to be assumed. In particular, the region on the road next to the calculated reflex point, which is completely wetted with water, causes a higher specular reflection. Shape and size of the relevant region depend on the mounting height of the headlamp and the oncoming distance. A developed geometrical model is suitable to predict this region. Furthermore, the reflex lines on the road were analyzed, that mainly influence the glare during a passing situation. This analysis was conducted for the first time, using a simulation software and performing measurements inside a reference area. The measurements, which were carried out outside, verify the influence of the reflex lines on disability and discomfort glare. Depending on the headlamp system, the glare illuminance varies greatly during a passing situation. The results emphasize the importance of an adaptive glare-free passing beam. A bluish light color is most suitable. It has a positive effect on driving comfort and doesn't rise glare for the oncoming traffic significantly. These results suggest the application of LED for the glare-free passing beam.

The results of all mentioned investigations are requirements and assessment methods, which will create a more comfortable and glare-free passing situation, comparable to that on a dry road. Especially the developed "Anti-Glare-Function" has to be mentioned. It allows a reduction of the luminance of the reflex lines on the road to the level of a dry road. The developed simulation software CAGE enables for the first time a prediction of the glare illuminance that has to be expected in a passing situation on a wet road. Therefore, it can be considered in an early stage of the development process. The implementation of the knowledge gained from this research into an adaptive glare-free passing beam would mean an increase in road safety and driving comfort on wet roads.





# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Ziel der Arbeit . . . . .	2
1.2	Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Kraftfahrzeugscheinwerfer und deren Abblendlicht . . . . .	5
2.1.1	Stand der Technik . . . . .	5
2.1.2	Anforderungen an das Abblendlicht . . . . .	10
2.1.3	Photometrische Messmethoden . . . . .	13
2.2	Blendung . . . . .	15
2.2.1	Blendungsarten im Straßenverkehr . . . . .	15
2.2.2	Methoden zur Blendungsbewertung . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Bisherige Forschungsergebnisse</b>	<b>21</b>
3.1	Blendung durch Kraftfahrzeugscheinwerfer . . . . .	21
3.2	Erkennbarkeitsentfernung im Straßenverkehr . . . . .	25
3.3	Einfluss geänderter Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen . . . . .	29
3.4	Adaptive Abblendlichtverteilungen und deren Akzeptanz . . . . .	33
3.5	Methoden zur Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Blendung im Straßenverkehr - Eingrenzung des Parameterraums</b>	<b>43</b>
4.1	Übersicht relevanter Einflussgrößen . . . . .	43
4.2	Geometriemodell zur Blendungsbewertung im Straßenverkehr . . . . .	44
4.3	Umfrage: Blendung im nächtlichen Straßenverkehr . . . . .	46
4.3.1	Methodik . . . . .	46
4.3.2	Ergebnisse . . . . .	47
4.3.3	Fazit . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Laboruntersuchungen relevanter Einflussgrößen</b>	<b>57</b>
5.1	Reflexionseigenschaften verschiedener Oberflächen . . . . .	57
5.1.1	Methodik . . . . .	58
5.1.2	Ergebnisse . . . . .	61
5.1.3	Fazit . . . . .	64

---

5.2	Reflexblendung - statisch . . . . .	65
5.2.1	Methodik . . . . .	65
5.2.2	Ergebnisse . . . . .	67
5.2.3	Fazit . . . . .	69
5.3	Anbauhöhe des Scheinwerfers . . . . .	70
5.3.1	Methodik . . . . .	71
5.3.2	Ergebnisse . . . . .	72
5.3.3	Fazit . . . . .	74
5.4	Reflexblendung - im Passiervorgang . . . . .	75
5.4.1	Methodik . . . . .	75
5.4.2	Ergebnisse . . . . .	78
5.4.3	Fazit . . . . .	82
<b>6</b>	<b>Untersuchungen relevanter Einflussgrößen im Freien</b>	<b>83</b>
6.1	Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang . . . . .	83
6.1.1	Methodik . . . . .	84
6.1.2	Ergebnisse . . . . .	87
6.1.3	Fazit . . . . .	92
6.2	Abblendlichtverteilungen verschiedener Scheinwerfersysteme . . . . .	94
6.2.1	Methodik . . . . .	94
6.2.2	Ergebnisse . . . . .	100
6.2.3	Fazit . . . . .	106
6.3	Lichtfarbe des Abblendlichtes . . . . .	109
6.3.1	Methodik . . . . .	110
6.3.2	Ergebnisse . . . . .	114
6.3.3	Fazit . . . . .	117
<b>7</b>	<b>Abgeleitete Bewertungsmethoden</b>	<b>119</b>
7.1	Geometriemodelle für eine definierte Messumgebung . . . . .	119
7.2	Parametrische 3D-Umgebung . . . . .	122
7.3	Maßzahl GIR . . . . .	125
7.4	Simulationssoftware CAGE . . . . .	127
<b>8</b>	<b>Abgeleitete Anforderungen</b>	<b>135</b>
8.1	Anti-Glare-Funktion für spiegelnde Fahrbahnoberflächen . . . . .	135
8.2	Photometrische Anforderungen . . . . .	137
8.3	Wahrnehmungsbasierte Anforderungen . . . . .	141
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>143</b>
	<b>Thesen</b>	<b>149</b>

---

---

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>151</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>165</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>173</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>175</b>
<b>A Anhang zu Kapitel 4</b>	<b>177</b>
<b>B Anhang zu Kapitel 5</b>	<b>185</b>
<b>C Anhang zu Kapitel 6</b>	<b>195</b>
<b>D Anhang zu Kapitel 7</b>	<b>203</b>
<b>Veröffentlichungen und betreute Arbeiten</b>	<b>205</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>209</b>
<b>Erklärung</b>	<b>211</b>

---



# 1 Einleitung

Die wichtigsten Sensoren zur Wahrnehmung des Straßenverkehrs sind für den Menschen die Augen und für moderne Kfz-Lichtsysteme die Kamera. Die Wahrnehmung des Straßenverkehrs muss auch bei Nacht gewährleistet sein. Die *Economic Commission for Europe* (ECE) schreibt daher vor, dass Kraftfahrzeuge in Fahrtrichtung mit zwei Scheinwerfern für Abblendlicht ausgestattet sein müssen [ECE48].

Primär dient das Abblendlicht zur Ausleuchtung des Straßenraums und zur Anleuchtung dort befindlicher Objekte. Die erzeugte Umfeldleuchtdichte und die Kontraste angeleuchteter Objekte lösen im Auge einen Reiz aus. Die beim Fahrer zu erwartende Reaktion könnte beispielsweise ein Ausweichmanöver oder ein Bremsvorgang sein [Eck93]. Ein möglichst früher Reiz trägt somit zu einer Erhöhung der Verkehrssicherheit bei. Folglich ist ein leistungsfähiges Abblendlicht besonders wichtig.

Ferner stellt das Abblendlicht eine Signalfunktion dar, um andere Verkehrsteilnehmer auf das Fahrzeug aufmerksam zu machen. Dabei darf das Abblendlicht andere Verkehrsteilnehmer weder blenden noch übermäßig beeinträchtigen [ECE48]. Hierfür wurden von der ECE Grenzwerte festgelegt<sup>1</sup>. Diese werden messtechnisch unter idealisierten Bedingungen am Goniophotometer abgeprüft. Unter realen Bedingungen trägt allerdings noch das über die Fahrbahn reflektierte Licht zur Blendung bei. Dieses bleibt entsprechend unberücksichtigt. Eine Aussage über die tatsächliche Blendung im Passiervorgang ist somit nicht möglich.

Technologisch werden heutige Scheinwerfersysteme bereits blendungsarm entwickelt und als “blendfrei“ vermarktet. Zum einen sind dies die sogenannten *Adaptive Frontlighting Systems* (AFS), die ihre Abblendlichtverteilung adaptiv an die jeweilige Fahrsituation anpassen. Zum anderen sind Lichtsysteme mit der Funktionalität *Adaptive Driving Beam* (ADB) erhältlich, wie 2010 im VW Touareg als *Dynamic Light Assist* (DLA) vorgestellt [AFP10]. Diese Systeme adaptieren ihre Fernlichtverteilung in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens. Vorausfahrende und/oder entgegenkommende Verkehrsteilnehmer werden maskiert<sup>2</sup>. Dies gewährleistet bestmögliche Sichtbedingungen für den Fahrer, ohne dabei andere Verkehrsteilnehmer zu blenden.

Trifft dies allerdings stets zu? Welchen Einfluss hat eine regennasse Fahrbahn auf die Blendung? Werden andere Verkehrsteilnehmer wirklich nicht geblendet oder fühlen sie sich nur nicht ge-

---

<sup>1</sup>Siehe hierzu Kapitel 2.1.2.

<sup>2</sup>Maskierung bedeutet hierbei eine Modifikation der Lichtstärkeverteilungen beider Scheinwerfer. Diese reduziert die physiologische Blendung (siehe 2.2.2) vorausfahrender oder entgegenkommender Verkehrsteilnehmer auf das Niveau des Abblendlichtes. Siehe hierzu auch Kapitel 2.1.2.

---

blendet? Mit diesen und noch vielen anderen Fragestellungen beschäftigen sich Wissenschaftler, um künftige Kfz-Scheinwerfer sowohl für den Fahrer als auch für andere Verkehrsteilnehmer zu optimieren.

ROSENHAHN [Ros00] befasste sich beispielsweise mit der Entwicklung von lichttechnischen Anforderungen an Kfz-Scheinwerfer für Schlechtwetterbedingungen. Die von ihm untersuchte, modifizierte Abblendlichtverteilung ermöglicht eine Reduzierung der Blendung in der Regensituation. Die statische Modifikation der Lichtverteilung erweist sich jedoch als unzureichend, um im Passiervorgang auf das Niveau einer trockenen Fahrbahn zu kommen. Folglich schlägt ROSENHAHN eine dynamische Anpassung der Lichtverteilung unter Zuhilfenahme geeigneter Sensorik vor.

Mittlerweile ist eine derartige dynamische Abblendlichtverteilung für spiegelnde Fahrbahnoberflächen, die auf den Passiervorgang optimiert ist, durchaus denkbar. Heute verfügbare Technologien und ADB-Systeme bieten eine gute Grundlage zur Realisierung. Hinzu kommt die steigende Ausstattungsrate künftiger Kraftfahrzeuge mit adaptiven Scheinwerfersystemen [AFP10]. Sowohl die Anforderungen als auch entsprechende Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht sind noch zu entwickeln.

## 1.1 Ziel der Arbeit

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit ist, durch Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht für spiegelnde Fahrbahnoberflächen einen Beitrag zur Verkehrssicherheit zu leisten. Trotz der geringen Fahrleistung bei Nacht (20 %) beträgt der Anteil an tödlichen Unfällen dabei 40 % [Dai14]. Ebenso ereignen sich bei Dämmerung und in der Nacht rund ein Drittel aller Verkehrsunfälle bei einem „nass/feucht/schlüpfrigen“ Straßenzustand [StBA14]. Allerdings haben nicht nur die Lichtverhältnisse und der Straßenzustand einen Einfluss auf die Verkehrssicherheit. Hinzu kommt der demografische Wandel. Bis 2020 werden 64 % der deutschen Bevölkerung älter als 50 Jahre sein. Im übrigen Europa verhält sich diese Entwicklung ähnlich [Wes02]. Folglich wird die Mehrheit der Verkehrsteilnehmer einer Altersklasse angehören, deren Blendempfindlichkeit steigt und Sehschärfe gleichzeitig sinkt. Dies verdeutlicht den Handlungsbedarf, weshalb die GRE<sup>3</sup> Blendung als eines ihrer Hauptthemen erachtet [Wes02].

Diverse Publikationen betonen die Relevanz weiterer Untersuchungen zur Blendungsbewertung im nächtlichen Straßenverkehr. Aktuelle Bewertungsmethoden werden als unzureichend angesehen, insbesondere, weil nicht die Realsituation betrachtet wird (u.a. [Kha12]). Ebenso ist weiterer Forschungsbedarf von Nöten, um intelligente Lichtsysteme bezüglich des Sicherheitszugewinns zu bewerten [SPS<sup>+</sup>09].

---

<sup>3</sup>Definition: Working Party on Lighting and Light Signalling. Bei der GRE handelt es sich um eine Arbeitsgruppe abgesandter Lichtexperten einer jeden Vertragspartei, die normalerweise zweimal jährlich tagt. Hier werden die grundsätzlichen Diskussionen im Rahmen der Erstellung der UNECE-Regularien geführt [Lar09].

---

Neben der Bewertung sind auch die technischen Möglichkeiten zu berücksichtigen. Heute verfügbare AFS- und ADB-Scheinwerfer erhöhen den Fahrkomfort und leisten einen wesentlichen Beitrag zur Verkehrssicherheit. Das Fernlicht ist durch bestimmte Segmentierungsstrategien ([ADR13], [ADR14], [AVD<sup>+</sup>14]), sogenannte "Matrixsysteme", weitgehend optimiert. Diese oder ähnliche Techniken müssen künftig auf das Abblendlicht übertragen werden. Somit wäre auch die Realisierung eines adaptiven blendfreien Abblendlichts denkbar, das den Passiervorgang bei nasser Fahrbahn vergleichbar wie bei trockener gestaltet. Dies würde eine kontinuierliche Reduzierung des Blendniveaus und eine Erhöhung des Fahrkomforts bedeuten.

Bezugnehmend auf die zuvor genannten Fakten sind die wesentlichen Ziele der vorliegenden Arbeit:

- Anforderungen an ein adaptives blendfreies Abblendlicht für spiegelnde Fahrbahnoberflächen aufzustellen.
- Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht, das für spiegelnde Fahrbahnoberflächen optimiert ist, zu entwickeln, genauer:
  - Simulative Bewertungsmethoden zum Einsatz im Entwicklungsprozess.
  - Messtechnische Bewertungsmethoden zur Validierung von Entwicklungsständen.

Beide Ziele sollen sowohl der Wissenschaft als auch der Wirtschaft dienen und letztendlich den Verkehrsteilnehmern zugutekommen.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit orientiert sich an den in Kapitel 1.1 genannten Zielen. Um diese Ziele zu erreichen, wird das in Abbildung 1.1 dargestellte zweigeteilte methodische Vorgehen angewandt.

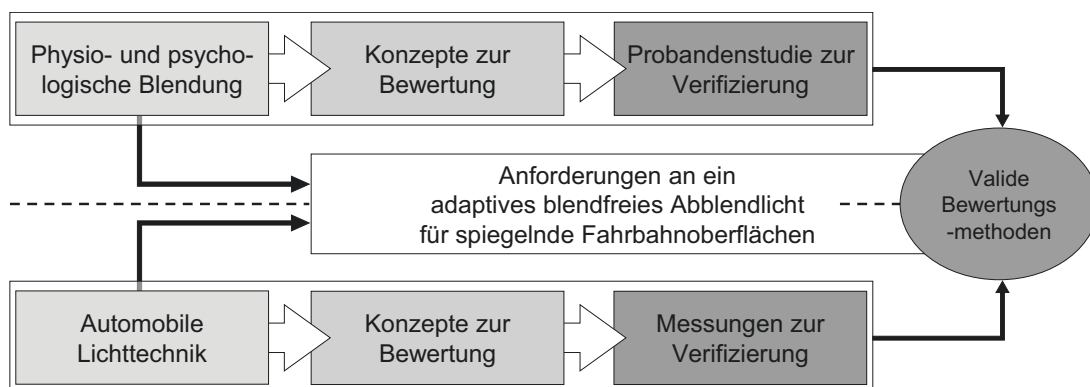


Abbildung 1.1: Methodisches Vorgehen

Der Teil *Physio- und psychologische Blendung* befasst sich mit der Blendungsbewertung des Abblendlichts. Insbesondere werden die Lichtverteilungen verschiedener Systeme und deren Einfluss auf die physio- und psychologische Blendung analysiert.

Der Teil *Automobile Lichttechnik* konzentriert sich auf Bewertungsmethoden für den Entwicklungsprozess automobiler Scheinwerfer. Diese sollen zur Ermittlung lichttechnischer Anforderungen dienen.

Inhaltlich gliedert sich die Arbeit in drei Abschnitte.

Im ersten Abschnitt werden zunächst die wesentlichen Grundlagen (Kapitel 2) vermittelt. Anschließend werden die bisherigen Forschungsergebnisse (Kapitel 3) angeführt. Diese stellen zum einen den Ausgangspunkt der Arbeit dar. Zum anderen leiten sich daraus die Forschungsfragen ab. Abschließend dienen sie als Diskussionsgrundlage der eigenen Ergebnisse.

Im zweiten Abschnitt, dem Hauptteil der Arbeit, werden die eigenen Untersuchungen dargestellt. Einleitend wird in Kapitel 4 der Parameterraum abgegrenzt. Hierzu findet in Kapitel 4.1 eine Auflistung relevanter Einflussgrößen statt. Kapitel 4.2 veranschaulicht in Form eines Geometriemodells, welche Parameter bei der Blendungsbewertung im Straßenverkehr mathematisch zu berücksichtigen sind. Dieses Modell eignet sich zudem, um Anforderungen an ein adaptives blendfreies Abblendlicht abzuleiten. Kapitel 4.3 geht abschließend auf die durchgeführte Umfrage zum Thema „*Blendungerscheinung im nächtlichen Straßenverkehr*“ ein. Neben den geometrischen Anforderungen aus Kapitel 4.2 legt die Umfrage aus Kapitel 4.3 den Grundstein für alle nachfolgenden Untersuchungen. Die Umfrage prüft die Relevanz eines adaptiven blendfreien Abblendlichts für spiegelnde Fahrbahnoberflächen aus Sicht der Verkehrsteilnehmer. In den folgenden beiden Kapiteln wird auf die durchgeführten Versuche eingegangen. Kapitel 5 betrachtet die relevanten Einflussgrößen unter Laborbedingungen. Kapitel 6 beschreibt die im Freien durchgeführten Untersuchungen. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden in Kapitel 7 die entwickelten Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht angeführt. Hierbei werden sowohl simulative als auch messtechnische Methoden vorgestellt. Kapitel 8 beinhaltet zuletzt die abgeleiteten Anforderungen für ein adaptives blendfreies Abblendlicht. Besonderheit der Anforderungen ist die Anti-Glare-Funktion (AGF) (siehe Kapitel 8.1). Die photometrischen Anforderungen werden unter anderem anhand des ECE-Messschirms [ECE123] schematisch dargestellt (siehe Kapitel 8.2). Zusätzlich wird auf wahrnehmungsbasierte Anforderungen hingewiesen (siehe Kapitel 8.3).

Im dritten Abschnitt der Arbeit (Kapitel 9) werden die erzielten Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten gegeben.

---



## 2 Grundlagen

Zum besseren Verständnis der Arbeit werden in diesem Kapitel wissenswerte Grundlagen vermittelt. Die Grundlagen beziehen sich auf die Schwerpunkte der Arbeit. Dies ist das Abblendlicht heutiger Kfz-Scheinwerfer und die dadurch verursachte Blendung im Straßenverkehr (siehe Kapitel 2.2). Allgemeine Grundlagen der Lichttechnik werden nicht explizit erläutert. Hier wird auf das Buch *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr* [Eck93] verwiesen. Dieses beschreibt die Grundlagen im Kontext.

### 2.1 Kraftfahrzeugscheinwerfer und deren Abblendlicht

Dieses Kapitel beschäftigt sich im Allgemeinen mit dem Stand der Technik von Kfz-Scheinwerfern. Speziell geht es um das Abblendlicht und die damit verbundenen Anforderungen. Zuletzt werden photometrische Messmethoden angeführt, die sich zur Prüfung der Anforderungen eignen.

#### 2.1.1 Stand der Technik

Das nachfolgende Kapitel untergliedert sich in drei Bereiche. Zunächst findet eine Gegenüberstellung der grundsätzlich verfügbaren optischen Systeme und deren Funktionsprinzipien statt. Des Weiteren werden heute gängige Leuchtmittel zur Realisierung des Abblendlichts aufgelistet. Abschließend geht es um adaptive Scheinwerfersysteme, die heutzutage Stand der Technik sind.

#### Optische Systeme

Als optische Systeme werden in Kfz-Scheinwerfern Reflexions- oder Projektionssysteme eingesetzt. Abbildung 2.1 zeigt den schematischen Aufbau beider.

Bei einem Reflexionssystem (Abbildung 2.1a) ist maßgeblich der Reflektor für die Verteilung des Lichtes im Straßenraum verantwortlich. Ältere Scheinwerfer weisen in der Abschlusscheibe zusätzlich optische Elemente auf. Diese waren erforderlich, um die notwendige Lichtverteilung zu generieren. Der technologische Fortschritt in der Entwicklung und Fertigung ermöglicht heutzutage die Erzeugung sogenannter Freiformreflektoren. Die einzelnen Facetten des Reflektors erzeugen die Lichtverteilung mit all den relevanten Merkmalen, wie auch der Hell-Dunkel-Grenze (HDG)<sup>1</sup>. Die damals noch aus Glas gefertigten Abschlusscheiben mit ihrer refraktiven Struk-

---

<sup>1</sup>Die Hell-Dunkel-Grenze teilt den Verkehrsraum horizontal in einen unteren ausgeleuchteten und einen oberen dunklen Bereich. Definition, siehe [ECE112].

---



Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines Reflexions- (links) und Projektionssystems (rechts) in Seitenansicht [Pet14]

turierung gehören damit der Vergangenheit an. Heute erfolgt die Auslegung aus Kunststoff und weitgehend ohne optische Elemente. Dies kommt den immer höheren Design-Ansprüchen zugute. Schließlich verleiht ein Scheinwerfer dem Fahrzeug eine Art “Gesicht“, trägt zum Wiedererkennungswert bei und spiegelt das Markenimage wider (vgl. [KTK<sup>+</sup>09]).

Das Projektionssystem (Abbildung 2.1b) eines Kfz-Scheinwerfers ist vergleichbar mit einem Projektor. Nachdem das emittierte Licht von einem, meist ellipsoid-förmigen, Reflektor kollimiert wurde, wird das Licht über die Linse im Straßenraum abgebildet. Zusätzlich befindet sich eine Blende im Strahlengang, die - verglichen mit einem Reflexionssystem - eine scharfe Hell-Dunkel-Grenze verursacht. Durch Variation der Blende eignet sich das Projektionssystem zur Erzeugung mehrerer Lichtfunktionen in nur einem optischen System. Daher weisen heutige Projektionssysteme häufig anstelle der Strahlenblende eine profilierte Walze auf. Genauer wird hierauf im Abschnitt *Adaptive Scheinwerfersysteme* eingegangen (siehe S. 8).

## Leuchtmittel

Der Fortschritt fand nicht nur bei den Entwicklungs- und Fertigungstechnologien statt. Auch die eingesetzten Leuchtmittel wurden weiterentwickelt. Zur Realisierung des Abblendlichts werden mittlerweile serienmäßig drei verschiedene Leuchtmittel in Kfz-Scheinwerfern verbaut. Dies sind die konventionelle “Halogen“-Glühlampe, die Gasentladungslampe (auch “Xenon“-Lampe genannt) und die LED (engl.: Light Emitting Diode). Wenn auch technisch nicht ganz korrekt, werden aufgrund der hohen Verbreitung auch in dieser Arbeit die Bezeichnungen “Halogen“- und “Xenon“-Scheinwerfer benutzt.

Der Audi A6 (C7) ist eines der ersten Fahrzeuge, das serienmäßig mit allen drei Leuchtmitteln erhältlich war. Die äußerlichen Unterschiede der Scheinwerfer visualisiert Abbildung 2.2.

Die Kombination aus optischem System und eingesetztem Leuchtmittel hat weitere Auswirkungen auf die Performance des Gesamtsystems. Eine Gegenüberstellung der Systeme hinsichtlich bestimmter Merkmale findet sich in Tabelle 2.1.



Reflexionssystem (Halogen)

Projektionssystem (Xenon)

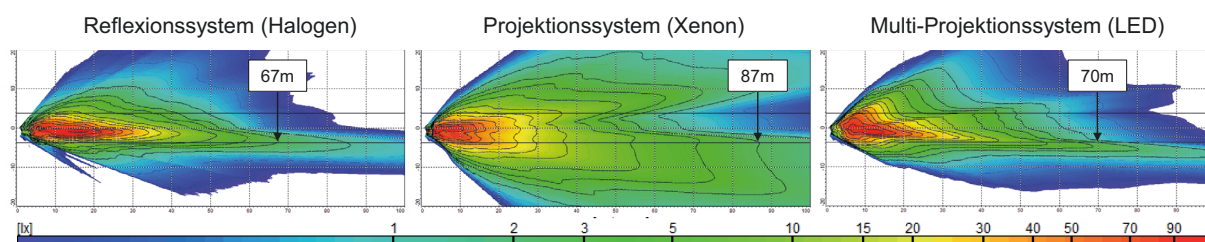
Multi-Projektionssystem (LED)

Abbildung 2.2: Vergleich der optischen Systeme des Audi A6 (C7) Serienscheinwerfers

Tabelle 2.1: Vergleich der Scheinwerfersysteme des Audi A6 hinsichtlich bestimmter Merkmale des Abblendlichts

Merkmale / (Einheit)		Halogen	Xenon	LED
Leistungsaufnahme	$/(W)$	$\approx 57$	$\approx 42$	$\approx 26$
Lichtstrom	$/(lm)$	$\approx 455$	$\approx 702$	$\approx 624$
Erkennbarkeitsentfernung	$/(m)$	$\approx 67$	$\approx 87$	$\approx 70$
Ähnlichste Farbtemperatur	$/(K)$	$\approx 3200$	$\approx 4200$	$\approx 5500$

Der Lichtstrom des Systems mit Gasentladungslampe ist aktuell noch höher. Dies zeigt sich auch bei den ermittelten Erkennbarkeitsentfernungen<sup>2</sup>. Sowohl das Halogen-Reflexionssystem als auch das LED-Projektionssystem weisen Erkennbarkeitsentfernungen  $\leq 70$  m auf. Die Auswertung für das Xenon-Projektionssystem liefert hingegen eine Erkennbarkeitsentfernung von  $\approx 87$  m. In Anbetracht der Reaktionszeit bietet das Xenon-Projektionssystem somit ein Sicherheits-Plus im Straßenverkehr. Dennoch ist die LED-Technik auf dem Vormarsch und liefert zudem Vorteile bei der Realisierung adaptiver Lichtfunktionen.

Abbildung 2.3: Beleuchtungsstärkeverteilung  $E(lx)$  des jeweiligen Scheinwerfers auf der Fahrbahn inklusive markierter Erkennbarkeitsentfernung (m) anhand der 2-lx-Linie

Ein weiteres Merkmal des Leuchtmittels ist die ähnlichste Farbtemperatur (siehe Tabelle 2.1). Hohe ähnlichste Farbtemperaturen etwa von 4500 K bis 6500 K werden als tageslichtähnlich empfunden. Einen Vergleich der Systeme hinsichtlich Farbtemperatur und dem damit verbundenen Helligkeitsempfinden liefert Abbildung 2.4.

<sup>2</sup>Definition Erkennbarkeitsentfernung, siehe Kapitel 3.2 ab S. 25. Mittlere Erkennbarkeitsentfernungen liegen typischerweise bei 60 m bis 100 m [Völ06].



Abbildung 2.4: Vergleich der Audi A6 (C7) Serienscheinwerfer hinsichtlich der unterschiedlichen ähnlichsten Farbtemperaturen (Links: Halogen; Mitte: Xenon; Rechts: LED)

### Adaptive Scheinwerfersysteme

Im Jahr 2007 verabschiedete die ECE die Regelung R123<sup>3</sup> [ECE112] für Scheinwerfer mit AFS-Funktionalität [Lar07]. Adaptive Lichtverteilungen, wie beispielsweise das Stadt-, Landstraßen-, Autobahn- oder statische Kurvenlicht hielten zunächst Einzug in Scheinwerfer der Premiumklasse [Rei09]. Die Realisierung der Funktionen erforderte damals die Entwicklung komplexer mechatronischer Scheinwerfersysteme. Solche Funktionen gehören heutzutage bei Neuentwicklungen zum Standard [KSK12]. Primär beziehen sich die zuvor beschriebenen Funktionen auf die Anpassung des Abblendlichtes an geänderte Fahrsituationen. Dies passiert durch die Variation statischer Lichtverteilungen über eine im Scheinwerfer befindliche Walze. Abbildung 2.5 zeigt ein solches System inklusive adaptiver Lichtverteilungen.

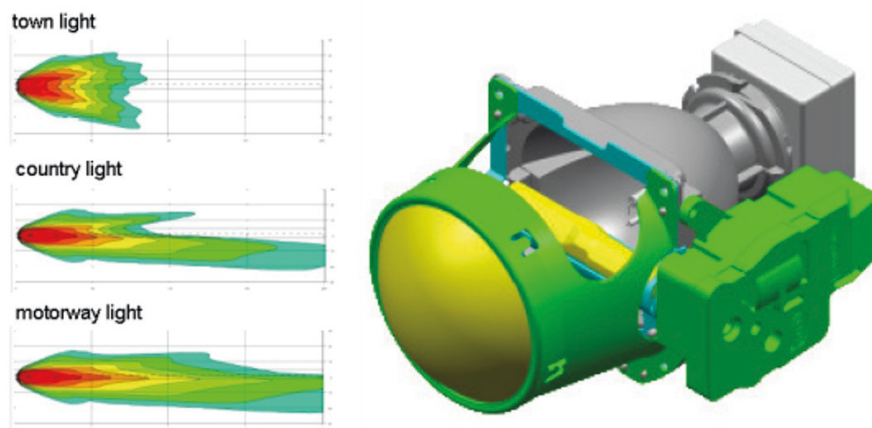


Abbildung 2.5: Projektionsmodul mit Freiformwalze (re.) zur Realisierung adaptiver Lichtverteilungen (li.) [KS07].

Weitere, im Fahrzeug verbaute Sensoren, führen dazu, dass auch das Fernlicht intelligenter wird. Zunächst gab es Funktionen wie den Fernlichtassistenten (FLA<sup>4</sup>). Die Weiterentwicklung zu kamerabasierten Lichtsystemen ermöglicht nicht nur das automatische Zu- und Abschalten des

<sup>3</sup>Genauere Details finden sich in Kapitel 2.1.2.

<sup>4</sup>Bezeichnung der VW AG. Der FLA schaltet automatisch zwischen Abblend- und Fernlicht um, ohne dass der Fahrer eingreifen muss.

Fernlichtes, sondern das dauerhafte Fahren mit Fernlicht, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Bezeichnet wird ein solches System als Advantive Driving Beam (ADB). Zur Überprüfung der Effektivität und zur Optimierung dieser Systeme werden seit einigen Jahren umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Ein System, das diese Lichtfunktion ohne Mechanik realisiert, ist der Audi „Matrix LED-Scheinwerfer“. Dieses System ist aktuell Stand der Technik. Unter anderem besitzt dieses System eine Allwetterlichtverteilung. Primäres Ziel der Lichtverteilung ist die Reduzierung der Eigenblendung des Fahrers in Schlechtwettersituationen, nicht die entgegenkommender Verkehrsteilnehmer. Die Komplexität des Scheinwerfers verdeutlicht Abbildung 2.6.

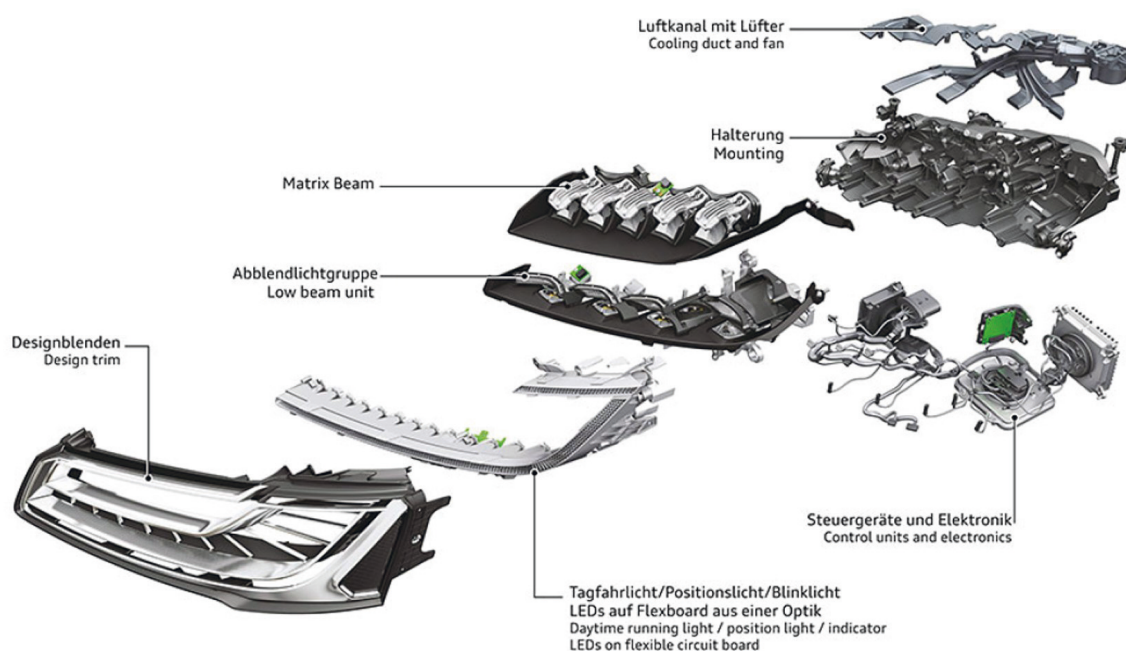


Abbildung 2.6: Explosionsdarstellung des Audi „Matrix LED-Scheinwerfers“ (Quelle: Audi).

Die Entwicklung eines adaptiven Scheinwerfersystems ist sehr interdisziplinär und erfordert viel Know-how. Insbesondere wegen der steigenden Anzahl an dynamischen Lichtfunktionen müssen viele Entwicklungsbereiche einbezogen werden, damit die Performance auf der Straße auch den Vorstellungen entspricht. Eine Stakeholder-Analyse ist empfehlenswert. Je nach OEM (= Original Equipment Manufacturer), OES (= Original Equipment Supplier) und Endkunde variieren die Interessen. Das Lichttechnische Institut (LTI) am Karlsruher Institut für Technologien (KIT) entwickelt daher das System Propix [Mic15] (siehe Abbildung 2.7). Propix steht für Projektor-basiertes Pixellicht und eignet sich zum Testen innovativer Lichtfunktionen. Für Tests zur Bewertung des Blendempfindens ist Propix aufgrund der konstruktiven Auslegung mit sechs Projektoren nur bedingt geeignet. Im Straßenverkehr verursachen zwei Scheinwerfer die Blendung. Die von ROSENHAHN [Ros00] vorgeschlagene adaptive Abblendlichtverteilung ist somit nur aus Fahrerperspektive, nicht aber aus der des geblendeten Verkehrsteilnehmers, erlebbar.



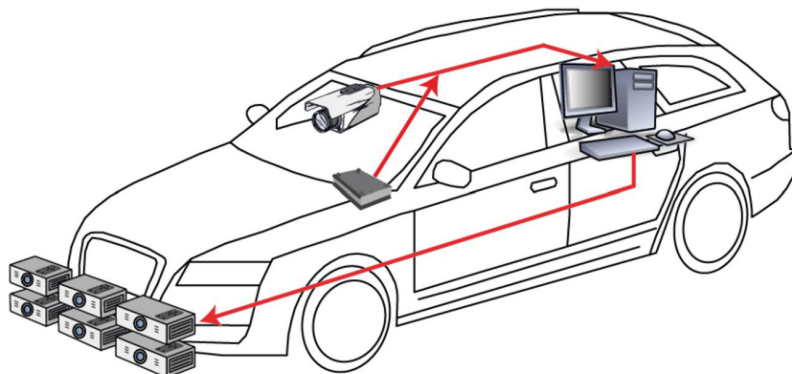


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung von Propix am Testfahrzeug des KIT [MNN13]

### 2.1.2 Anforderungen an das Abblendlicht

Das Abblendlicht dient grundsätzlich zur Ausleuchtung des Straßenraums bei Dunkelheit. Eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer gilt es dabei zu vermeiden [Kir11]. Wie bereits im Abschnitt *Adaptive Scheinwerfersysteme* angemerkt (siehe S. 8), ist zur Ermittlung der Anforderungen an das Abblendlicht eine Stakeholder-Analyse sinnvoll. Diese wird nachfolgend in drei Gruppen untergliedert:

#### Kraftfahrzeugfahrer

Grundsätzlich müssten Kraftfahrzeugfahrer die meisten Anforderungen an das Abblendlicht stellen. Sie nutzen das Abblendlicht zu 80%, wenngleich eine Fernlichtnutzung in über 50% der Zeit möglich gewesen wäre [BKL09]. Beim Kauf eines Fahrzeuges wird der Lichttechnik allerdings nur ein geringer Stellenwert beigemessen. Schließlich finden Autokäufe in der Regel bei Tageslicht und Probefahrten nur in Ausnahmefällen bei Nacht statt ([KV03], [Völ06]). Vorrangig ist das Aussehen des Fahrzeuges entscheidend, zu dem die lichttechnischen Komponenten jedoch einen entscheidenden Beitrag leisten. Die Unterschiede wurden in Kapitel 2.1.1 aufgezeigt. Es ist daher die Aufgabe der Forschung und Entwicklung, der designgetriebenen Gesellschaft bei der Entscheidungsfindung zu helfen. Designaspekte dürfen nicht auf Kosten sicherheitsrelevanter Aspekte gehen.

#### Fahrzeughersteller, Lieferanten und Entwicklungsdienstleister

Fahrzeughersteller, Lieferanten und Entwicklungsdienstleister beschäftigen sich tagtäglich mit der Entwicklung von Scheinwerfern und deren Abblendlicht. Dabei erlangen sie neue Erkenntnisse über das Zusammenspiel der verschiedenen Bestandteile, die zur Realisierung der Lichtverteilung beitragen. Das Know-how der Entwickler ist folglich notwendig, um die lichttechnischen Anforderungen mit dem technischen Fortschritt abzugleichen. Dies erfolgt über verschiedene

Organe. Eines davon ist die GTB<sup>5</sup>, die maßgeblich zu den gesetzmäßig vorgeschriebenen Anforderungen beiträgt. Die Mitglieder entstammen größtenteils der Industrie und technischen Einrichtungen. Weitere Informationen über die Organisation der GTB und über den Ablauf bei der Einreichung eines Gesetzesentwurfs liefert VAN LAARHOVEN [Lar09].

Neben den gesetzmäßigen Anforderungen hat jeder Fahrzeughersteller und Lieferant nochmals eigene lichttechnische Kriterien [Böb09]. Diese begründen sich auf Erfahrungswerten und auf deren Anspruch an die Performance des Abblendlichts. Demzufolge unterscheiden sich die Lichtverteilungen eines Abblendlichtes teilweise erheblich. Daher ist das Bestreben des TC4-45<sup>6</sup>, einen Industrie-Standard zur Bewertung zu etablieren. Dieser wurde in Form des technischen Berichts CIE 188:2010 [CIE10] veröffentlicht. Hierauf wird in Kapitel 3.4 detaillierter eingegangen.

### Gesetzgebung

Die Gesetzgebung hat den größten Einfluss auf die Anforderungen einer Abblendlichtverteilung. Sie schreibt vor, welche Anforderungen eine Abblendlichtverteilung letztendlich erfüllen muss. Ausschlaggebend sind meist die eingereichten Gesetzesvorschläge der GTB. International sind unterschiedliche Gesetzmäßigkeiten zu beachten. Weltweit am bedeutendsten sind die Regelungen der ECE und der SAE (Society of American Engineers) [Lar03].

Die Bewertung der Blendung, die ein Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist, wird in den internationalen Vorschriften unterschiedlich ausgeprägt behandelt. Da sich die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit auf das Abblendlicht für den europäischen Markt beschränken, werden nachfolgend nur die hierfür relevanten Regelungen der ECE angeführt. Neben Regelung R48, die allgemeine Vorschriften bezüglich der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen an Kraftfahrzeugen beinhaltet, sind die Leuchtmittel-spezifischen Regelungen R98 (Gasentladungslichtquellen) und R112 (Glühlampen und LED) zu beachten. Des Weiteren ist aufgrund der zunehmenden Funktionalität von Scheinwerfersystemen heutzutage Regelung R123 besonders wichtig. Allen Regelungen gemein ist Punkt B50L<sup>7</sup> mit einem maximal zulässigen Wert von 350 cd oberhalb der HDG zur Bewertung von Scheinwerfern hinsichtlich der direkten Blendung. Weitere Gemeinsamkeiten werden nachfolgend bei der detaillierten Betrachtung von Regelung R123 aufgegriffen.

### *ECE-R123*

Regelung R123 [ECE123] definiert alle Vorschriften zur Genehmigung adaptiver Scheinwerfersysteme. Die photometrischen Anforderungen der jeweiligen adaptiven Abblendlichtverteilungen

---

<sup>5</sup>Definition: Groupe de Travail “Bruxelles 1952“; Dieses Organ wird nicht durch die Regierung gestellt.

<sup>6</sup>Definition: Technisches Komitee der CIE, unter der Division 4: Lighting and Signalling for Transportation, das sich mit Bewertungsmethoden für die automobilen Lichttechnik befasst.

<sup>7</sup>Der Punkt B50L entspricht der Position der Augen eines entgegenkommenden Verkehrsteilnehmer in 50 m Entfernung. Wissenschaftliche Untersuchungen ergaben, dass die Sehleistung in dieser Entfernung aufgrund der physiologischen Blendung besonders beeinträchtigt ist (vgl. Abbildung 3.1, S. 21). Der maximal zulässige Wert am Punkt B50L bezieht sich dabei auf die in 25 m Entfernung gemessene Beleuchtungsstärke.

sind in Anhang 3, Tabelle 1 dieser Norm zu finden. Zur geometrischen Darstellung ist der Messschirm inklusive der Messpunkte/-bereiche in Polarkoordinaten aufgeführt (siehe Abbildung 2.8). Ein solcher Messschirm findet sich ebenfalls in den Regelungen R98 und R112. Der Koordinatenursprung des Messschirms entspricht der optischen Achse des Scheinwerfers. Die durch die Polarkoordinaten aufgespannte Ebene ist senkrecht zu dieser. Bei einem Scheinwerfer mit Halogenlampe (siehe ECE 112) entspricht der Koordinatenursprung in der Regel der Glühwendel des Leuchtmittels. Der Messablauf zur Abnahme des Scheinwerfersystems wird in Anhang 9 der Regelung beschrieben. Weitere Informationen zum Messablauf finden sich in Kapitel 2.1.3 dieser Arbeit.

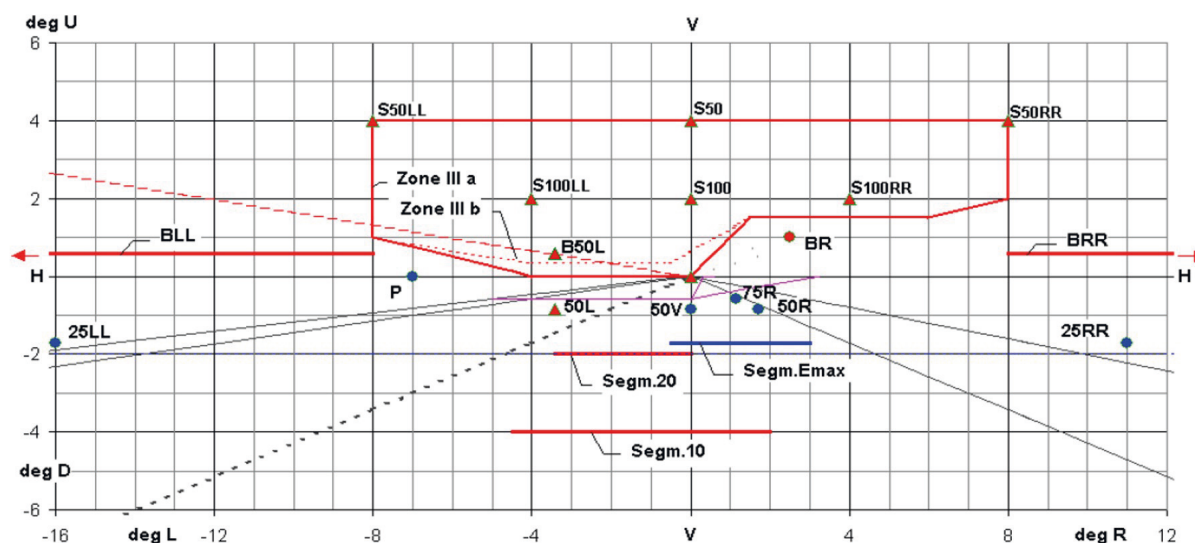


Abbildung 2.8: Messpunkte/-bereiche der photometrischen Anforderungen nach [ECE123]

Neben den allgemeinen Anforderungen der Regelung R123 an ein Abblendlicht wird im weiteren auf die blendungsspezifischen Messpunkte/-bereiche eingegangen (siehe Abbildung 2.8). Der Punkt B50L ist für das Abblendlicht adaptiver Scheinwerfersysteme gleichermaßen relevant und daher das wesentliche Kriterium zur Blendungsbewertung. In Abhängigkeit der jeweiligen Lichtverteilung<sup>8</sup> resultieren unterschiedliche Grenzwerte. Klasse C und V dürfen eine maximale Lichtstärke von 350 cd aufweisen, Klasse E und W hingegen 625 cd. Darüber hinaus darf die Lichtstärke oberhalb der H-H-Linie in *Zone III (a,b)* einen Wert von 625 cd<sup>9</sup>, bzw. 880 cd<sup>10</sup> nicht übersteigen.

Zusätzlich zu den blendungsspezifischen Messpunkten/-bereichen oberhalb der H-H-Linie sind unterhalb der H-H-Linie das *Segment 20* und das *Segment 10* zu beachten (siehe Abbildung 2.8). Die zulässige Lichtstärke unterhalb *Segment 10* bei Klasse W darf beispielsweise maximal 7100 cd betragen. Im Fall von Klasse W (= Schlechtwetterlichtverteilung) dient dieser Grenzwert zur

<sup>8</sup> Adaptive Abblendlichtverteilungen werden in vier Klassen (Class C, V, E, W) unterteilt [ECE123].

<sup>9</sup> Dieser Wert bezieht sich auf Zone IIIa für die Klassen C und V

<sup>10</sup> Dieser Wert bezieht sich auf Zone IIIb für die Klassen E und W



Minimierung der Reflex- und Eigenblendung (siehe hierzu Kapitel 2.2.1). Die Anforderungen basieren auf Erkenntnissen von DAMASKY [Dam95] und ROSENHAHN [Ros00]. Beide haben sich mit der Entwicklung lichttechnischer Anforderungen adaptiver Kraftfahrzeugscheinwerfer beschäftigt (siehe hierzu auch Kapitel 3). Diese Anforderungen bilden den Ausgangspunkt der eigenen Untersuchungen.

### 2.1.3 Photometrische Messmethoden

In der Photometrie gibt es die vier Grundgrößen *Lichtstrom*  $\Phi$ , *Lichtstärke*  $I$ , *Beleuchtungsstärke*  $E$  und *Leuchtdichte*  $L$ . Hierbei ist zwischen direkt und indirekt messbaren Größen zu unterscheiden. Die Beleuchtungsstärke  $E(lx)$  stellt die einzig direkt messbare Größe dar, wohingegen die Leuchtdichte  $L(cd/m^2)$  die einzige mit der Helligkeitswahrnehmung korrespondierende Größe repräsentiert.

Die nachfolgenden Kapitel befassen sich mit den Möglichkeiten zur quantitativen Erfassung von Licht, das von Kfz-Scheinwerfern emittiert wird. Zunächst wird auf das Goniophotometer und anschließend auf die Leuchtdichtemesskamera (LMK) eingegangen. Für detaillierte Informationen zu den verschiedenen Messverfahren wird auf SCHWANENGEL verwiesen [Schw10].

#### Goniophotometer

Abbildung 2.9 zeigt den schematischen Aufbau einer Goniophotometer-Messstrecke zur Vermessung von Kfz-Scheinwerfern. Die Vermessung der Lichtstärkeverteilung erfolgt mäanderförmig<sup>11</sup>. Zu jeder Winkelkombination ( $\vartheta$ ,  $\varphi$ ) wird äquidistant ein Messwert für die Beleuchtungsstärke aufgezeichnet. Die zuvor beschriebene Methode basiert auf dem photometrischen Entfernungsgesetz, entsprechend Gleichung 2.1.  $I$  ist dabei die Lichtstärke ( $cd$ ),  $r$  die Messentfernung ( $m$ ) und  $\Omega_0$  der Einheitsraumwinkel in ( $sr$ ).

$$E = \frac{I}{r^2} * \Omega_0 \quad (2.1)$$

Hierbei wird die Annahme einer idealen Punktlichtquelle zugrunde gelegt, die ein Kfz-Scheinwerfer aber nicht erfüllt. Die Approximation des Scheinwerfers als ideale Punktlichtquelle führt daher zu einem Messfehler. Je nach Form, Größe und Komplexität des Scheinwerfers und dessen Lichtstärkeverteilung variiert dieser. Durch Überschreiten der sogenannten photometrischen Grenzentfernung sind tolerierbare Messfehler zu erzielen [Schw10].

Bei der Messung eines Kfz-Scheinwerfers am Goniophotometer ist gesetzlich eine Messentfernung von 25 m vorgeschrieben [ECE112]. Somit ist bei gegebener Messentfernung und einem angenommenen Durchmesser der Lichtaustrittsfläche von 0,25 m ein Verhältnis von 1:100 sichergestellt und das photometrische Entfernungsgesetz ausreichend genau [Schw10]. Ob die Messmethode

<sup>11</sup>Schrittweise, vertikale Rotation der Lichtquelle/des Scheinwerfers und anschließendes Heben/Senken nach jedem vertikalen Durchlauf.

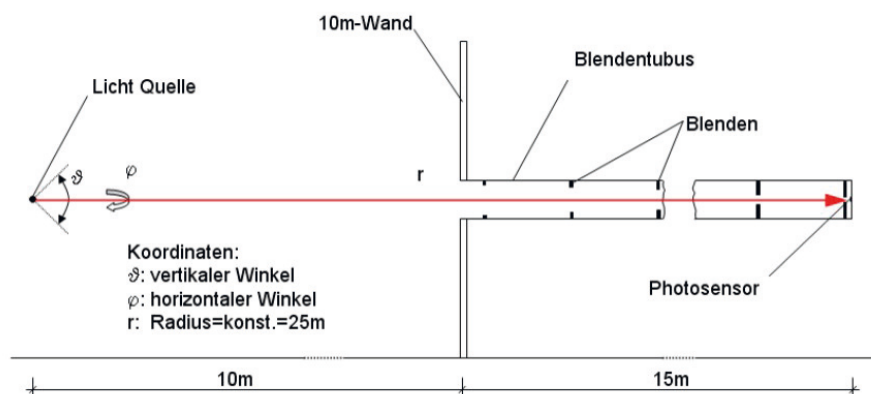


Abbildung 2.9: Goniophotometer-Messstrecke zur lichttechnischen Vermessung von Kfz-Scheinwerfern (direkte Messmethode) [Schw10]

hinsichtlich komplexerer Systeme, deren Lichtverteilung aus vielen Einzellichtquellen (z.B.: Voll-LED Scheinwerfer) erzeugt wird, noch immer gültig ist, wird aktuell diskutiert [SMK<sup>+</sup>15].

### Leuchtdichtemesskamera

Die Ermittlung des Lichtstärkeverteilungskörpers (LVK) unter Einsatz der Leuchtdichtemesskamera (LMK) repräsentiert eine indirekte Messmethode. Der schematische Messaufbau ist in Abbildung 2.10 zu sehen. Bei einer solchen Messung befindet sich zwischen Sender (= Lichtquelle, bzw. Scheinwerfer) und Empfänger (= LMK) ein zusätzliches Medium. Der vom Scheinwerfer emittierte Lichtstrom verursacht auf dem Medium eine Beleuchtungsstärke. In Abhängigkeit der Reflexionseigenschaft des Mediums resultiert daraus eine Leuchtdichte. Diese wird orts aufgelöst von der LMK erfasst. Je nach Messaufgabe sind unterschiedliche Konfigurationen (u.a. Messentfernung, Objektiv-Auswahl) denkbar. Hierbei müssen die geometrischen Zusammenhänge genau bekannt sein, um anschließend die Beleuchtungsstärke und den LVK berechnen zu können.

MARUTZKY ET AL. [MKH<sup>+</sup>14] wiesen für diese Messmethode vergleichbare Messgenauigkeiten wie für die Goniophotometer-Messung nach. Ebenso wurde der Einfluss der Messentfernung untersucht [SMK<sup>+</sup>15]. Für einen quantitativen Vergleich empfiehlt sich die Messentfernung von 25 m. Zur qualitativen Bewertung ist auch die Messentfernung von 10 m geeignet. Da sich die Messgenauigkeiten allerdings systembedingt unterscheiden, ist die Art des optischen Systems zu berücksichtigen.

Zur Auswertung der Leuchtdichtemessung hinsichtlich der Gesetzmäßigkeiten und der photometrischen Messvorschrift ist eine spezielle Zusatz-Software verfügbar [Tec05]. Für weitere Details zu dieser Messmethode wird an dieser Stelle auf SCHWANENGEL [Schw10] und in Bezug auf mögliche Konfigurationen auf PORSCH ET AL. [PKS12] verwiesen. Unabhängig von der zuvor beschriebenen Methode eignet sich die LMK auch zur Blendungsbewertung ([Por07], [PKS12]).

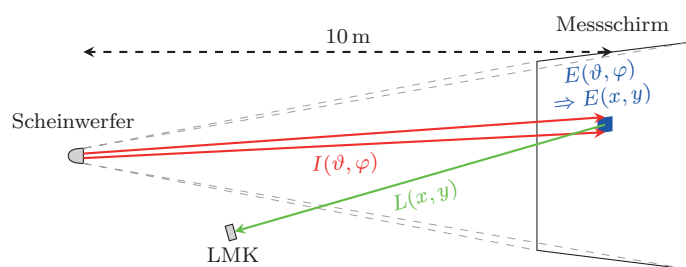


Abbildung 2.10: LVK-Messmethode (indirekte Messmethode) [Schw10]

## 2.2 Blendung

Der Begriff *Blendung* wurde wissenschaftlich bereits vor über 100 Jahren von PARSONS [Par10] näher beleuchtet, der auf die physio- und psychologische Wirkung hinweist. Im internationalen Wörterbuch der Lichttechnik wird Blendung heutzutage wie folgt definiert:

*“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“* [CIE11]

Hier ist ebenfalls die Unterscheidung in die Bereiche der physiologischen („...reduction in the ability to see ...“) und psychologischen („... discomfort ...“) Blendung enthalten (vgl. [Par10]).

Im folgenden wird zunächst auf verschiedene Arten und anschließend auf die Bewertung der Blendung eingegangen. Für einen erweiterten Überblick zum Thema Blendung mit Bezug auf die Kfz-Lichttechnik wird auf den Beitrag von RICHTER [Ric12] im *Handbuch für Beleuchtung* hingewiesen.

### 2.2.1 Blendungsarten im Straßenverkehr

Im Straßenverkehr sind bestimmte Blendungsarten besonders zu berücksichtigen. Nachfolgend werden die Arten aufgeführt, die in Abhängigkeit geänderter Umgebungsbedingungen einen besonderen Einfluss haben und in der vorliegenden Arbeit näher betrachtet werden.

- Direktblendung
- Reflexblendung
- Transiente Blendung / Adaptationsblendung

Abbildung 2.11 veranschaulicht den Unterschied zwischen Direkt- und Reflexblendung. Das von einem Scheinwerfer emittierte Licht verursacht sowohl eine Direkt-, als auch eine Reflexblendung. Welche Blendungsart die Gesamtblendung stärker beeinflusst, ist zum einen von der Lichtverteilung des Scheinwerfers und zum anderen von der Reflexionseigenschaft der Fahrbahnoberfläche abhängig (siehe auch Kapitel 3.3, 5.1, 6.2). Ebenso kommt es im nächtlichen Straßenverkehr zu einer transienten Blendung durch die im Gesichtsfeld kurzzeitig erscheinenden Scheinwerfer. Bei

häufiger transienter Blendung ist eine Rückanpassung an das ursprüngliche Leuchtdichteniveau nicht vollständig möglich und es kann zu einer schnellen Ermüdung der Augen kommen [Wii14].

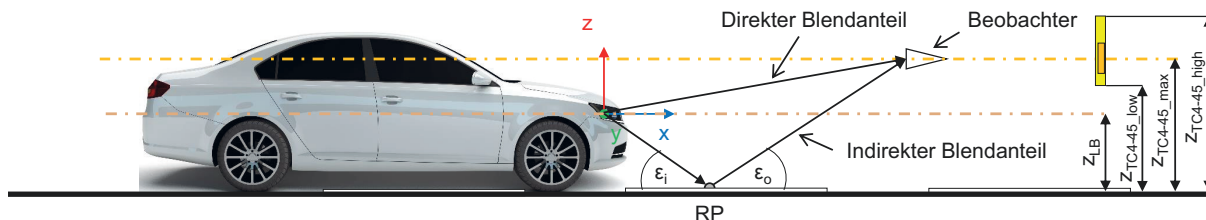


Abbildung 2.11: Straßenszene in Seitenansicht zur Veranschaulichung der direkten und indirekten Blendung; RP = Reflexpunkt bei dem Einfallswinkel = Ausfallswinkel ist (für weitere geometrische Bezeichnungen siehe Kapitel 4.2).

### 2.2.2 Methoden zur Blendungsbewertung

Die Art der Beleuchtung definiert, welche Methoden bzw. Berechnungsmodelle bei der Blendungsbewertung anzuwenden sind. Hierbei ist zwischen Innen-, Außen- und Kfz-Beleuchtung zu unterscheiden. Eine Übersicht der verschiedenen Modelle in Abhängigkeit der Beleuchtung liefert VÖLKER [Völ12]. Wenngleich die zuvor beschriebene Unterteilung praktikabel sein mag, ist VÖLKER der Ansicht, dass Blendung wissenschaftlich gesehen mit einem Modell beschreibbar sein müsste, das unterschiedliche Koeffizienten hat. Hiermit befasst sich seit September 2013 ein Zusammenschluss lichttechnischer Fachgebiete deutscher Hochschulen (u.a. TU Berlin, TU Ilmenau, TU Darmstadt, KIT Karlsruhe).

Unabhängig von der jeweiligen Beleuchtungsart ist zwischen physiologischer (engl. Disability glare) und psychologischer Blendung (engl. Discomfort glare) zu unterscheiden. Ersteres verursacht eine Reduzierung der Sehleistung, letzteres hingegen ein Unwohlsein. Die Reduzierung der Sehleistung muss allerdings weder ein Unwohlsein, noch umgekehrt ein Unwohlsein eine Reduzierung der Sehleistung implizieren [Wil10]. Dennoch sind beide Blendungsarten im Straßenverkehr möglichst gering zu halten.

Zusammenfassend gibt es heutzutage viele Methoden zur Blendungsbewertung, die nicht direkt vergleichbar sind. Zur Abnahme von Kfz-Scheinwerfern sind gesetzlich bestimmte Kriterien festgelegt (vgl. Kapitel 2.1.2). Diese bewerten die, durch einen Scheinwerfer verursachte, physiologische Blendung unter Laborbedingungen und vernachlässigen dabei Umgebungseinflüsse, die mit der Lichtverteilung des Scheinwerfers interagieren. Eine Bewertung der psychologischen Blendung findet nicht statt. Dies zeigt, dass bei der gesetzlichen Abnahme nicht alle Einflüsse berücksichtigt werden [KSM<sup>+</sup>13b]. Aus diesem Grund ist weitere Forschung notwendig, um Blendung aussagekräftiger und einheitlicher zu bewerten. Die Methoden zur Bewertung der physiologischen und psychologischen Blendung werden nachfolgend näher beschrieben.

### Physiologische Blendung

Neben der reinen Blendquelle verstärken Bestandteile des Auges den Effekt der Blendung. Dies wird durch die Alterung der Augenmedien gefördert. Wie in Abbildung 2.12 schematisch dargestellt, verursachen die Bestandteile zusätzliches Streulicht. Dieses überlagert sich wie eine Art Schleier über das Bild des eigentlichen Gegenstandes. Aus diesem Grund wird das Streulicht mit der äquivalenten Schleierleuchtdichte  $L_{v\_eq}(cd/m^2)$  beschrieben. Die Folge ist eine Reduzierung des Kontrastes  $C$  und eine damit verbundene Verschlechterung der Erkennbarkeit des Objekts.

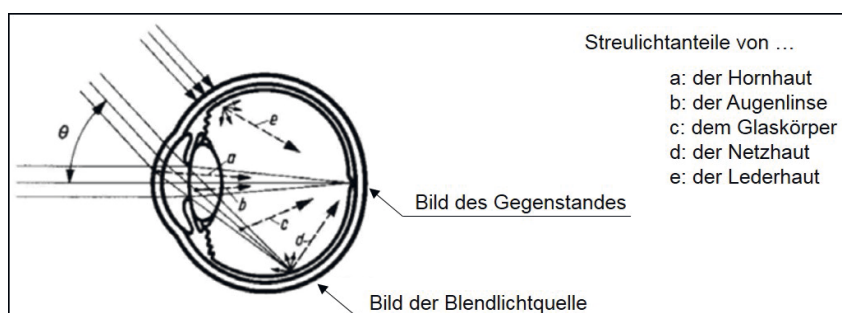


Abbildung 2.12: Schnittdarstellung des Auges inklusive der Bestandteile, die Streulicht verursachen (nach [Hen02])

Zur Ermittlung des vorhandenen Kontrastes sind aus der Literatur drei Definitionen bekannt [CIE92]. Je nach Anwendungsgebiet empfiehlt sich eine andere Definition [Goe96]. Im Bereich der automobilen Lichttechnik ist dies häufig der Weber-Kontrast  $C_W$  (siehe Formel 2.2).

$$C_W = \frac{|L_O - L_U|}{L_U} \quad (2.2)$$

Ab wann ein Objekt gerade erkannt oder gerade nicht mehr erkannt wird, beschreibt der sogenannte Schwellenkontrast  $C_{th}$ . Dieser berechnet sich nach Formel 2.2. Zudem ist der Schwellenkontrast von der vorhandenen Adaptationsleuchtdichte und der Objektgröße abhängig. Dies belegen Untersuchungsergebnisse von BERK [Ber43], BLACKWELL [Bla46] und ADRIAN [Adr69]. Eine Übersicht aller Kategorien inklusive der zugehörigen Einflussfaktoren und Methoden zur Bestimmung des Schwellenkontrasts liefert VÖLKER [Völ06]. Die Leuchtdichtedifferenz  $\Delta L = L_O - L_U$  des Zählers wird ebenfalls als Unterschiedsschwelle bezeichnet. Die Wahrscheinlichkeit einer Detektion des Sehobjekts liegt per Definition bei  $p = 50\%$ .

Sachverständige nutzen die Leuchtdichtedifferenz bei der Rekonstruktion von Dunkelheitsunfällen ([Hug07], [Schm92], [SSS94], [Hoff06]). Zur Rekonstruktion wird die tatsächliche Leuchtdichtedifferenz an der Unfallstelle gemessen und mit der erforderlichen verglichen. Zur Ermittlung der erforderlichen Leuchtdichtedifferenz dienen die Berek'schen Kurven. Da die Leuchtdichtedifferenzen aus Labormessungen resultieren, sind diese mit einem Praxisfaktor zu multiplizieren. Dieser wird mit 3 - 5 angegeben [Hoff06].

Anhand des in Abbildung 2.13 dargestellten SI-Diagramms (Soll-Ist) wird die Wahrnehmungsgrenze ermittelt. Da viele Parameter einen Einfluss auf die Erkennbarkeitsentfernung haben, ist das spezifische Modell nicht universell einsetzbar.

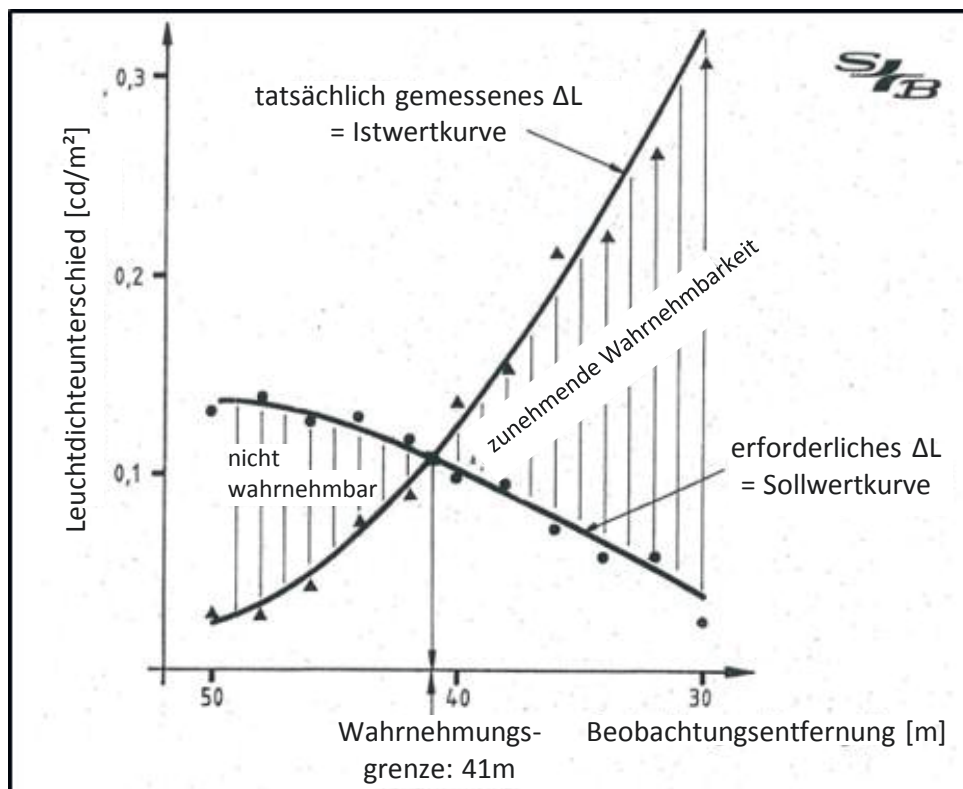


Abbildung 2.13: SI-Diagramm nach [Hoff06]

Was geschieht bei Vorhandensein einer Blendquelle im Gesichtsfeld? Wie zu Beginn erwähnt, verursacht eine Blendquelle eine äquivalente Schleierleuchtdichte  $L_{v\_eq}(\text{cd/m}^2)$  und reduziert dadurch den Objektkontrast (siehe Gleichung 2.3).

$$C_{W,Blendung} = \frac{L_O + L_V - (L_U + L_V)}{L_U + L_V} = \frac{L_O - L_U}{L_U + L_V} \quad (2.3)$$

Zur Berechnung der äquivalenten Schleierleuchtdichte sind zwei Größen erforderlich. Zum einen der Blendwinkel  $\Theta$ , unter dem die Blendquelle im Gesichtsfeld erscheint und zum anderen die messbare Blendbeleuchtungsstärke  $E_{Bl}(lx)$  am Auge des Beobachters. Basierend auf Untersuchungen von HOLLADAY lässt sich die äquivalente Schleierleuchtdichte  $L_{v\_eq}$  nach Gleichung 2.4 berechnen.

$$L_{v\_eq} = k * \frac{E_{Bl}}{\Theta^n} \quad \text{mit } n = 2 \quad (2.4)$$

Dabei stellt  $k$  einen Altersfaktor dar. Dieser steigt mit zunehmendem Alter und berücksichtigt somit die Alterung der Augenmedien. Aus der Literatur ist ein gängiger Wert für  $k \approx 10$ , der einem Alter von 30 Jahren entspricht. Neben der „klassischen“ STILES-HOLLADAY-Gleichung

(Gleichung 2.4), wie sie in der CIE 146:2002 [CIE02] bezeichnet wird, haben sich noch weitere, unter anderem eine von CARRARO publizierte Gleichung etabliert. Diese unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich des Faktors  $k$  und des Exponenten<sup>12</sup>  $n$ . Die Formel der CIE erweitert den Gültigkeitsbereich auch auf kleine Winkel  $\Theta$ . Zur Überprüfung, welche der Gleichungen die tatsächliche Blendung im Straßenverkehr am besten wiedergibt, werden diverse Untersuchungen durchgeführt ([TK12], [SSH<sup>+</sup>09]).

Die zuvor genannten Methoden geben einen groben Überblick, Situationen im Straßenverkehr hinsichtlich der physiologischen Blendung zu bewerten. Kapitel 3.5 befasst sich darüber hinaus speziell mit Methoden zur Blendungsbewertung von Kfz-Scheinwerfern, die bereits im Entwicklungsprozess eingesetzt werden.

### Psychologische Blendung

Die Bewertung der psychologischen Blendung hat zum Ziel, eine Aussage über die Störempfung aufgrund der vorhandenen Blendung zu generieren. Eine etablierte Methode zur Bewertung der psychologischen Blendung ist die in Abbildung 2.14 dargestellte de Boer-Skala [Deb67]. Teilweise missverständlich entspricht Ziffer 9 der Skala der geringsten und Ziffer 1 der maximalen Blendung. Ein Unterschreiten der Ziffer 5 impliziert eine psychologische Blendung.

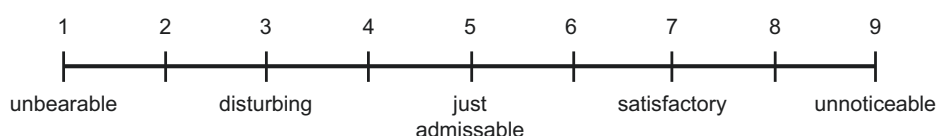


Abbildung 2.14: De Boer-Skala zur Bewertung der psychologischen Blendung [Deb67]

Trotz der häufigen Anwendung der de Boer-Skala ist ihr Einsatz umstritten. Amerikanische Studien belegen, dass die Skala aufgrund ihrer Beschriftung und Nummerierung verwirrend ist und zu einer nicht angemessenen Bewertung der Blendung führt [GW90]. Vergleichbare Erkenntnisse liefern Untersuchungen von SPRUTE ET AL. [SKH<sup>+</sup>08]. Daher wird bei Probandenstudien häufig eine invertierte de Boer-Skala eingesetzt.

Zur Optimierung der Skala schlagen SIVAK und OLSEN eine feinere Abstufung vor [SO84]. LOCHER und VÖLKER griffen diesen Vorschlag auf, in dem sie den Probanden eine stufenlose Skala geben, die lediglich die Bezeichnungen „keine Blendung“ und „Blendung“ an den Enden aufweist. Das Blendempfinden ist in Form eines Punktes entlang der Strecke zu markieren (vgl. [Ric12]). Die Probanden müssen somit das Blendempfinden nicht in eine Zahl umwandeln.

<sup>12</sup>Eine Übersicht der verschiedenen Exponenten ist dem Beitrag von RICHTER [Ric12] im *Handbuch für Beleuchtung* zu entnehmen.

Zudem kann die psychologische Blendung anhand der von SCHMIDT-CLAUSEN und BINDELS entwickelten Formel 2.5 ermittelt werden.

$$W = 5 - 2 \cdot \log \frac{E_{bl}}{0,003 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{L_{Ad}}{0,04}}\right) \cdot \Theta^{0,46}} \quad (2.5)$$

Mit Hilfe dieser Formel wurden die photometrischen Grenzwerte für heutige blendfreie Fernlicht-Systeme festgelegt (Tabelle 7 in [ECE112], aus [Zyd14]).

---



### 3 Bisherige Forschungsergebnisse

Ein Kfz-Scheinwerfer soll eine möglichst gute Ausleuchtung des Verkehrsraums bieten, ohne dabei andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Im Passiervorgang ist dies nicht immer sichergestellt. In einer Begegnungsentfernung von  $50\text{ m} < x < 70\text{ m}$  verursachen die Scheinwerfer eines entgegenkommenden Fahrzeuges eine Reduzierung der Sehleistung um bis zu 20% (siehe Abbildung 3.1). Ob gleichzeitig eine psychologische Blendung vorliegt, implizieren diese Ergebnisse nicht.

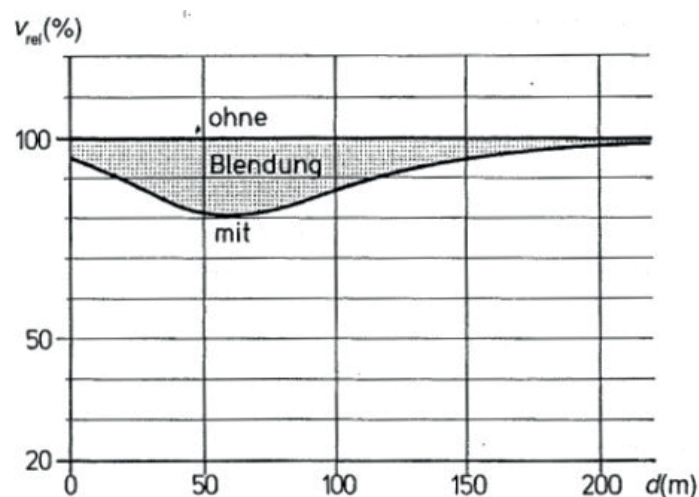


Abbildung 3.1: Relative Reduzierung der Erkennbarkeitsentfernung von Objekten  $v_{rel}$  aufgrund einer Blendung in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung  $d(m)$  [Lan92]

Zudem lässt Abbildung 3.1 weder eine Aussage über den Einfluss weiterer geometrischer Bedingungen, noch über den Einfluss adaptiver Lichtverteilungen und geänderter Reflexionseigenschaften der Fahrbahn zu. Die nachfolgenden Unterkapitel beschäftigen sich daher mit den bisherigen Forschungsergebnissen der zuvor genannten Aspekte. Zusätzlich enthält jedes Unterkapitel Forschungsfragen, die mit den Zielen der vorliegenden Arbeit in Verbindung stehen.

#### 3.1 Blendung durch Kraftfahrzeugscheinwerfer

Die im Straßenverkehr vorliegende Gesamt-Blendung setzt sich aus zwei Blendanteilen zusammen, dem direkten und dem indirekten Blendanteil (vgl. Abbildung 2.11). In Summe führen beide Blendanteile zu der in Abbildung 3.1 dargestellten Reduzierung der Sehleistung. Wissenschaftliche Untersuchungen betrachten grundlegend den Effekt der Gesamt-Blendung. In Abhängigkeit

unterschiedlicher Faktoren wird der Einfluss auf die physiologische oder psychologische Blendung untersucht. Aktuelle Forschungsergebnisse relevanter Faktoren sind nachfolgend separat aufgeführt.

### **Geometrische Aspekte im Straßenverkehr**

Dieser Faktor wird bei der Typprüfung eines Scheinwerfers nicht berücksichtigt. TRAGOSINSKI macht darauf aufmerksam, dass geometrische Aspekte die Verkehrssicherheit beeinflussen und daher zu berücksichtigen sind ([Tar01], [Tar11], [Tar12]).

Je nach Anbauhöhe und Neigung des Scheinwerfers trifft die HDG in einer anderen Entfernung auf die Straße, was zu unterschiedlichen Erkennbarkeitsentfernungen führt. TARGOSINSKI [Tar01] empfiehlt, beide Scheinwerfer unter Berücksichtigung der Anbauposition zu bewerten. Die Gesetzgebung schreibt lediglich die Referenzierung auf die optische Achse des Scheinwerfers vor. Des Weiteren sind bei der Bewertung Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen. Die Straße soll dabei als Koordinatensystem dienen. Speziell bezüglich der Blendung, fordert TARGOSINSKI den Abstand zwischen Blendquelle und Auge mit einzubeziehen und die Bewertung nicht auf den Punkt B50L und Zone III der ECE Regelungen zu beschränken (vgl. Abbildung 2.8).

Einen ersten Schritt, die geometrischen Aspekte im Straßenverkehr zu berücksichtigen, machte das TC4-45 mit der veröffentlichten Bewertungsmethode CIE 188:2010 [CIE10] (siehe hierzu Kapitel 3.5). Detaillierte Informationen zu den geometrischen Aspekten sind Kapitel 4 zu entnehmen. Dieses enthält eine Übersicht relevanter Faktoren (Kapitel 4.1) und ein Geometriemodell (Kapitel 4.2), das auf der CIE 188:2010 [CIE10] basiert.

### **Aspekte des Scheinwerfers**

Der Faktor Scheinwerfer untergliedert sich in weitere Teilfaktoren, die im Straßenverkehr zur Blendung beitragen. Dies sind die konstruktive Auslegung und das eingesetzte Leuchtmittel.

#### **Konstruktive Auslegung**

Häufig bestimmt das Design, wie ein Scheinwerfer auszusehen hat. Dies führt bei der Entwicklung heutiger Scheinwerfer oft zu kleinen Lichtaustrittsflächen. Zusätzlich führen neue Lichtquellen, insbesondere die LED, zu einem gesteigerten Lichtstrom [Kha12]. Das Ergebnis sind höhere Leuchtdichten, die sich negativ auf die psychologische Blendung auswirken [RSW<sup>+</sup>07]. Bei der gesetzmäßigen Abnahme der Scheinwerfer wird die Leuchtdichte allerdings nicht berücksichtigt. Dieser Aspekt ist daher bei der Auslegung künftiger Systeme zu berücksichtigen und die Leuchtdichte als objektives Bewertungskriterium in Erwägung zu ziehen ([Völ05], [RSW<sup>+</sup>07]).

#### **Eingesetztes Leuchtmittel**

Ein weiterer Aspekt bei der Blendungsbewertung von Scheinwerfern ist das Spektrum des eingesetzten Leuchtmittels. Aus diesem Grund kommt es seit Einführung von Scheinwerfern mit Gasentladungslampen, die zudem einen höheren Lichtstrom aufweisen, zu fortwährenden Diskussionen. Die Einführung von LED-Scheinwerfern hält diese Diskussion aufrecht.

FLANNAGAN ET AL. führten hierzu in den 90ern diverse Studien durch ([FSG<sup>+</sup>92], [FSB<sup>+</sup>93], [FSB<sup>+</sup>94], [Fla99]). Bei den Studien wurde ein Faktor von 1,46 ermittelt, um den die Blendbeleuchtungsstärke des Halogen-Scheinwerfers gegenüber dem Gasentladungs-Scheinwerfers im Falle gleicher psychologischer Blendung erhöht ist. Die psychologische Blendung ist dabei unabhängig von dem Leuchtmittel der eigenen Ausleuchtung. Das Alter der Probanden hat jedoch einen Einfluss auf die Unterschiede in der psychologischen Blendung durch Halogen- oder Xenon-Scheinwerfern. Ferner wurde der Effekt auf die physiologische Blendung untersucht. Es stellte sich heraus, dass trotz Vorliegen einer psychologischen Blendung keine physiologische Blendung mit einhergehen muss. FLANNAGAN ist der Ansicht, dass die physiologische Blendung insbesondere die Verkehrssicherheit und die psychologische Blendung insbesondere den Fahrkomfort beeinträchtigt. Dies müsste durch weitere Studien belegt werden.

Studien von BULLOUGH ET AL. [BJ03] und auch von SIVAK ET AL. ([SSF03], [SSF04a], [SSF04b], [SSM<sup>+</sup>05]) verdeutlichen, dass die LED und deren Effekt auf die Blendung in den Fokus der Automobilindustrie rücken. SIVAK ET AL. starteten einen Versuch mit drei LED-Scheinwerfern und jeweils einem Halogen- und Xenon-Scheinwerfer. Der spektrale Blauanteil und die Bewertung der psychologischen Blendung weisen hierbei einen linearen Zusammenhang auf [SSM<sup>+</sup>05].

LOCHER ET AL. führten ähnliche Studien durch ([LIS<sup>+</sup>07], [LK09]). Sofern die gesetzmäßigen Anforderungen eingehalten werden, sind die Unterschiede hinsichtlich der physiologischen Blendung marginal. Ebenso variiert die Bewertung der psychologischen Blendung in Abhängigkeit des Leuchtmittels nur geringfügig. Erst eine falsche Ausrichtung der Scheinwerfer führt zu einer drastischen Reduzierung der Sehleistung und zu schlechteren Bewertungen der psychologischen Blendung.

SCHILLER ET AL. untersuchten zeitgleich zu den Studien von LOCHER ET AL. ebenfalls den Effekt des Leuchtmittels auf die psychologische Blendung in verschiedenen Studien ([SK07], [SKS<sup>+</sup>08], [SK08a], [SK08b], [SSHK09]). Die Autoren betonen die Relevanz, Untersuchungen unter möglichst realitätsnahen Bedingungen durchzuführen, da im Straßenverkehr mehrere Faktoren gleichzeitig die Blendung beeinflussen. Ebenso weisen sie darauf hin, dass der Vergleich verschiedener Scheinwerfer und deren Leuchtmittel aufgrund unterschiedlicher optischer Konzepte und Technologien nur schwer möglich ist. Das Leuchtmittel alleine ist nicht ausreichend, um einen Rückschluss auf die Blendwirkung ziehen zu können. Das Leuchtmittel der eigenen Ausleuchtung führt dabei zu keinen signifikanten Unterschieden in der Bewertung der psychologischen Blendung.

VÖLKER [Völ07a] und weitere Autoren untersuchten, welchen Effekt das Spektrum des Leuchtmittels aus Sicht des Fahrers und nicht des Geblendeten hat. Auf diese Ergebnisse wird näher in Kapitel 3.2 eingegangen.

## Dynamische Untersuchungen im Passiervorgang

Die Gründe für dynamische Untersuchungen im Passiervorgang zur Blendungsbewertung sind vielfältig. ROSENHAHN [Ros00] erzielte beispielsweise bei einer statischen Bewertung abweichende Ergebnisse. Daher führte er die Folgeuntersuchungen dynamisch durch, was dem Anwendungsfall im Straßenverkehr entspricht.

Zudem werden immer mehr Studien unter möglichst realen Bedingungen durchgeführt, um das Blendverhalten unter dynamischen Bedingungen zu analysieren (siehe [SSH<sup>+</sup>11], [Spr12], [ZHK13], [Zyd14]). Hinzu kommt, dass die gesetzmäßige Bewertung der Blendung an einem einzigen Punkt in Anbetracht dynamischer Scheinwerfersysteme nicht zielführend ist. Heute verfügbare Simulations- und Messtechnologien bieten Potential für aussagekräftigere Bewertungsmethoden (vgl. [Bul14]). Des Weiteren hat außer der Blendbeleuchtungsstärke auch die Expositionsdauer einen Einfluss auf die physiologische Blendung und die benötigte Readaptationszeit ([SF97], [Ros00], [Leh01b], [MTG<sup>+</sup>12], [MGV<sup>+</sup>13]).

Abgesehen von der Dynamik wirken sich auch Umgebungsbedingungen auf die Blendung im Passiervorgang aus. Primär sind damit geänderte Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche gemeint. Diese stellen einen wesentlichen Bestandteil der vorliegenden Arbeit dar. Detailliert wird auf diesen Faktor in Kapitel 3.3 eingegangen.

## Offene Fragen

Bei den zuvor angeführten Untersuchungen wurde die gesamte Blendung ( $= E_{\text{direkt}} + E_{\text{indirekt}}$ ) bewertet (vgl. Abbildung 2.11, S. 16). Im Entwicklungsprozess von Kfz-Scheinwerfern wird hingegen nur die direkte Blendung analysiert. Untersuchungen, bei denen nur der Effekt der indirekten Blendung betrachtet wird, sind dem Wissensstand des Autors zu Folge zum Zeitpunkt der vorliegenden Arbeit kaum vorhanden (siehe Kapitel 3.4). Daher sind die folgenden Fragen zu klären:

- *Welchen Effekt haben unterschiedliche Abblendlichtverteilungen auf die indirekte Blendung im Passiervorgang?* → Kapitel 6.1
- *Welchen Effekt hat die jeweilige Blendung (direkt, indirekt) im Passiervorgang?* → Kapitel 6.1 bis 6.3
- *Wie lässt sich der Effekt der indirekten Blendung in einer Probandenstudie bewerten?* → Kapitel 6.2 und 6.3
- *Wie lässt sich der Effekt der indirekten Blendung bereits im Entwicklungsprozess eines Scheinwerfers bewerten?* → Kapitel 7.4

Das Thema Blendung berücksichtigt im Straßenverkehr vorrangig andere Verkehrsteilnehmer. Ein Scheinwerfer soll jedoch dem Fahrer dienen und dazu beitragen, Hindernisse frühzeitig zu erkennen. Aus diesem Grund befasst sich das nachfolgende Kapitel mit Untersuchungen zur Erkennbarkeitsentfernung im nächtlichen Straßenverkehr.

---

## 3.2 Erkennbarkeitsentfernung im Straßenverkehr

Die Erkennbarkeitsentfernung ist ein Maß zur Bewertung von Kfz-Scheinwerfern. Sie entspricht der Entfernung, bei der ein Objekt von 50 % der Versuchspersonen erkannt wird. Darüber hinaus stellt sie ein wesentliches Gütemerkmal eines Scheinwerfers dar. Ein Scheinwerfer, dessen Lichtverteilung zu einer hohen Erkennbarkeitsentfernung beiträgt, erhöht die Verkehrssicherheit und ist zu präferieren. Auch VÖLKER [Völ06] macht darauf aufmerksam, wie wichtig eine hohe Erkennbarkeitsentfernung ist, um trotz Reaktionszeit frühzeitig vor einem Hindernis zum Stehen zu kommen. Er verweist auf vier Lösungsansätze, von denen eine die Optimierung der Scheinwerferlichtverteilung ist. Das Maß ist allerdings als kritisch zu betrachten. Ergebnisse von Völker [Völ06] belegen, dass berechnete Erkennbarkeitsentfernungen nicht mit gemessenen korrelieren.

### Verfahren zur Vorhersage

Zur Ermittlung der Erkennbarkeitsentfernung gibt es verschiedene Verfahren. Nachfolgend werden die beiden Maßzahlen angeführt, die auch im Rahmen dieser Arbeit genutzt werden. Eine ausführliche Beschreibung aller Verfahren liefert VÖLKER [Völ06].

### Beleuchtungsstärke

Eine häufig genutzte Maßzahl zur Abschätzung der Erkennbarkeitsentfernung ist die Beleuchtungsstärke  $E(lx)$ . Diese wird auch im Entwicklungsprozess von Kfz-Scheinwerfern oder zum Vergleich der Effektivität neuer Leuchtmittel und/oder Lichtfunktionen eingesetzt [WGS13]. Basierend auf Goniophotometer-Messungen wird eine bestimmte Isolux-Linie (z.B. 2 lx) gewählt und deren Schnittpunkt mit dem rechten Fahrbahnrand ermittelt (siehe Abbildung 2.3, S. 7). Die gewählte Beleuchtungsstärke wird als Mindestbeleuchtungsstärke zum Wahrnehmen von Objekten angesehen. Oft wird die 2 lux-Linie gewählt.

Anhand dieser Maßzahl eine Aussage über die tatsächliche Erkennbarkeitsentfernung zu treffen, ist allerdings unzulässig [Völ06]. Unabhängig von der gewählten Isolux-Linie trägt diese Beleuchtungsstärke zur wahrgenommenen Leuchtdichte der Fahrbahn bei, aber nicht zwangsläufig zur Erhöhung des Objektkontrastes. Letzterer ist für die Erkennbarkeit maßgeblich. VÖLKER empfiehlt daher zur Bestimmung der Erkennbarkeitsentfernung den Objektkontrast.

### Leuchtdichteunterschied

Der Leuchtdichteunterschied bzw. Objektkontrast ist eine häufig eingesetzte Maßzahl zur Bestimmung der Erkennbarkeitsentfernung. Dieses Verfahren wird auch bei der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen eingesetzt. Der vorhandene Leuchtdichteunterschied  $\Delta L_{vorh}$  eines Objektes zu seinem Umfeld sollte dabei größer als die Leuchtdichteunterschiedsschwelle  $\Delta L_{th}$  sein, die erforderlich ist, um das Objekt zu erkennen (siehe Formel 3.1)

$$\Delta L_{vorh} > \Delta L_{th} \quad (3.1)$$

Die Leuchtdichteunterschiedsschwelle  $\Delta L_{th}$  berechnet sich nach der von ADRIAN [Adr89] ermittelten Gleichung (siehe Formel 3.2).

$$\Delta L_{th} = p * F * \left( \frac{k_L}{\alpha} + l_L \right)^2 \quad (3.2)$$

- mit p : Wahrnehmungswahrscheinlichkeit (p = 1 entspricht 50%; p = 3,1 entspricht nahezu 100% und ist für den Straßenverkehr empfohlen)  
 F : Praxisfaktor zur Berücksichtigung der Unterschiede zwischen Labor- und Feldversuch (F = 10)  
 α : Schwinkel in Winkelminuten (′) des wahrzunehmenden Objekts

Bei  $k_L$  und  $l_L$  handelt es sich um Konstanten, welche die Abhängigkeit der Leuchtdichteunterschiedsschwelle  $\Delta L_{th}$  von der Umfeldhelligkeit wiedergeben. Sie gehen zurück auf Daten von Blackwell [Bla46]. Wird  $\Delta L_{vorh}$  mit  $\Delta L_{th}$  gleichgesetzt und Gleichung (3.2) nach  $\alpha$  aufgelöst, lässt sich die Erkennbarkeitsentfernung  $e$  nach Gleichung 3.3 und 3.4 ermitteln.

$$\alpha = \frac{k_L}{\sqrt{\frac{\Delta L_{vorh}}{p * F} - 1}} \quad (3.3)$$

$$e(w) = \frac{b}{\tan(\alpha)} \quad (3.4)$$

- mit w : Wahrnehmungskriterium ( $w = s$ : sicher gesehen;  $w = g$ : gerade gesehen)  
 b : Größe des kritischen Sehdetails

Häufig werden zur Ermittlung der Erkennbarkeitsentfernung von Kfz-Scheinwerfern graue Tafeln eingesetzt, die senkrecht auf der Fahrbahn aufgestellt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, an welcher Kante der Objektkontrast bewertet wird. Die Anwendung eines mittleren Randkontrastes nach KOKOSCHKA [KG00] ist nicht empfehlenswert. Am geeignetsten sind die Kante mit dem höchsten Kontrast oder die Kante, hinter der sich ein Schatten bildet. Beide weisen zwischen dem Schwellenkontrast und der Erkennbarkeitsentfernung eine gleich hohe Korrelation auf, sofern die Umfeldhelligkeit vergleichbar ist [Völ06]. Dem menschlichen Sehen entsprechend eignet sich zur messtechnischen Erfassung des Objektkontrastes speziell die Leuchtdichtemesstechnik [Fib99]. Die zuvor beschriebenen Erkenntnisse werden bei der Untersuchung in Kapitel 6.2 berücksichtigt.

## **Einflussfaktoren**

Unabhängig davon, ob die Ermittlung der Erkennbarkeitsentfernung anhand der Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichte erfolgt, ist diese von weiteren Einflussfaktoren abhängig. Diese lassen sich grob in drei Bereiche untergliedern.

### Umgebung

Eine nur die Lichtverteilung betrachtende Ermittlung der Erkennbarkeitsentfernung hat wenig Aussagekraft. Erst eine Berücksichtigung der vorliegenden Umgebungsbedingungen ermöglicht, die tatsächliche Erkennbarkeitsentfernung zu ermitteln.

Insbesondere sind die Reflexionseigenschaften der Fahrbahndeckschicht mit einzubeziehen. Mit dieser Fragestellung beschäftigen sich viele Autoren, um eine geeignete Bewertungsmethode zu finden [MKS<sup>+</sup>13]. Im Detail wird dies in Kapitel 3.3 aufgegriffen und zusammen mit dem Effekt geänderter Umgebungsbedingungen betrachtet. Ferner sollen unter dem Faktor Umgebung geometrische Bedingungen berücksichtigt werden, wie beispielsweise die Scheinwerferanbauhöhe und deren Effekt auf die Erkennbarkeitsentfernung.

HILLER [Hil08] analysierte den Effekt der Scheinwerferanbauhöhe auf die Wahrnehmung kontrastarmer Hindernisse. Hierzu führte sie eine Probandenstudie durch, bei der sie 15 Probanden die Erkennbarkeitsentfernung am rechten und linken Fahrbahnrand bei 6 verschiedenen Anbauhöhen bewerten ließ. Zwischen der Anbauhöhe und der Erkennbarkeitsentfernung wurde eine Korrelation nachgewiesen. In Abhängigkeit des Abstands zum Fahrbahnrand sind unterschiedliche Anbauhöhen zu präferieren. Objekte am rechten Fahrbahnrand werden bei einer niedrigeren und Objekte am linken Fahrbahnrand bei einer höheren Anbauhöhe früher detektiert. Der Effekt auf die Blendung ist noch zu analysieren (siehe Kapitel 5.3).

### Scheinwerfer

Unabhängig von dem zuvor beschriebenen Effekt einer Veränderung der Scheinwerferanbauhöhe wirken sich spezifische Merkmale des Scheinwerfers besonders auf die Erkennbarkeitsentfernung aus.

SIGL [Sig07] untersuchte das Abblendlicht von 13 Fahrzeugen mit unterschiedlichen Scheinwerfersystemen hinsichtlich deren Erkennbarkeitsentfernung. Er zeigte, dass eine pauschale Aussage der Erkennbarkeitsentfernung zur Rekonstruktion von Verkehrsunfällen nicht möglich ist. Zudem weist er darauf hin, dass weitere Faktoren wie der Beladungszustand, die Scheinwerfereinstellung, aber auch das Alter und eine eventuelle Verschmutzung des Scheinwerfers, sowie die Witterungsbedingungen zum Unfallzeitpunkt zu berücksichtigen sind. Das jeweilige Leuchtmittel spielt ebenfalls eine Rolle. Unter günstigen Bedingungen ist mit Gasentladungslampen eine Verdopplung der Erkennbarkeitsentfernung gegenüber Halogen-Systemen möglich.

Laut VÖLKER [Völ07b] sind Leuchtmittel mit höherem Spektralanteil kurzer Wellenlängen sowohl aus physiologischer als auch psychologischer Sicht vorteilhaft und dementsprechend zu empfehlen. Der Effekt ist auf die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges zurückzuführen. In Abhängigkeit der Umgebungshelligkeit verschiebt sich das Maximum der Empfindlichkeitskurve [Kok97]. VÖLKER [Völ08] fordert dennoch den Nachweis, ob die Verkehrssicherheit bei einer Reduktion der photometrischen Leistung gewährleistet bleiben würde.

Weitere Autoren bestätigen, dass der Straßenraum in Abhängigkeit des Spektrums des eingesetzten Leuchtmittels heller wahrgenommen wird ([CLC07], [KKP09], [OKO09]). Konsistenter



Weise wird ein LED-Scheinwerfer um 20 % heller wahrgenommen als ein baugleicher Halogen-Scheinwerfer ([Ham11], [RL13]). Auch hier wird eine Beibehaltung der photometrischen Performance des Systems gefordert. Eine Reduzierung der Vorfeldausleuchtung und Beibehaltung der Performance im Fernbereich ist dabei in Erwägung zu ziehen [RL13]. Eine derartige Anpassung der Lichtverteilung würde einer Schlechtwetterlichtverteilung zugute kommen.

Dem entgegen stehen Ergebnisse von JEBAS ET AL. [JKL09]. Eine erhöhte Vorfeldausleuchtung und der damit erhöhte Anteil an vorwärts reflektiertem Licht erhöht die Beleuchtungsstärke und führt zu einem höheren Objektkontrast von Sehzeichen im Fernfeld. Dies hat einen positiven Effekt auf die Erkennbarkeitsentfernung, die von 60 m auf 67 m ansteigt [Klein08]. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Untersuchungen von JEBAS bei trockener Fahrbahn durchgeführt wurden. Trotzdem ist die vorgeschlagene Reduzierung der Vorfeldausleuchtung aus beiden Perspektiven - der Blendung und der Erkennbarkeit - zu betrachten. Unabhängig davon sind die zu erkennenden Objekte und deren Eigenschaften zu berücksichtigen.

### **Objekt**

Die Voraussetzung, ein Objekt zu erkennen, ist eine gute Ausleuchtung der Fahrbahn durch die Scheinwerfer. Die Eigenschaften eines Objektes tragen allerdings dazu bei, ob dieses tatsächlich erkannt und auch wahrgenommen wird.

Zunächst ist die Art des Objektes zu berücksichtigen (z.B. Sehzeichen, Reh, Mensch). Mit der Art des Objektes gehen unterschiedliche Größen einher. Des Weiteren sind mit der Art des Objektes unterschiedliche Reflexionseigenschaften verbunden. Zuletzt ist die Position des Objektes im Verkehrsraum zu berücksichtigen. Dies ist jedoch nicht nur auf die Position, sondern auch auf die asymmetrische Lichtverteilung zurück zu führen, die den rechten Fahrbahnrand besser ausleuchtet als den linken (siehe auch [ADC<sup>+</sup>03]). Daher werden Objekte am rechten Fahrbahnrand grundsätzlich früher erkannt als Objekte am linken Fahrbahnrand [Hil08].

KLIEBISCH [KV05] sensibilisiert, den Unterschied zwischen "erkennen" und "wahrnehmen" zu beachten. In Abhängigkeit des gewählten Kriteriums differieren die Ergebnisse der Erkennbarkeitsentfernung.

### **Offene Frage**

In Anbetracht aller zuvor beschriebenen Inhalte, insbesondere der Publikation von JEBAS ET AL. [JKL09], ist folgende Frage zu klären:

- *Wie wirken sich geänderte Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn in Wechselwirkung mit der Abblendlichtverteilung auf die Erkennbarkeitsentfernung bei Nacht aus? → Kapitel 6.2*
-



### 3.3 Einfluss geänderter Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen

Geänderte Reflexionseigenschaften beeinflussen den Sekundärstrahler - die Fahrbahnoberfläche - und verursachen dadurch ein geändertes Erscheinungsbild entgegenkommender Fahrzeuge. Da die vorliegende Arbeit primär den Einfluss einer nassen Fahrbahn untersucht, wird diese nachfolgend näher betrachtet. Eine nasse Fahrbahnoberfläche führt zu einem Anstieg der gerichteten Reflexion. Die Folgen sind eine erhöhte Vorwärts- und eine reduzierte Rückwärtsreflexion.

KREBS und BÖLLINGER untersuchten bereits in den 80er Jahren, wie sich dadurch das Erscheinungsbild entgegenkommender Fahrzeuge in Abhängigkeit des Nässegrades verändert [KB81]. Abbildung 3.2 veranschaulicht die unterschiedlichen Ausprägungen der sogenannten „Blendkeulen“.

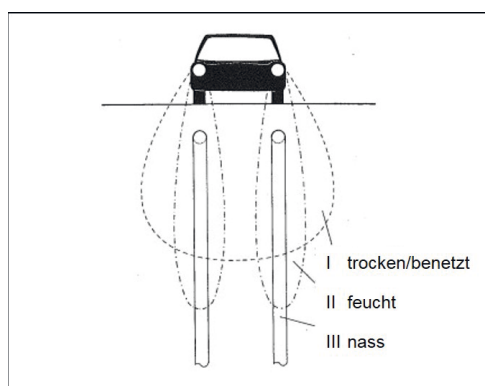


Abbildung 3.2: Erscheinungsbild der „Blendkeulen“, die sich in Abhängigkeit des Nässegrades auf der Fahrbahn ausbilden [KB81]

ROSENHAHN [Ros00] liefert eine Definition der verschiedenen Status des Nässegrades. Geänderte Reflexionseigenschaften implizieren einen geänderten Leuchtdichtkoeffizienten  $q$ , der die Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche beschreibt.

DAMASKY [Dam95] befasste sich im Rahmen der lichttechnischen Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer mit dem Einfluss geänderter Reflexionseigenschaften von Fahrbahnen. Einen wenig berücksichtigten Aspekt stellt die Jahreszeit dar. In der warmen Jahreszeit wird der Binder weich und zäh und erleichtert das Eindringen der Gesteine durch den Druck der Fahrzeuge. Dies führt zu einer glatteren Oberfläche, wodurch der Anteil der Vorwärtsreflexion steigt. Dieser Effekt wird durch eine nasse Fahrbahn nochmals verstärkt.

Den Effekt einer nassen Fahrbahn analysierte DAMASKY [Dam95] unter Laborbedingungen. Es zeigt sich, dass das Maximum des Leuchtdichtkoeffizienten nicht am Ort der Reflexionsbedingungen Einfallswinkel = Ausfallswinkel sondern näher zur Blendquelle verschoben ist. Diese Erkenntnisse berücksichtigt DAMASKY bei den Anforderungen für eine Schlechtwetterlichtverteilung.

HUHN [Huh99] führte Experimente mit unterschiedlichen Vorfeldleuchtdichteverteilungen durch und bewertete dabei die verursachte Blendbeleuchtungsstärke am Auge eines entgegenkommenden Verkehrsteilnehmers. Die aus Fahrerperspektive präferierte Verteilung verursacht aufgrund der erhöhten Vorwärtsreflexion einer nassen Fahrbahn die höchste Blendbeleuchtungsstärke<sup>1</sup>.

ROSENHAHN [Ros00] widmete sich dem Einfluss des Nässegrads und dem damit verbundenen Effekt auf die Leuchtdichte der Fahrbahnoberfläche. Mit Zunahme des Nässegrads wandert die maximale Blendleuchtdichte in Richtung des mathematischen Reflexpunktes. Der maximale Nässegrad erzeugt die maximale Blendleuchtdichte von  $L = 2,1 \cdot 10^5 \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ , die mit einer Entfernung von 20 m zur Blendquelle unter Berücksichtigung der geometrischen Bedingungen ( $h_A = 1,13 \text{ m}$ ;  $h_S = 0,63 \text{ m}$ ;  $d = 50 \text{ m}$ ) nahezu am Ort des mathematischen Reflexpunktes  $\epsilon_i = \epsilon_o$  ( $d = 17,9 \text{ m}$ ) auftritt (siehe Abbildung 3.3).

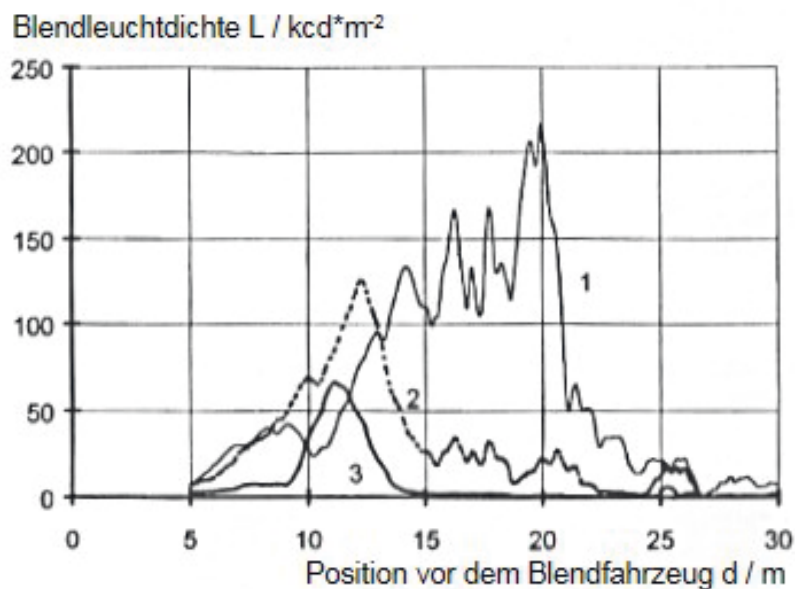
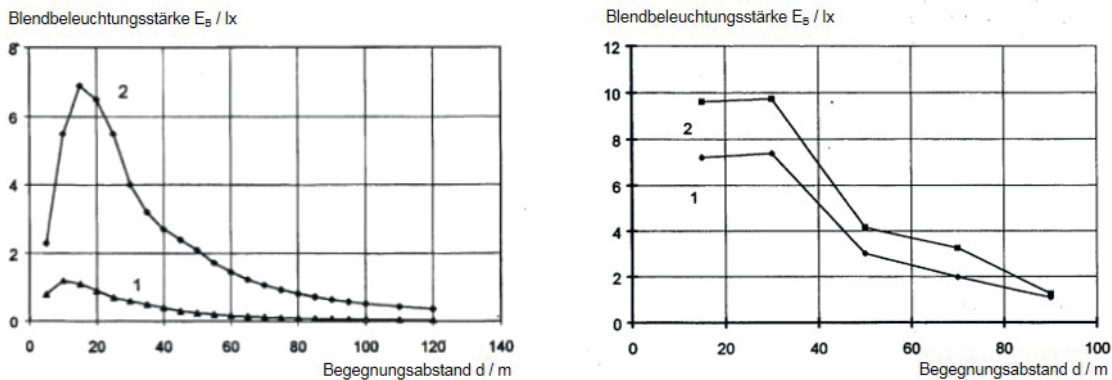


Abbildung 3.3: Leuchtdichteschnitte durch die „Blendkeule“ zu unterschiedlichen Zeiten nach Bereinigung der Fahrbahn (1 = 40s, 2 = 5min und 3 = 10min) [Ros00]

Zusätzlich ermittelte ROSENHAHN [Ros00] die Blendbeleuchtungsstärke am Fahrerauge in Abhängigkeit des Straßenzustandes im Passiervorgang. Geänderte Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche haben einen deutlichen Effekt (siehe Abbildung 3.4a). Ebenso ist die Lichtverteilung der Scheinwerfer zu berücksichtigen. Unabhängig von der Begegnungsentfernung verursachen Gasentladungsscheinwerfer im Passiervorgang höhere Blendbeleuchtungsstärken (siehe Abbildung 3.4b). Dies ist wiederum auf die Lichtverteilung der Scheinwerfer zurückzuführen [Ros00].

<sup>1</sup>Referenz: Punkt B50L; Gemessene Beleuchtungsstärken bei trockener Fahrbahn: 0,19 lx-0,26 lx; bei nasser Fahrbahn: 0,69 lx-1,42 lx [Huh99].



(a) Effekt der Reflexionseigenschaft der Fahrbahn(1:trocken; 2:nass)

(b) Effekt des Scheinwerfersystems (1:Halogen; 2:Xenon)

Abbildung 3.4: Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung [Ros00]

SCHMIDT-CLAUSEN und SCHWENKSCHUSTER [SCS01] liefern darüber hinaus eine Zusammenfassung, die sich mit den resultierenden Seh- und Wahrnehmungsbedingungen von Kraftfahrern bei nasser Fahrbahn beschäftigt. Zur Nachbildung einer nassen Fahrbahn unter Laborbedingungen brachten sie eine Kunststoffolie auf die Straßenproben auf (vgl. ROSENHAHN [Ros00]). Bei weiteren Feldmessungen wählten sie verschiedene Messstellen in Deutschland, um repräsentative Werte zu ermitteln. In Abhängigkeit des Nässegrads weist die Fahrbahn unterschiedliche Leuchtdichtekoeffizienten für Vorwärts- und Rückwärtsreflexion auf (letzteres siehe Abbildung 5.5, S. 62). Zudem beobachteten SCHMIDT-CLAUSEN und SCHWENKSCHUSTER, dass sich die Leuchtdichtekoeffizienten der Straßen von Bundesland zu Bundesland unterscheiden [SCS01]. Die Annahme eines allgemeingültigen Leuchtdichtekoeffizienten ist somit nicht möglich und Feldmessungen als Grundlage kritisch zu betrachten. Daher ist eine Referenzumgebung mit gleichbleibenden Bedingungen in Betracht zu ziehen [Muz12].

KÖHLER [Köh11] beschäftigte sich intensiv mit der Ermittlung des Leuchtdichtekoeffizienten für Vorwärts- und Rückwärtsreflexion bei trockener und nasser Fahrbahn. Die Besonderheit bei ihren Untersuchungen sind sowohl die flachen Anstrahl-, als auch Beobachtungswinkel, in Anlehnung an die geometrischen Bedingungen im Straßenverkehr. Bei trockener Fahrbahn ist das Maximum des Leuchtdichtekoeffizienten nicht exakt am Reflexpunkt  $\epsilon_i = \epsilon_o$  (vgl. [Dam95]). In Abhängigkeit der Begegnungsentfernung liegt es entweder vor oder hinter dem mathematisch ermittelten Reflexpunkt. Bei nasser Fahrbahn und der analysierten Begegnungsentfernung von 50 m befindet sich das Maximum allerdings nahe dem mathematisch ermittelten Reflexpunkt.

Alle zuvor genannten Quellen verdeutlichen den Einfluss geänderter Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche auf die Seh- und Wahrnehmungsbedingungen. Die erhöhte Vorwärts- und die reduzierte Rückwärtsreflexion bei nasser Fahrbahn bewirken zum einen ein niedrigeres Adaptationsniveau und zum anderen eine erhöhte Blendung. Ungünstigerweise verstärken sich beide Effekte aufgrund einer höheren Blendempfindlichkeit bei geringerem Adaptationsniveau. Wie

sich geänderte Reflexionseigenschaften auf die Wahrnehmung einer solchen Szene bei sonst konstanten Bedingungen auswirken, veranschaulicht Abbildung 3.5.



Abbildung 3.5: Einfluss geänderter Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche auf die Reflexblendung und die Wahrnehmung der Fahrbahnausleuchtung

## Offene Fragen

Welchen Effekt unterschiedliche Scheinwerferlichtverteilungen auf die Blendung bei regennassen Fahrbahn im Passiervorgang haben, ist zum Zeitpunkt der Arbeit noch nicht näher erforscht. Daher sind folgende Fragen zu klären:

- *Wie groß ist der indirekte Blendanteil in Abhängigkeit der Abblendlichtverteilung und der Reflexionseigenschaft der Fahrbahn?* → Kapitel 6.1
- *Wie verändert sich der Objektkontrast in Abhängigkeit der Abblendlichtverteilung und der Reflexionseigenschaft der Fahrbahn?* → Kapitel 6.2

Darüber hinaus ist zu hinterfragen, welche Akzeptanz heutige adaptive Scheinwerferlichtverteilungen erhalten. Darauf basierend sind Rückschlüsse zu ziehen, inwieweit die im Rahmen der Arbeit entwickelten Anforderungen einer adaptiven blendfreien Abblendlichtverteilung auf Zustimmung treffen. Mit dieser Thematik befasst sich das folgende Kapitel.

### 3.4 Adaptive Abblendlichtverteilungen und deren Akzeptanz

Erste Ansätze adaptiver Scheinwerfer zur Reduzierung der Blendung gehen zurück bis 1923. BOSSU unterbreitete den Vorschlag eines linear polarisierten Scheinwerferlichts. Dieser fand aus diversen Gründen keine Akzeptanz ([Bos23] aus [Hof03]). Anders ist es bei den ersten adaptiven Abblendlichtverteilungen des 21sten Jahrhunderts.

Wie es sich hinsichtlich der Akzeptanz und der Effektivität von Lichtverteilungen verhält, die eine Entblendung anderer Verkehrsteilnehmer bei spiegelnden Fahrbahnoberflächen begünstigen, zeigen die nachfolgenden Forschungsergebnisse.

DAMASKY [Dam95] schlägt eine Schlechtwetterlichtverteilung vor, welche Nebel und den Effekt einer nassen Fahrbahn berücksichtigt. Aus seinen Untersuchungen geht hervor, dass insbesondere der Bereich direkt vor dem Fahrzeug zur Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer beiträgt und die Streuleuchtdichte erhöht. Daher empfiehlt er eine Reduzierung der Beleuchtungsstärke im direkten Vorfeld des Fahrzeugs. Dies entspricht Zone 4 der in Abbildung 3.6 dargestellten Lichtverteilung.

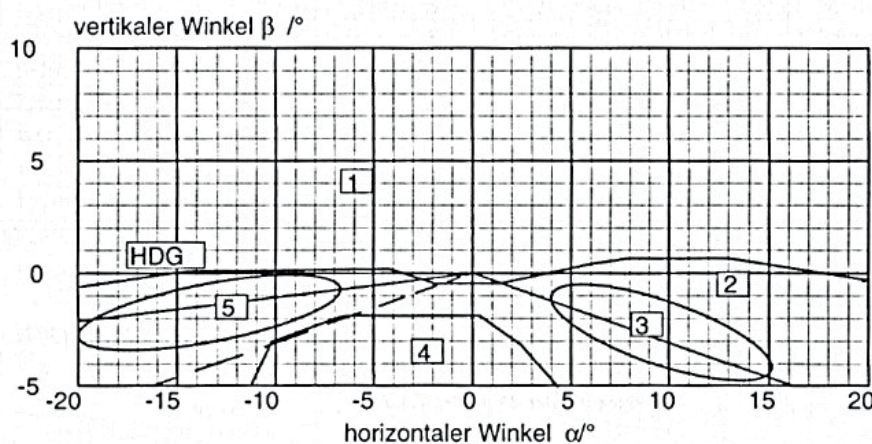


Abbildung 3.6: Vorschlag einer Schlechtwetterlichtverteilung nach DAMASKY [Dam95] (1 = Blend-/Eigenblendbereich, 2 = Vorfeld, 3 = Führung rechts, 4 = Reflexbereich, 5 = Führung links)

ROSENHAHN [Ros00] untersuchte die von DAMASKY vorgeschlagene Schlechtwetterlichtverteilung hinsichtlich der Akzeptanz aus Fahrerperspektive. Das Ziel war, Anforderungen an einen Kfz-Scheinwerfer für Schlechtwetterbedingungen abzuleiten. Eine Reduzierung des Lichtstroms im direkten Vorfeld um bis zu 50% wird als noch akzeptabel bewertet (vgl. Abbildung 3.6, Zone 4). Bei zusätzlicher Seitenausleuchtung (vgl. Abbildung 3.6, Zonen 3 und 5) wird eine noch bessere Bewertung erzielt. Am Fahrkomfort werden keine Einbußen festgestellt. Zudem ergaben physiologische Tests, dass eine Reduzierung des Lichtstroms im direkten Vorfeld keinen negativen Effekt auf die Sehleistung im Bereich der HDG hat ([SCD<sup>+</sup>92], aus [Ros00]).



VON HOFFMANN [Hof03] analysierte die von ROSENHAHN spezifizierte Schlechtwetterlichtverteilung bei regennasser Fahrbahn auf die Reduzierung der Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang. Daneben testete er die Strategie von KALZE ([Kal01], aus [Hof03]). Diese realisiert die Reduzierung des Lichtstroms im direkten Vorfeld durch Schwenken der AFS-Scheinwerfermodule zum Fahrbahnrand. Keine der beiden Strategien ermöglicht eine kontinuierliche Reduzierung der Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang. Die Strategie nach ROSENHAHN ermöglicht insbesondere eine Reduzierung der Blendbeleuchtungsstärke in Begegnungsentfernungen von  $15\text{ m} < x < 40\text{ m}$  (vgl. Abbildung 3.7, Kurve a) und b)). Mit der Strategie nach KALZE wird die Blendbeleuchtungsstärke speziell in Begegnungsentfernungen  $> 60\text{ m}$  reduziert (vgl. Abbildung 3.7, Kurve c) und d)).

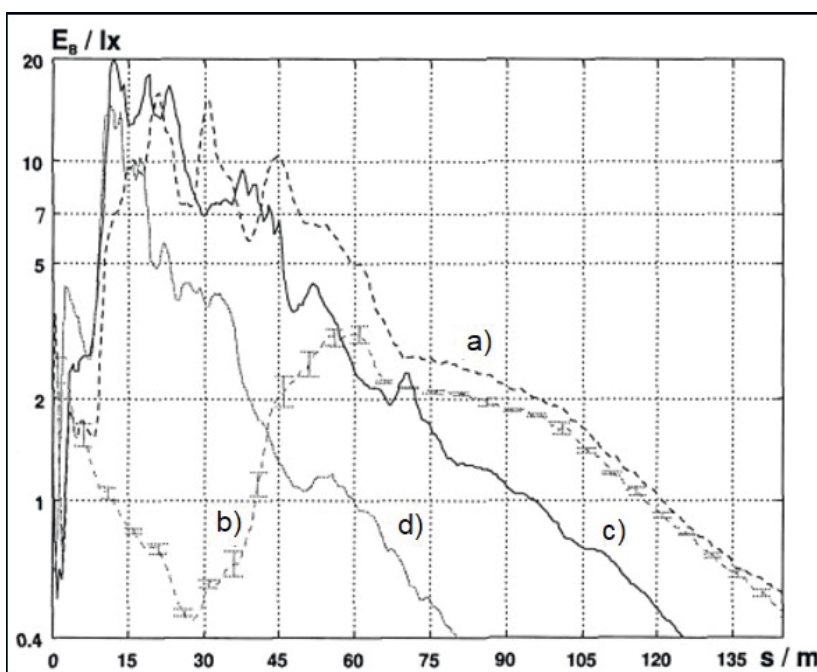


Abbildung 3.7: Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang bei regennasser Fahrbahn mit und ohne Schlechtwetterlichtverteilung nach KALZE (c = ohne, d = mit) und ROSENHAHN (a = ohne, b = mit) (aus [Hof03])

Sofern die Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang kontinuierlich auf das Niveau einer trockenen Fahrbahn gebracht werden soll, ist eine dynamische Optimierung erforderlich [Ros00]. Eine Möglichkeit ist die Variation der Größe des ausgeblendeten Bereichs des Vorfelds in x- und y-Richtung (siehe [Hof03]). Beide ermöglichen eine deutliche Reduzierung der Blendbeleuchtungsstärke in Begegnungsentfernungen  $< 60\text{ m}$  (vgl. Abbildung 3.8).

BULLOUGH ET AL [BSA<sup>+</sup>08] entwickelten auf Basis eines Projektionssystems mit Gasentladungslampe ein SAFS (safety-based AFS). Bei diesem System wird mit Hilfe einer Blende ein vertikaler Streifen der Lichtverteilung abgeschattet und so das auf der Fahrbahn reflektierte Licht des Scheinwerfers für entgegenkommende Verkehrsteilnehmer maskiert (siehe Abbildung 3.9, ver-

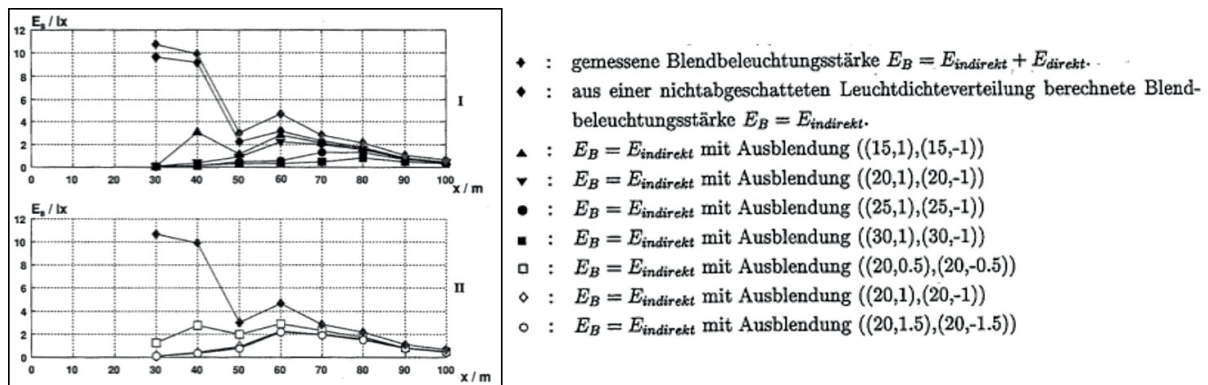


Abbildung 3.8: Reduzierung der Blendbeleuchtungsstärke im Passivvorgang bei gerader und nasser Fahrbahn in Abhängigkeit der ausgeblendeten Bereiche [Hof03]

gleichbar mit [GS09a], [GS09b] und [Rol05]). Neben Fahrkomfort und Zufriedenheit aus Sicht des Fahrers wurde auch die psychologische Blendung aus Sicht eines entgegenkommenden Verkehrsteilnehmers bei trockener Fahrbahn bewertet. Ein größerer horizontaler Winkelbereich<sup>2</sup> wirkt positiv auf die psychologische Blendung, führt allerdings zu einer neutralen bis negativen Bewertung hinsichtlich Fahrkomfort und Zufriedenheit. Folglich wäre die Kundenakzeptanz mit einer solchen Lichtverteilung nicht gewährleistet, weswegen eine weitere Optimierung der Maskierung anzustreben ist.

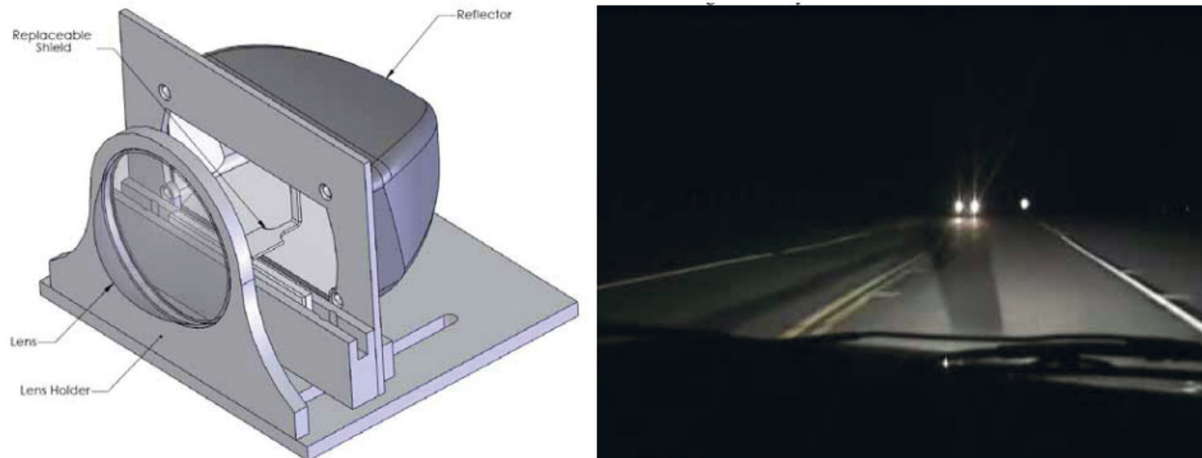


Abbildung 3.9: Versuchsaufbau des SAFS-Scheinwerfers und Fahrbahnausleuchtung aus Fahrerperspektive bei trockener Fahrbahn [BSA+08]

FISCHER ([Fis14], [Fis15]) analysierte die in Abbildung 3.10 gezeigte partielle „Maskierung“ der Abblendlichtverteilung<sup>3</sup>. Die „Maskierung“ hat einen sehr positiven Effekt auf die Reduzierung der Blendbeleuchtungsstärke ( $> 90\%$ ). Die erzielten Werte sind vergleichbar mit denen bei tro-

<sup>2</sup>Die abgeschatteten horizontalen Winkelbereiche betragen  $0^\circ$  (normale Lichtverteilung),  $4^\circ$  und  $6^\circ$  [BSA+08].

<sup>3</sup>Die partielle Maskierung entspricht einem Winkelbereich von  $\approx 1^\circ$  (vertikal) im Bereich des Reflexpunktes über den gesamten horizontalen Winkelbereich der Lichtverteilung [Fis15].

ckener Fahrbahn ohne „Maskierung“. Zudem war zu klären, welchen Effekt die Optimierung auf die subjektive Wahrnehmung hat. Aus Sicht des Fahrers ist zwischen den getesteten Dimmstufen (0%, 50%, 100%) der partiellen „Maskierung“ kein statistisch signifikanter Unterschied in der Bewertung der eigenen Ausleuchtung feststellbar. Die Bewertungen der psychologischen Blendung und der Sichtverhältnisse aus Sicht des entgegenkommenden Fahrers liefern jedoch höchst signifikante Unterschiede zwischen den Dimmstufen. Einige Teilnehmer empfanden die Dimmstufe von 50% noch als unerträglich, weswegen FISCHER die Dimmstufe 100% empfiehlt.

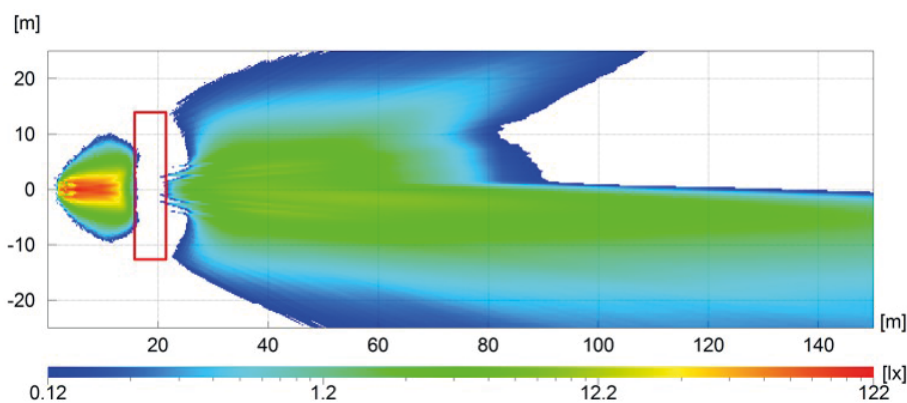


Abbildung 3.10: Lichtverteilung des partiell „maskierten“ Abblendlichts [Fis15]

FISCHER [Fis15] testete zudem ein vergleichbares System, wie das von Bullough (vgl. Abbildung 3.9), allerdings nicht nur bei trockener, sondern auch bei nasser Fahrbahn. Ein solches System ermöglicht im Passiervorgang bei nasser Fahrbahn eine deutliche Reduzierung der Blendbeleuchtungsstärke (siehe Abbildung 3.11). In Begegnungsentfernungen  $< 11$  m ist systembedingt keine weitere Reduzierung möglich. FISCHER verweist darauf, dass diese Problematik bei künftigen Matrix-Scheinwerfern nicht mehr auftreten würde.

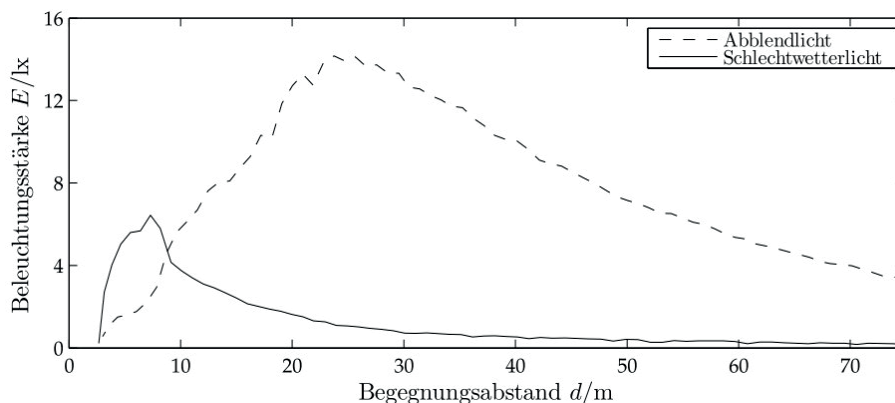


Abbildung 3.11: Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang mit Abblend- und Schlechtwetterlicht auf nasser Fahrbahn [Fis15]



## Offene Fragen

Trotz der zu erwartenden Akzeptanz solcher Lichtverteilungen und auch dem offensichtlichen Wunsch danach [Neu08] sind sie in heutigen Scheinwerfern kaum zu finden. Die zuvor beschriebene „Evolution“ blendfreier Abblendlichtverteilungen steht im Einklang mit heute verfügbaren Technologien ([SW14], [Kle14], [NK14]) und den künftigen Scheinwerfern, deren komplette Lichtverteilung adaptiv sein wird [OF14]. Mit Blick auf die bisherige Entwicklung stellen sich folgende Fragen:

- *Welche weitere Modifikation der Abblendlichtverteilung ist mit voll-adaptiven Lichtverteilungen denkbar, um eine zusätzliche Reduzierung der physio- und psychologischen Blendung im Straßenverkehr zu erzielen?* → Kapitel 8.1
- *Würde eine weitere Modifikation einen höheren Fahrkomfort bieten und kundenseitig akzeptiert werden?*
- *Würde die Maskierung des horizontalen Winkelbereichs bei nasser Fahrbahn vergleichbar störend bewertet werden wie bei trockener Fahrbahn?*

Neben diesen Fragen ist zu klären, wie eine solche Modifikation zu bewerten ist. Dazu ist es vorteilhaft, die heute verfügbaren Methoden zur Blendungsbewertung zu kennen. Diese werden im nachfolgenden Kapitel zusammengefasst.

## 3.5 Methoden zur Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern

In den gesetzlichen Vorschriften wird die Blendungsbewertung des Abblendlichtes von Kfz-Scheinwerfern wie folgt definiert:

“The discomfort and/or disability caused by the passing beam of headlamps shall be gauged“<sup>4</sup>.

Faktisch sind für eine Typprüfung primär aus photometrischer Sicht die spezifischen Grenzwerte der Lichtstärke  $I(cd)$  ([ECE98], [ECE112], [ECE123]) relevant. Damit werden alle weiteren, in Kapitel 3.2 zusammengefassten, die Blendung beeinflussenden Faktoren nicht berücksichtigt, weswegen keine Aussage über das tatsächliche Blendpotential möglich ist. Es ist lediglich ein Vergleich verschiedener Scheinwerfer unter idealisierten Bedingungen möglich. Daher sind weitere Methoden erforderlich, um die tatsächliche Blendung zu bewerten.

Allgemeine Methoden zur Bewertung der physiologischen und psychologischen Blendung wurden in Kapitel 2.2.2 (S. 16 ff.) beschrieben. Dieses Kapitel beschäftigt sich insbesondere mit Methoden, die im Entwicklungsprozess von Scheinwerfern zum Einsatz kommen.

Nachfolgend wird zwischen gesetzlich vorgeschriebener und erweiterter Methode unterschieden. Abschließend werden offene Fragen bezüglich der beschriebenen Methoden angeführt.

---

<sup>4</sup>Stand 2015 ist diese Definition eine Empfehlung an die Behörden und so in der ECE R98 festgehalten [ECE98].

## Vorgeschriebene Methode

Im Entwicklungsprozess erfolgt die Blendungsbewertung zunächst simulativ. Erst mit Vorliegen eines Prototypen ist eine messtechnische Bewertung möglich. Grundlage dabei sind die in den ECE-Regelungen aufgeführte photometrische Messvorschrift und der Messschirm mit den photometrischen Anforderungen (vgl. Abbildung 2.8, S. 12).

## Simulative Bewertung

Die simulative Bewertung dient primär dazu, den Projektfortschritt anhand des CAD-Modells des Scheinwerfers zu überwachen und die optische Auslegung des Scheinwerfers abzusichern. Dazu wird die berechnete Lichtverteilung unter Zuhilfenahme sogenannter LID test tables (Light Intensity Distribution, englisch für Lichtstärkeverteilungskörper) analysiert. Diese enthalten alle Messpunkte des Messschirms aus den ECE-Regelungen (siehe Abbildung 3.12).

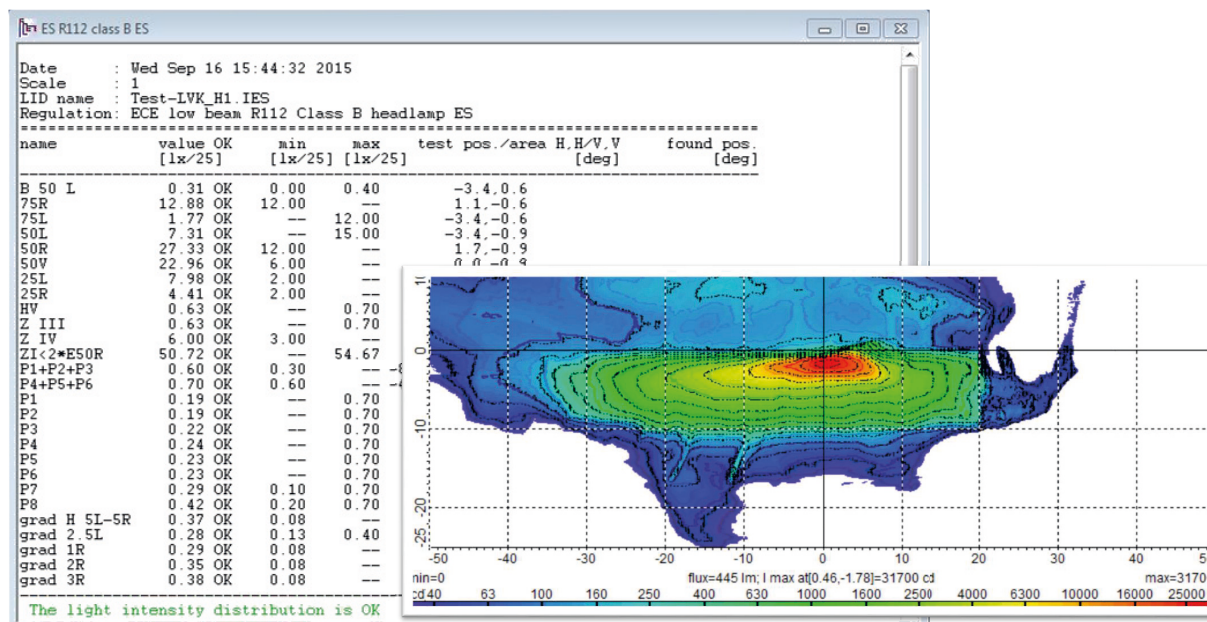


Abbildung 3.12: Lichtstärkeverteilung eines Abblendlichts am Messschirm mit zugehörigem LID test table

Die Blendungsbewertung findet anhand der in Kapitel 2.1.2 (S. 11) beschriebenen Messpunkte statt. Die Lichtverteilung ist somit innerhalb kurzer Zeit hinsichtlich der gesetzlichen Vorschriften abprüfbar. Die simulierte Lichtverteilung dient dabei dem Soll-Ist-Vergleich mit der meist am Goniophotometer durchgeführten Messung.

## Messtechnische Bewertung

Die messtechnische Bewertung eines Scheinwerfers findet am Goniophotometer statt. Dies ist die gesetzmäßig vorgeschriebene Messmethode, wengleich auch weitere Techniken geeignet sind, um die Lichtstärkeverteilung eines Scheinwerfers zu erfassen ([MKH<sup>+</sup>14], [Schw07]). Eine genauere Beschreibung des Ablaufs einer solchen Messung ist im Abschnitt *Goniophotometer* unter

Kapitel 2.1.3 (S. 13) beschrieben. Der gemessene LVK ermöglicht einen Vergleich mit dem simulierten LVK [KMV<sup>+</sup>09]. Etwaige Abweichungen zwischen Simulation und Messung sind zu diskutieren und gegebenenfalls notwendige Änderungen in das optische Konzept einzuarbeiten. Die Blendungsbewertung findet ebenfalls über die in der ECE definierten Messpunkte statt. Folglich haben beide Methoden nur eine bedingte Aussagekraft bezüglich der resultierenden Blendung im Straßenverkehr. Daher ist eine Erweiterung der Methoden anzustreben.

### Erweiterte Methode

Es gibt viele Bestrebungen, Methoden zur Bewertung von Kfz-Scheinwerfern zu entwickeln, die eine höhere Aussagekraft besitzen, als die, aufs Wesentliche beschränkten, ECE-Regelungen (u.a.: [Dam95], [Dah01], [Fla01], [Fla03], [Ham01], [Kle03], [KKM<sup>+</sup>07], [MKK<sup>+</sup>07]). Bei der hier beschriebenen Methode handelt es sich um eine von der CIE veröffentlichte Bewertungsmethode (siehe CIE 188:2010 [CIE10]). Hintergrund für die Entwicklung war der Wunsch nach einem Industriestandard, da die Kriterien unter den Herstellern und Lieferanten stark differieren ([CIE10], [Böb09]). Als Vorbild diente der “EuroNCAP“.

Als Methode wird ein dreistufiges Vorgehen vorgeschlagen, bei dem die Blendungsbewertung einen hohen Stellenwert einnimmt. Die physiologische und psychologische Blendung sind abhängig von der jeweiligen Scheinwerferlichtverteilung. Dies verdeutlichen die in Abbildung 3.13 gegenübergestellten Schnittebenen durch unterschiedliche Lichtverteilungen. Die resultierende Blendbeleuchtungsstärke  $E_B(lx)$  variiert an der markierten Stelle aufgrund der verschiedenen Lichtverteilungen um den Faktor 10.

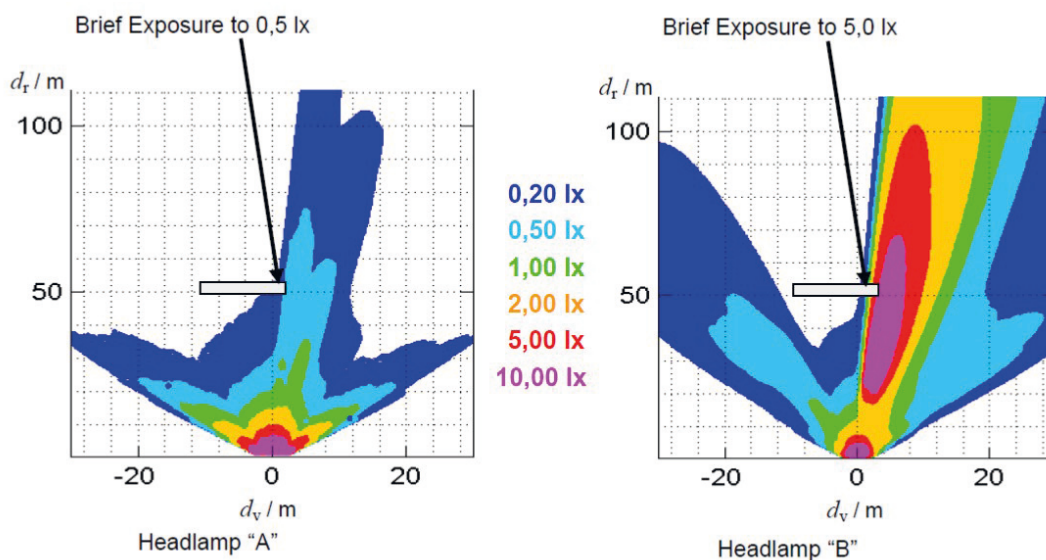


Abbildung 3.13: Vergleich zweier Scheinwerfersysteme hinsichtlich der Blendbeleuchtungsstärke  $E_B(lx)$  (Schnittebene durch die Lichtverteilungen, 940 mm über der Fahrbahn) [CIE10]

Als relevant erweist sich, die Position der Augen im Verkehrsraum zu berücksichtigen [Tar05]. Um diesen Aspekt bei der Bewertungsmethode aufzugreifen, definiert das TC4-45 die in Abbildung 3.14 dargestellte Blendungszone (2) (nach [Dam95]). Diese ist auf die Fahrzeug-Längsachse (3) und auf eine 750 mm über der Fahrbahn befindliche Ebene (4) referenziert. Zusätzlich wird die Zone mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Position entgegenkommender Augen (1) im Verkehrsraum gewichtet.

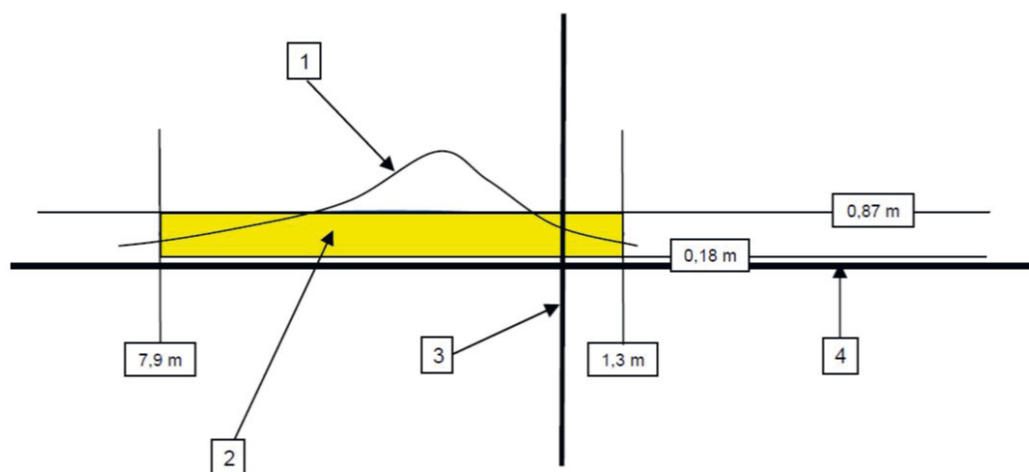


Abbildung 3.14: Blendungszone aus der CIE 188:2010 [CIE10]

Die endgültige Bewertung erfolgt über die Berechnung des Lichtstroms  $\Phi(lm)$  innerhalb der Blendungszone, wobei jedes Segment der Blendungszone mit einem definierten Faktor<sup>5</sup> multipliziert wird. Anschließend wird die Summe aller Segmente gebildet und als Maßzahl zur Blendungsbewertung herangezogen [CIE10].

Die zuvor beschriebene Methode wurde im Rahmen von Messungen und weiteren Analysen validiert ([CIE10], [BB11]). Im Vergleich zu dem gesetzlich vorgeschriebenen Messpunkt B50L (siehe Abbildung 2.8, S.12) ermöglicht diese Methode mit Hilfe der Blendungszone (siehe Abbildung 3.14) eine umfänglichere Blendungsbewertung.

### Offene Fragen

Sofern die zulässigen Grenzwerte nicht überschritten und alle weiteren gesetzlichen Anforderungen erfüllt werden, ist der entwickelte Kfz-Scheinwerfer anhand der gesetzlich vorgeschriebenen Methode hinreichend geprüft und besteht die Typprüfung. Ob eine Blendung im Straßenverkehr daher tatsächlich ausgeschlossen ist, belegen die ermittelten Beleuchtungs- bzw. Lichtstärken nicht. Mit der CIE 188:2010 ist eine Bewertungsmethode verfügbar, die eine höhere Aussagekraft besitzt.

<sup>5</sup>Faktor in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Position entgegenkommender Augen [CIE10].

Die zuvor genannten Methoden weisen Schwachpunkte auf. Insbesondere die gesetzlich vorgeschriebene Methode wird als unzureichend erachtet ([Tar01], [Tar05]). Die Anforderungen sind bereits für einfache Systeme erfüllbar. Das Potential heutiger Scheinwerfertechnologien zur Erhöhung der Verkehrssicherheit findet keine Berücksichtigung [Tar12]. Dies führt zu den nachfolgenden Fragen:

- *Welche Methode eignet sich zur Bewertung der indirekten Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit ...*
  - *... geänderter Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche?* → Kapitel 7.4
  - *... der Anbauposition und -höhe der Scheinwerfer?* → Kapitel 7.4
- *Wie ist das Verhältnis von direkter zu indirekter Blendbeleuchtungsstärke während des Passiervorgangs zu bewerten?* → Kapitel 7.3



## 4 Blendung im Straßenverkehr - Eingrenzung des Parameterraums

Bei einer Umfrage gaben 63% der 2000 Befragten an, sich nachts beim Autofahren davor zu fürchten, geblendet zu werden [Kha14]. Am ehesten wird Regen und eine nasse Fahrbahn mit Blendung in Verbindung gebracht [Zyd14]. Doch nicht nur Witterungsbedingungen haben einen Einfluss auf die Blendung (siehe auch Kapitel 3.1). Zum besseren Verständnis liefert Kapitel 4.1 eine Übersicht relevanter Einflussgrößen. In Kapitel 4.2 wird das Geometriemodell definiert, aus dem sich die geometrischen Beziehungen ableiten lassen. Zuletzt wird in Kapitel 4.3 eine Umfrage angeführt, die den Parameterraum eingrenzen und die Relevanz der vorliegenden Arbeit aufzeigen soll.

### 4.1 Übersicht relevanter Einflussgrößen

Im Straßenverkehr haben viele Größen einen Einfluss auf die physiologische und psychologische Blendung. Aus diesem Grund wurde eine Übersicht mit relevanten Einflussgrößen aufgestellt, die in Abbildung 4.1 dargestellt ist.

Tabelle 4.1: Übersicht relevanter Einflussgrößen

Bereich	Parameter/Faktor	Symbol	Einstellung			Einheit	Zugehörige Studie / Kapitel
Scheinwerfer	Optisches System	OS	Reflexion	Projektion		()	5.4, 6.1, 6.2
	Leuchtmittel (Spektrum)	LM	Halogen	Xenon	LED	(nm)	6.2, 6.3
	Lichtaustrittsfläche (Größe der leuchtenden Fläche)	G	klein	mittel	groß	(cm <sup>2</sup> )	6.2
	Leuchtdichte	L				(cd/m <sup>2</sup> )	6.2, 6.3
	Lichtstärkeverteilungskörper	LVK	LVK-H	LVK-X	LVK-L	(cd)	5.4, 6.1, 6.2
	Funktionalität	F	LowBeam	HighBeam	AFS	()	Grundsätzlich LowBeam
Fahrzeug	Fahrzeugklasse	FK	M1			()	Grundsätzlich M1
	Anbauhöhe	AH	530	650	820	(mm)	5.3
	Anbaubreite	AB	1400			(mm)	6.1
	Intelligente Lichtsysteme (Zusammenspiel Sensor/Aktor)	ILS	Statisch	FLA	DLA	()	Grundsätzlich statisch
Umgebungsbedingungen	Straßenart	SA	Landstraße	Stadtstraße	Autobahn	()	Grundsätzlich Landstraße
	Straßenbreite	SB	3,25	3,5	3,75	(m)	
	Begegnungsentfernung	BE	30	50	70	(m)	5.4, 6.1
	Nässegrad	NG	trocken	feucht	nass	()	5, 6
	Fahrbahnoberfläche	FO	Beton		Asphalt	()	5.1
Wetterbedingungen	WB	klar	Nebel	Regen	()	Grundsätzlich klar	
Blendung	Blendungsart	BA	gesamt	direkt	indirekt	()	5, 6

Die in Abbildung 4.1 dargestellten Einflussgrößen sind Bereichen zugeordnet und ihrer Priorisierung entsprechend farblich markiert. Zudem sind die zugehörigen Studien dieser Arbeit angegeben.

Ziel ist, den Effekt der Einflussgrößen bzw. der Faktoren zu bewerten und entsprechend bei den Anforderungen und den Bewertungsmethoden mit einzubeziehen. Alle anderen Faktoren werden bei den Versuchen berücksichtigt und weitestgehend konstant gehalten [SBH10]. Die angegebenen Einstellungen dienen teils zur Veranschaulichung, teils stellen sie die Stufen dar, die bei den Versuchen eingestellt werden (z.B. Anbauhöhe).

Unabhängig von den Einflussgrößen ist eine Referenzszenario zu definieren, die ein globales Koordinatensystem enthält. Diese Szene wird in Form eines Geometrie-Modells detailliert im folgenden Kapitel beschrieben.

## 4.2 Geometriemodell zur Blendungsbewertung im Straßenverkehr

Die vorliegende Arbeit bezieht sich bei allen Untersuchungen und auch bei den abgeleiteten Anforderungen und Bewertungsmethoden auf eine gerade Straßenführung. Abbildung 4.1 veranschaulicht die zugrunde gelegte Referenzszenario.

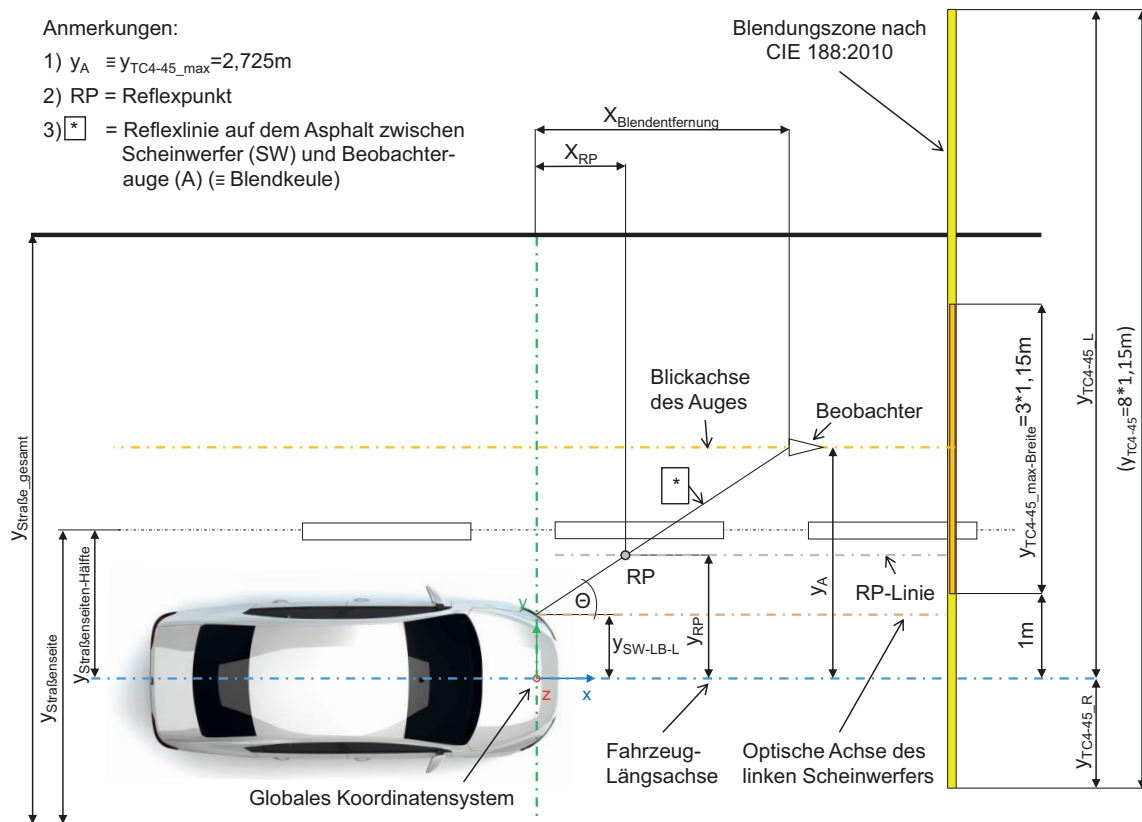


Abbildung 4.1: Geometriemodell zur Blendungsbewertung bei gerader Straßenführung



Das in Abbildung 4.1 enthaltene globale Koordinatensystem befindet sich auf der Fahrzeug-Längsachse gemäß CIE 188:2010 [CIE10]. Dies gewährleistet eine Bewertung der Scheinwerfer in Abhängigkeit der Anbauposition, was bei den ECE-Regelungen nicht der Fall ist (vgl. [Tar01]).

Zudem ist in Abbildung 4.1 die Blendungszone aus der CIE 188:2010 [CIE10] inklusive der relevanten Maße abgebildet. Als Beobachterposition wird die Stelle mit der höchsten Wahrscheinlichkeit gewählt. Diese befindet sich in einem lateralen Versatz von 2,725 m zur Fahrzeuglängsachse mittig im inneren Bereich der Blendungszone. Die Position des Fahrzeugs wird mittig auf der eigenen Fahrbahn angenommen.

Alle weiteren in Abbildung 4.1 dargestellten Maße zwischen Scheinwerfer und Beobachter ergeben sich aufgrund der zuvor getroffenen Annahmen. Diese sind bei der Blendungsbewertung von besonderer Bedeutung. Unter Annahme einer konstanten Scheinwerferanbauhöhe ( $z_{LB} = 0,65$  m) und einer konstanten Beobachterhöhe ( $z_{TC4-45\_max} = 1,20$  m) werden diese Größen für den Fall eines Passiervorgangs bei gerader Straßenführung nachfolgend einzeln beschrieben.

Die im oberen Teil der Abbildung 4.1 angegebenen Größen  $x_{RP}$  und  $x_{Blendentfernung}$  variieren in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung. Nähert sich ein Beobachter dem Scheinwerfer, so verringern sich beide Größen proportional und führen zu einem Anwachsen des Blendwinkels  $\Theta$ . Sowohl die primäre als auch die sekundäre Blendquelle erscheinen unter dem gleichen horizontalen Blendwinkel  $\Theta$ .

Die mit \* gekennzeichnete Reflexlinie (siehe Abbildung 4.1), die sich zwischen Scheinwerfer und Beobachter auf der Fahrbahn ausbildet, veranschaulicht die geometrische Lage der "Blendkeule". Ausgehend von einer regennassen Fahrbahn und spiegelnder Reflexion ( $\epsilon_i = \epsilon_o$ ) bildet sich auf dieser Linie in Abhängigkeit der Scheinwerferanbauhöhe und der Beobachterhöhe der Reflexpunkt (RP) ab. Unter ideal spiegelnden Bedingungen durchstoßen an diesem Punkt die gedachten Strahlen vom virtuellen Abbild des Scheinwerfers die Straßenoberfläche. Im Passiervorgang verschiebt sich RP entlang der Geraden *RP - Linie*, die parallel zur optischen Achse des Scheinwerfers und zur Blickachse verläuft.

Untersuchungen von FISCHER [Fis15] erzielten bei einer Maskierung um den Punkt RP (siehe Abbildung 4.1) einen sehr positiven Effekt (siehe Kapitel 3.4, S. 35). Daher wird in der vorliegenden Arbeit speziell der Bereich um den Punkt RP untersucht. Die Erkenntnisse anderer Untersuchungen ([Dam95], [Ros00], [HG03], [Köh11]) finden dennoch Berücksichtigung.

Zuletzt sind noch die lateralen y-Versätze zu erwähnen (siehe Abbildung 4.1). Eine Variation von  $y_A$  und/oder  $y_{SW-LB-L}$  führt zu einem geänderten Blendwinkel  $\Theta$  und zu einer Verschiebung von RP entlang der y-Achse.

Wie die Blendung im nächtlichen Straßenverkehr bei einer solchen Straßenszene und den genannten Bedingungen wahrgenommen wird, zeigt die im folgenden Kapitel beschriebene Umfrage.

### 4.3 Umfrage: Blendung im nächtlichen Straßenverkehr

Der Wunsch nach einer Schlechtwetterlichtverteilung [Neu08] lässt darauf schließen, dass Verkehrsteilnehmer den indirekten Blendanteil als störend empfinden. Die Umfrage soll daher untersuchen, wie speziell das über die Fahrbahn reflektierte Licht empfunden wird, und welche Bereiche auf der Fahrbahn einen besonderen Einfluss haben. Das Ziel ist, Antworten auf die nachfolgenden Fragen zu erhalten:

- *Durch welche Bereiche vor einem entgegenkommenden Fahrzeug fühlen sich Verkehrsteilnehmer am meisten geblendet?*
- *In welcher Begegnungsentfernung empfinden Verkehrsteilnehmer die stärkste Blendung?*
- *Fühlen sich Verkehrsteilnehmer primär direkt (Scheinwerfer) oder indirekt (Reflex über Fahrbahn) geblendet?*
- *Welchen Einfluss hat eine gezielte Information auf die Bewertung der indirekten Blendung?*

Daneben wurde folgende Hypothese aufgestellt:

- *Die stärkste psychologische Blendung ist in einer kürzeren Begegnungsentfernung zu erwarten als die stärkste physiologische Blendung. Dies liegt in der höheren Lichtstärke der indirekten Blendquelle und des quadratischen Einflusses des Blendwinkels begründet.*

Zudem sollen Einschätzungen der Relevanz einer adaptiven blendfreien Abblendlichtverteilung erfragt werden. Nicht jede heute technisch realisierbare Lichtverteilung ist auch nötig und muss von den Verkehrsteilnehmern akzeptiert sein [Kle13].

#### 4.3.1 Methodik

Die Umfrage wurde bei IAV in Gifhorn im Zeitraum vom 03.06.2013 bis 17.06.2013 durchgeführt. Die Einladung zur Teilnahme wurde an 674 Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen versandt, von denen sich 87 zur Teilnahme bereit erklärten. Die 87 positiven Rückmeldungen wurden zur Untersuchung des Einflusses einer gezielten Information in eine Versuchs- (VG,  $n = 43$ ) und eine Kontrollgruppe (KG,  $n = 44$ ) eingeteilt.

Zu Beginn des Umfragezeitraums wurde die VG zu einer kurzen Info-Veranstaltung eingeladen (siehe Anhang A). Die KG erhielt lediglich eine gesonderte Email mit dem Umfragebogen (siehe Anhang A). Der zur Verfügung gestellte Zeitraum diente zur Auseinandersetzung mit der Thematik im Straßenverkehr. Anschließend war der Fragebogen zu beantworten.

Der Fragebogen besteht aus insgesamt 20 Fragen. Zunächst sind eine offene Frage zum wöchentlichen Fahrverhalten (h/Woche) und zwei weitere zur lichttechnischen Ausstattung des eigenen Fahrzeugs enthalten. Des Weiteren werden gezielt Fragen gestellt, die sich auf die Blendursachen, insbesondere die indirekte Blendung, im Straßenverkehr beziehen (Frage 4 - 14) . Frage 15

---

soll die Relevanz einer Blendungsminimierung erfragen. Speziell ist das über die Fahrbahn reflektierte Licht gemeint. Frage 16 - 18 sind personenbezogen und wurden bewusst gegen Ende des Fragebogens platziert [2ask]. Zuletzt sind zwei offene Fragen angeführt. Hier können die Teilnehmer angeben, ob ein wesentlicher Punkt bzgl. Blendung vernachlässigt wurde und welche Anforderungen/Spezifikationen die Teilnehmer an eine intelligente Schlechtwetterlicht-Funktion stellen.

Bis auf die erste und die letzten beiden Fragen wurden geschlossene Fragen gewählt. Eine Besonderheit stellen die Fragen 3, 4, 8 und 9 dar.

Zur Bewertung der Wahrnehmung kommt eine visuelle Analogskala zum Einsatz (siehe Abbildung 4.2). Die Skala ist 8 cm lang und die Ankerreize sind in Anlehnung an die de Boer-Skala gewählt (vgl. Abbildung 2.14, S. 19). Bei Frage 3, die sich auf die Wahrnehmung der eigenen Ausleuchtung bezieht, sind die Ankerreize in „schlecht“ und „gut“ geändert. Über die Länge erfolgt eine nachträgliche Umrechnung in die zur de Boer-Skala gehörigen Stufen 1 - 9. Die Abstufung ist um eine Dezimalstufe feiner gewählt. Weitere Gründe für die Wahl dieser Methode sind im Grundlagenkapitel *Psychologische Blendung* auf Seite 19 zu finden.



Abbildung 4.2: Visuelle Analogskala der Umfrage zur Bewertung der psychologischen Blendung in Anlehnung an die de Boer-Skala.

### 4.3.2 Ergebnisse

Am Ende des Umfragezeitraums wurden 55 Fragebögen abgegeben ( $n_{VG} = 26$ ;  $n_{KG} = 29$ ). Sieben Fragebögen waren fehlerhaft ausgefüllt (u.a. Mehrfachnennung und fehlende Antworten) und wurden daher von der Auswertung ausgeschlossen. Die erzielten Ergebnisse basieren auf den 48 ( $n_{VG} = 22$ ;  $n_{KG} = 26$ ) ausgewerteten Fragebögen. Der angewandten Methode entsprechend werden die Ergebnisse der Umfrage getrennt für die VG und KG dargestellt. Zunächst werden die allgemeinen Fragen ausgewertet, bevor in den Unterpunkten detailliert auf die spezifischen Fragen eingegangen wird.

#### Allgemeines

Die Verteilung auf die vordefinierten Altersklassen zeigt Abbildung 4.3. Der Frauenanteil ist in beiden Gruppen  $< 23\%$  (VG:  $n_m = 17$ ;  $n_w = 5$ ; KG:  $n_m = 23$ ;  $n_w = 3$ ).

Frage 16 ergab, dass in beiden Gruppen mindestens die Hälfte nachts beim Autofahren eine Sehkorrektur (Brille; Kontaktlinsen) trägt (VG: 56,5%; KG: 51,9%), bei einer durchschnitt-

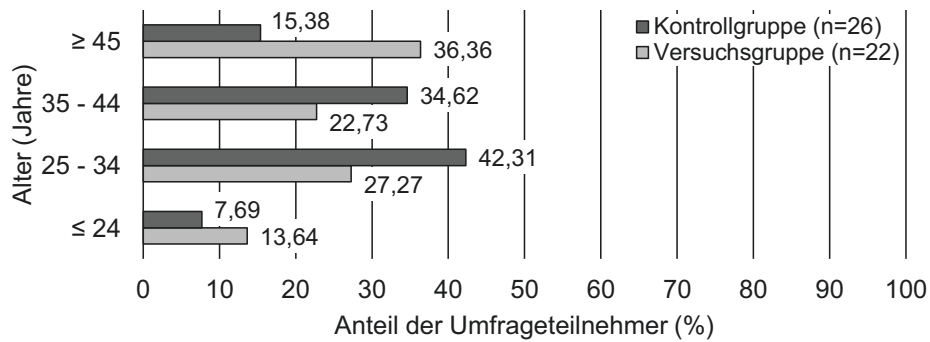


Abbildung 4.3: Häufigkeitsverteilung - Altersgruppen von VG und KG

lichen Nutzungsdauer ihres Kraftfahrzeugs von  $10,3h$  pro Woche (VG:  $\bar{t} = 10,0h$ ;  $\sigma = 5,1h$ ; KG:  $\bar{t} = 10,6h$ ;  $\sigma = 5,9h$ ).

Neben der Nutzungsdauer wurde gefragt, mit welchem Leuchtmittel die Abblendlichtfunktion der Frontscheinwerfer des eigenen Pkws ausgestattet sind (Frage 2). Der Erwartung entsprechend bestätigte sich, dass heutzutage noch immer überwiegend Fahrzeuge mit Halogenscheinwerfern gefahren werden (vgl. Abbildung 4.4).

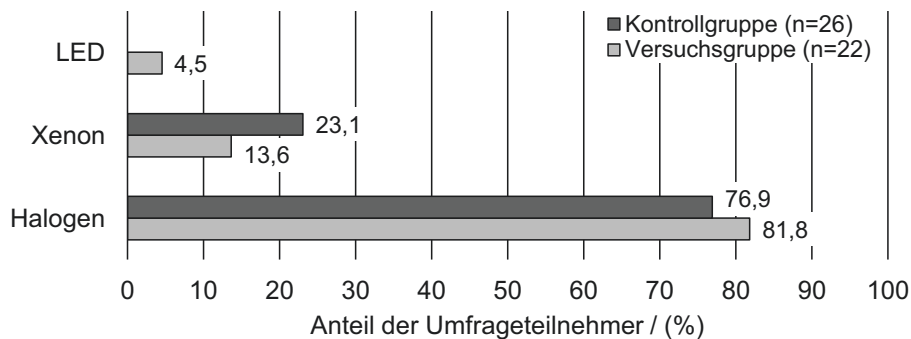


Abbildung 4.4: Häufigkeitsverteilung - Leuchtmittel der Abblendlichtfunktion des eigenen Pkws von VG und KG

Abbildung 4.5a zeigt, dass beide Gruppen die Ausleuchtung des Verkehrsraums durch die Kfz-eigene Beleuchtung im Durchschnitt vergleichbar bewerten. Abbildung 4.5b verdeutlicht, dass Teilnehmer, deren Scheinwerfer mit einem Leuchtmittel einer höheren ähnlichsten Farbtemperatur ( $T_{Halogen} < T_{Xenon} < T_{LED}$ ) ausgestattet sind, die Ausleuchtung tendenziell besser bewerten. Aufgrund der kleinen Stichproben, der hohen Streuung beim Leuchtmittel Halogen und nur einem Teilnehmer der VG, dessen Abblendlicht über LED realisiert ist, lässt dieses Ergebnis keinen Nachweis über statistische Signifikanz zu.

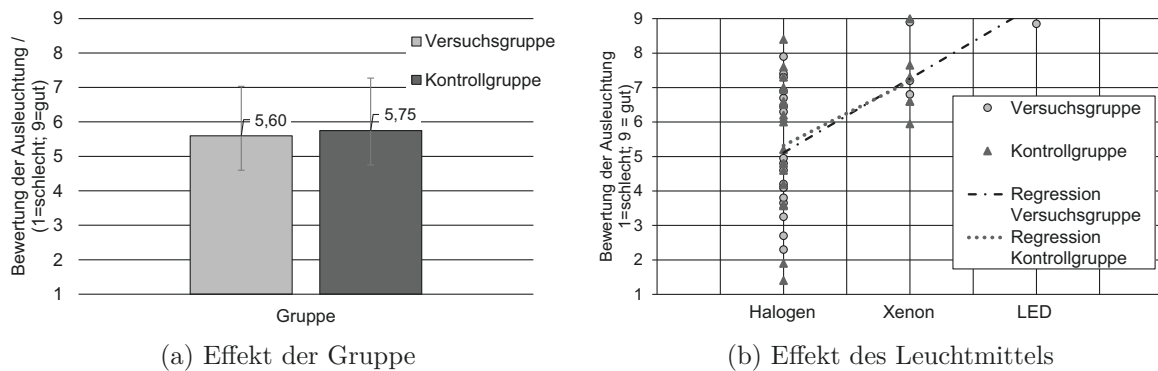


Abbildung 4.5: Bewertung der Ausleuchtung des Verkehrsraums durch die Kfz-eigene Beleuchtung.

### Wahrnehmung verschiedener Blendursachen

In Kapitel 3.1 wurde bereits auf wesentliche Aspekte eingegangen, die zur Blendung beitragen. Ziel der Umfrage war, zu ermitteln, wie verschiedene Blendursachen im Straßenverkehr von den Teilnehmern wahrgenommen werden.

Frage 5 beleuchtet daher verschiedene Aspekte des Scheinwerfers. Als Antwortmöglichkeit stehen die Scheinwerfergröße, die Helligkeit, die Lichtfarbe und die Angabe einer weiteren Eigenschaft zur Auswahl. In beiden Gruppen wird am häufigsten die Helligkeit als größte Blendursache angegeben (VG: 90,5%; KG: 61,5%). Die Scheinwerfergröße wurde hingegen kein einziges mal genannt. Die Begründung könnte der Tatsache geschuldet sein, dass die Größe des Scheinwerfers bzw. die der Lichtaustrittsfläche die Helligkeit beeinflusst. Die Helligkeit ist gleichzeitig die wahrgenommene Größe und wird daher am häufigsten als die größte Blendursache angegeben. Die Lichtfarbe wird seltener als die größte Blendursache empfunden (VG: 9,1%; KG: 19,2%). Unter sonstigen Blendursachen, die vergleichbar häufig wie die Lichtfarbe angegeben wurden (VG: 4,5%; KG: 19,2%), dominiert die Nennung einer falschen Einstellung, gefolgt von der Scheinwerferanbauhöhe unter zusätzlicher Angabe der Fahrzeugart SUV<sup>1</sup>. Der Effekt der letztgenannten Ursache wird hinsichtlich der indirekten Blendung näher in Kapitel 5.3 untersucht.

Verknüpft mit der vorherigen Frage war bei Frage 6 anzugeben, durch welches Scheinwerferlicht sich die Teilnehmer am meisten geblendet fühlen. Wenngleich diverse Studien<sup>2</sup> belegen, dass Xenon-Scheinwerfern weder eine erhöhte physiologische, noch psychologische Blendung verursachen, ist in Abbildung 4.6 zu sehen, dass beide Gruppen Xenon-Scheinwerfer als primäre Blendursache (> 76%) angeben. Obwohl LED-Scheinwerfer im Straßenverkehr noch eher eine Seltenheit sind, werden diese im Vergleich zu Halogen-Scheinwerfern verhältnismäßig häufig als Blendursache genannt. Gerade in der Seltenheit könnte das Ergebnis begründet liegen. Ein Fahrzeug mit LED-Scheinwerfern unter vielen Fahrzeugen mit Halogen-Scheinwerfern lenkt die

<sup>1</sup>Sports Utility Vehicle

<sup>2</sup>([LIS<sup>+</sup>07], [LK09], [SK07], [SKS<sup>+</sup>08], [SK08a], [SK08b], [SSHK09])

Aufmerksamkeit des Verkehrsteilnehmers auf das ungewohnte Erscheinungsbild und führt dadurch zu einer Ablenkung, die vergleichbar mit einer psychologischen Blendung ist. Ähnliche Phänomene werden bei heutigen Tagfahrlichtern angegeben [BKV11].

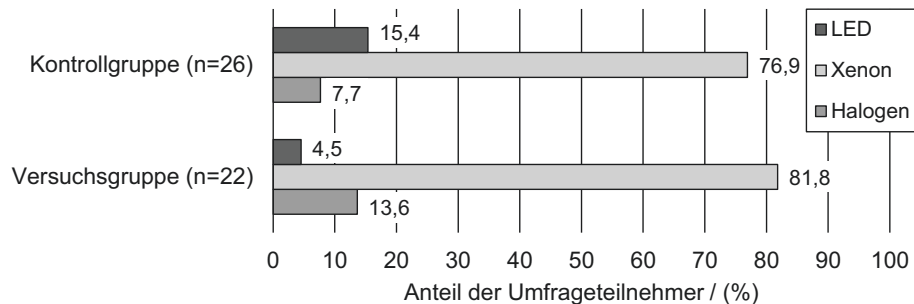


Abbildung 4.6: Blendursache - Das Leuchtmittel eines entgegenkommenden Fahrzeuges.

Frage 7 dient dazu, den Einfluss der Fahrzeugklasse auf die Wahrnehmung der Blendung zu prüfen. Als Antwortmöglichkeiten sind Auto (M1), Motorrad (L3e) und Omnibus/Lkw (M2) gegeben. Gemäß ECE-Regelung R48 [ECE48] dürfen die Scheinwerfer für das Abblendlicht bei allen drei genannten Fahrzeugklassen (L3e, M1, M2) in einer Höhe von 500 mm – 1200 mm angebracht werden, weswegen es hier keine wirklichen Unterschiede geben dürfte. Dem Verkehrsaufkommen entsprechend fühlen sich die Teilnehmer primär von der Fahrzeugklasse M1 geblendet (VG: 90,9%; KG: 69,2%). Daher ist diese Fahrzeugklasse vorrangig zu betrachten.

Nachfolgend werden Aspekte angesprochen, die sich auf geometrische Bedingungen im Straßenverkehr beziehen.

### Wahrnehmung des Straßenverkehrs

Die Fragen 11 - 14 betreffen speziell die Aspekte des Straßenverkehrs.

Frage 11 prüft, inwieweit die Wahrnehmung mit dem geometrisch relevanten Bereich (Zone) der Reflexblendung kongruent ist. Zur Veranschaulichung der geometrischen Bedingungen enthält die Umfrage eine Draufsicht der Straßenszene inklusive der vier Zonen. Bewusst wurden vier Zonen gewählt, um eine Neutralstellung (-|0|+) auszuschließen. Wie in Abbildung 4.7a zu sehen, werden von beiden Gruppen vorrangig Zone 2 und 3 als die Bereiche genannt, die bei regennasser Fahrbahn am meisten blenden. Zone 3 stimmt mit den geometrischen Bedingungen des Reflexpunktes bei einer Begegnungsentfernung von 50 m überein<sup>3</sup>.

Frage 12 gibt Aufschluss über die relevante Entfernung, in welcher sich die Teilnehmer bei regennasser Fahrbahn geblendet fühlen. Beide Gruppen tendieren zu Begegnungsentfernungen < 50 m, bei welchen sie sich am stärksten geblendet fühlen (siehe Abbildung 4.7b). Zudem ist bei der KG ein deutliches Maximum in einer Begegnungsentfernung von 50 m zu erkennen.

<sup>3</sup>Der Blendungszone der CIE 188:2010 [CIE10] entsprechend, ist der relevante Bereich  $\approx 14\text{ m} - 20\text{ m}$  vor dem Blendfahrzeug, bei einer Scheinwerferanbauhöhe von 0,65 m (siehe hierzu Kapitel 7.1, S. 119).

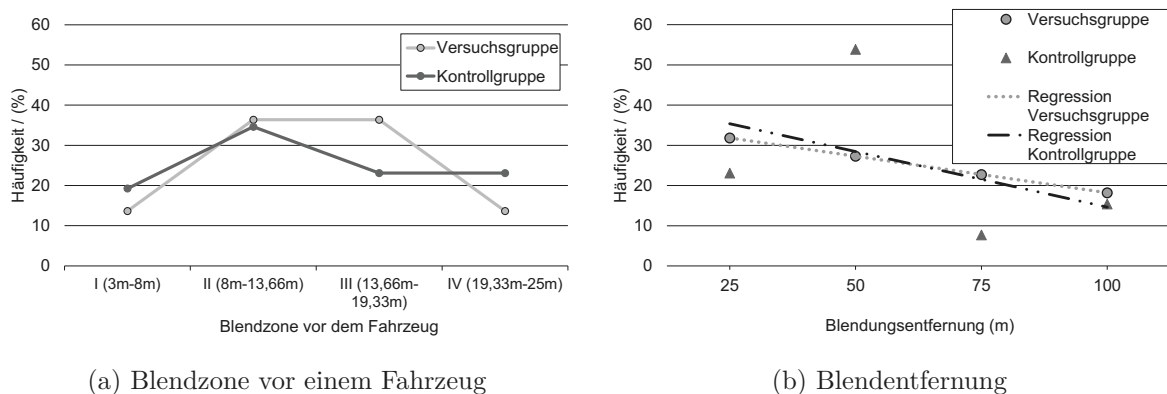


Abbildung 4.7: Blendursache - Geometrische Bedingungen im Straßenverkehr bei regennasser Fahrbahn (Teil I).

Es gilt allerdings nicht nur die Entfernung und den relevanten Bereich einzugrenzen. Aus diesem Grund werden im weiteren nach der Verkehrsumgebung und der Fahrbahndeckschicht gefragt, Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Teilnehmer ( $\geq 75\%$ ) vorrangig auf Landstraßen und durch die Straßendeckschicht Asphalt ( $\geq 56\%$ ) eine Blendung empfinden. Beide Verteilungen sind in Abbildung 4.8 visualisiert.

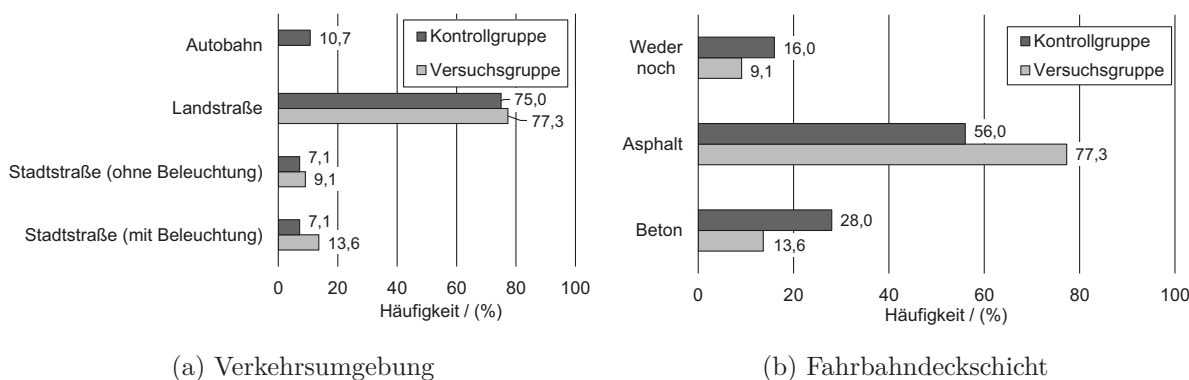


Abbildung 4.8: Blendursache - Geometrische Bedingungen im Straßenverkehr bei regennasser Fahrbahn (Teil II).

Die Ergebnisse, wie speziell die jeweiligen Blendanteile bei regennasser Fahrbahn wahrgenommen werden, sind im nächsten Abschnitt zusammengetragen. Ferner wird auf die Relevanz einer Minimierung der indirekten Blendung eingegangen.

### Wahrnehmung der Blendanteile

Die im Straßenverkehr resultierende Blendung setzt sich aus einem direkten und einem indirekten Blendanteil zusammen (siehe auch Kapitel 2.2.1). Wie beide wahrgenommen werden, ermitteln die Fragen 4 und 8 der Umfrage.

Um zunächst den direkten Blendanteil abzufragen, war bei Frage 4 anzugeben, wie blendend die Scheinwerfer eines entgegenkommenden Fahrzeuges empfunden werden. Frage 8 befasst sich hingegen mit dem indirekten Blendanteil des über die Fahrbahn reflektierten Lichtes. Zum besseren Vergleich sind beide Ergebnisse in Abbildung 4.9 gegenübergestellt.

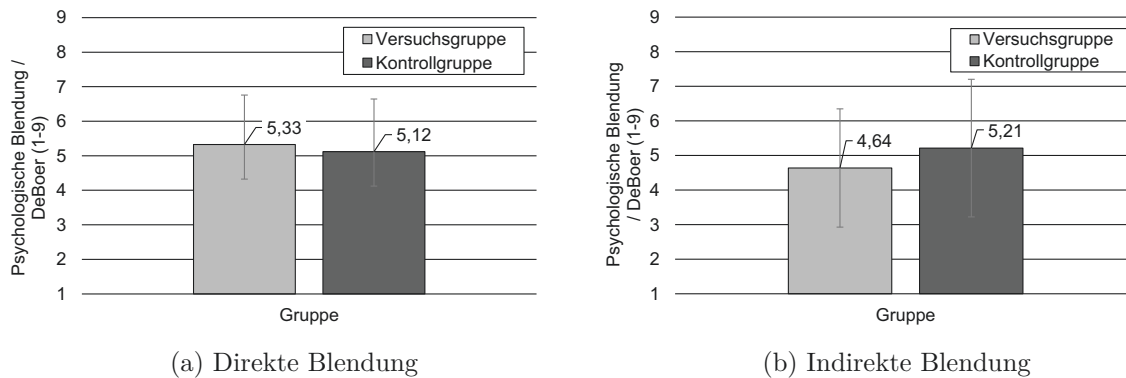


Abbildung 4.9: Bewertung des jeweiligen Blendanteils im nächtlichen Straßenverkehr bei regennasser Fahrbahn.

Sowohl die direkte als auch die indirekte Blendung erhalten vergleichbare Bewertungen (siehe Abbildung 4.9). Die KG bewertet die direkte Blendung mit 0,2 de Boer-Stufen marginal blendender als die VG. Bei der indirekten Blendung verhält es sich umgekehrt. Zudem ist der Unterschied mit 0,6 de Boer-Stufen sichtbarer, die Ergebnisse allerdings mit einer höheren Standardabweichung behaftet. Der größere Unterschied könnte in der gezielten Information begründet liegen. Dies wird im folgenden Abschnitt *Einfluss einer gezielten Information* näher untersucht. Die höhere Standardabweichung ist vermutlich auf die Schwierigkeit der Bewertung der indirekten Blendung zurück zu führen, vor allem in Anbetracht der Jahreszeit, zu der die Umfrage durchgeführt wurde. Situationen einer regennassen Fahrbahn bei Dunkelheit im Monat Juni erfahren zu können, sind aufgrund der kurzen Nächte eher selten.

Nachfolgend wird der Einfluss einer gezielten Information über die indirekte Blendung ausgewertet.

### Einfluss einer gezielten Information

Um den Einfluss der gezielten Information über die indirekte Blendung zu prüfen, wurden folgende Hypothesen aufgestellt:

- $H_0$ : Die gezielte Information über die indirekte Blendung hat keinen Einfluss auf die Bewertung der indirekten Blendung.
- $H_1$ : Die gezielte Information über die indirekte Blendung hat Einfluss auf die Bewertung der indirekten Blendung.



Die Signifikanzanalyse wurde in Form eines unabhängigen, beidseitigen t-Tests mit ungleichen Varianzen durchgeführt. Als Irrtumswahrscheinlichkeit wurde  $\alpha = 0,05$  angenommen. Die Analyse ergab, dass die gezielte Information über die indirekte Blendung keinen statistisch signifikanten Einfluss ( $p = 0,29$ ) auf die Bewertung der indirekte Blendung hat (vgl. Abbildung 4.9b).

Zusätzlich zu den Hypothesen wurden zwei Kontrollfragen (Frage 10 und 15) in die Umfrage aufgenommen, um den Einfluss der gezielten Information abzu prüfen.

In Abbildung 4.10 sind die Ergebnisse zu Frage 10 dargestellt. Die Teilnehmer mussten angeben, von welchem Blendanteil sie sich mehr geblendet fühlen, ob beide gleichermaßen blendend empfunden werden oder weder der eine noch der andere zur Blendung beiträgt. Da keiner der Teilnehmer „weder noch“ angegeben hat, ist davon auszugehen, dass sich die Verkehrsteilnehmer im Straßenverkehr grundsätzlich geblendet fühlen. Die Kontrollgruppe empfindet mit 42,3% die Scheinwerfer als stärker blendend. Die Versuchsgruppe fühlt sich mit 40,9% primär durch das über die Fahrbahn reflektierte Licht geblendet. Durch die Scheinwerfer direkt fühlt sich die Versuchsgruppe hingegen kaum geblendet. Dies verdeutlicht den Effekt der gezielten Information über die indirekte Blendung.

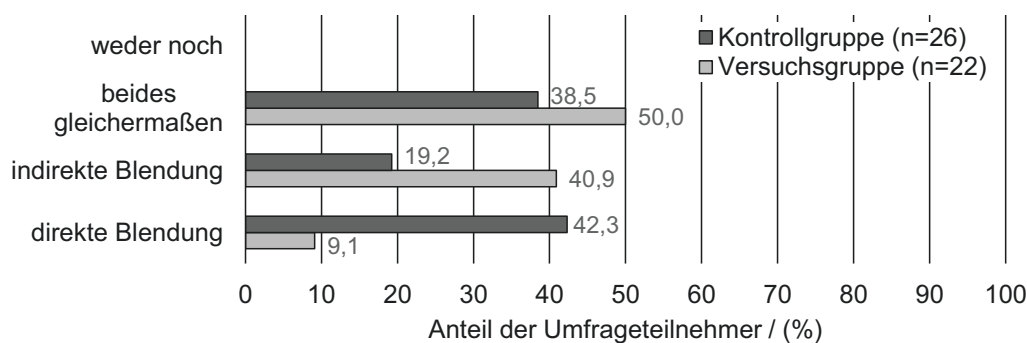


Abbildung 4.10: Angegebene Blendursache von der sich Verkehrsteilnehmer im nächtlichen Straßenverkehr bei regennasser Fahrbahn mehr geblendet fühlen.

Abbildung 4.11 zeigt die Ergebnisse zu Frage 15. Die Versuchsgruppe erachtet die Minimierung der indirekten Blendung relevanter als die Kontrollgruppe. Dies lässt ebenfalls den Effekt der gezielten Information erkennen.

Unabhängig von den zuvor genannten Analysen wurden zwei weitere Korrelationsanalysen durchgeführt, die in Abbildung 4.12 dargestellt sind. Es wurden die Bewertungen von Frage 8 mit denen von Frage 4 und Frage 15 verglichen. Bis auf die schwache Korrelation  $R^2 = 0,40$  zwischen der Relevanz einer Reduzierung der indirekten Blendung und der Bewertung der indirekten Blendung sind alle anderen Korrelation vernachlässigbar. Dennoch wird beim Vergleich der Korrelationsgeraden in Abbildung 4.12 (links) deutlich, dass die Versuchsgruppe die indirekte Blendung kontinuierlich um mindestens eine halbe de Boer-Stufe blendender bewertet als die Kontrollgruppe.

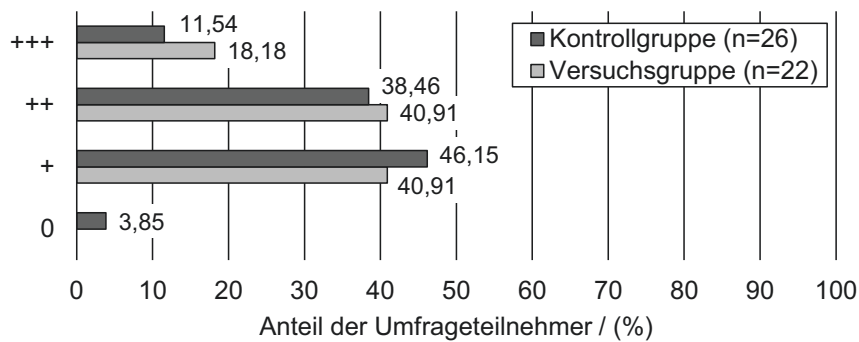


Abbildung 4.11: Relevanz einer Minimierung des über die Fahrbahn reflektierten Lichts bei regennasser Fahrbahn - Einfluss einer gezielten Information der VG.

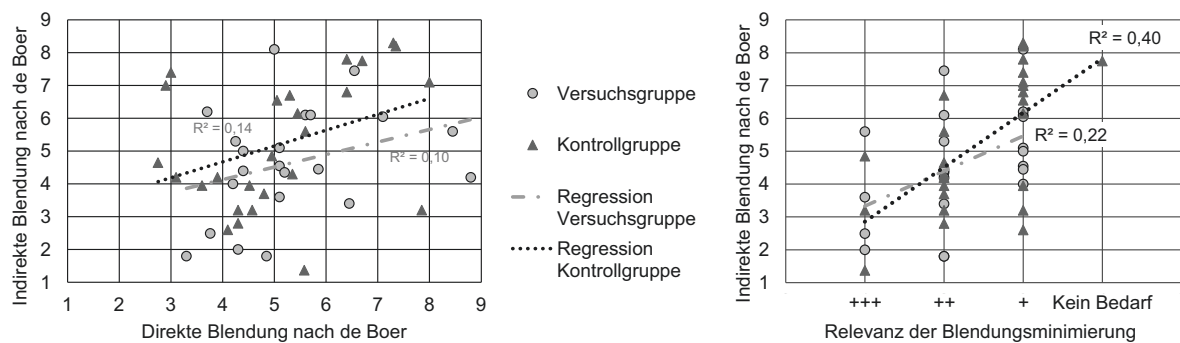


Abbildung 4.12: Korrelationsanalysen: Bewertung der indirekten Blendung verglichen mit der direkten Blendung (links); Relevanz der Blendungsminimierung verglichen mit der Bewertung der indirekten Blendung (rechts)

Nachfolgend werden im Abschnitt *Ergebnisse der offenen Fragen* relevante Punkte angeführt, die im Rahmen künftiger Forschungsarbeiten von Interesse sein könnten.

### Ergebnisse der offenen Fragen

Die am Ende der Umfrage gestellten offenen Fragen (19 und 20) liefern wissenswerte Hinweise für die Entwicklung eines adaptiven blendfreien Abblendlichtes. Mehrmals wurde darauf hingewiesen, die Akzeptanz einer Reduzierung der Helligkeit in bestimmten Bereichen (Reflexbereich/Blendkeule) abzufragen bzw. trotz dieser auf einen gewissen Fahrkomfort zu achten. Diese Hinweise bestätigen das übergeordnete Ziel der Arbeit, die Blendung bei möglichst gleichbleibendem Fahrkomfort bestmöglich zu reduzieren.

Zusätzlich stellen die Teilnehmer folgende Anforderungen an ein künftiges adaptives blendfreies Abblendlicht:

1. Sichtbarkeit von Fahrbahnmarkierungen auch bei nasser Fahrbahn.
2. Erkennen der Fahrbahnzustände (glatt oder nass).

3. Dynamische Lichtverteilung bei konstantem Helligkeitseindruck.
4. Automatische Höhenanpassung, Seitenstreifenenerkennung und Richten des Lichts zum rechten Fahrbahnrand.
5. Anpassung an den Reflexionsgrad der Fahrbahn (Feuchte/Schnee) und Anpassung der Farbtemperatur.

Die erste Anforderung wurde bereits von DAMASKY berücksichtigt [Dam95]. Einen ersten Ansatz zur Umsetzung der zweiten Anforderung liefert FISCHER mit dem beschriebenen System zur Messung der Reflexionseigenschaft [FK14]. Die dritte Anforderung ist speziell bei der partiellen Reduzierung der Lichtverteilung zu berücksichtigen, um einen möglichst konstanten Helligkeitseindruck und die Homogenitätskriterien [KV03] zu gewährleisten. Diese und die beiden letzten Anforderungen werden in der vorliegenden Arbeit in Kapitel 8 aufgegriffen.

### 4.3.3 Fazit

Ziel der durchgeführten Umfrage war unter anderem die Relevanz eines adaptiven blendfreien Abblendlichts abzufragen. Die Ergebnisse bestätigen die Notwendigkeit eines solchen Abblendlichtes und bekräftigen die Inhalte der vorliegenden Arbeit.

Anhand Frage 11 wurde ermittelt, dass sich die Teilnehmer vorrangig durch Zone 2 und 3 vor einem Blendfahrzeug bei regennasser Fahrbahn geblendet fühlen (vgl. Abbildung 4.7). Zone 3 entspricht bei der abgefragten Begegnungsentfernung von 50 m dem geometrischen Bereich, in welchem sich der mathematische Reflexpunkt befindet. Die Tatsache, dass sich die Teilnehmer zudem besonders durch Zone 2 geblendet fühlen, deckt sich mit den Ergebnissen von DAMASKY [Dam95]. Er ermittelte, dass die Höchstwerte der Vorwärtsreflexion meist näher beim Blendfahrzeug liegen. Eine genaue Einschätzung des relevanten Bereichs über Erfahrungswerte ist allerdings nur schwer möglich. Zudem ist nicht auszuschließen, dass die Ergebnisse der Versuchsgruppe einer Art Neutralstellung gleichen, da hauptsächlich die Zonen 2 und 3 der vier möglichen Zonen gewählt wurden. Die Ergebnisse zeigen daher lediglich eine Tendenz.

Aus Frage 12 geht hervor, dass mehr als die Hälfte der Teilnehmer kürzere Begegnungsentfernungen ( $\leq 50$  m) als am stärksten blendend empfinden (vgl. Abbildung 4.7). Dies widerspricht der Beobachtung, dass sich die stärkste physiologische Blendung im Fall einer regennassen Fahrbahn zu größeren Entfernungen (70 m) verschiebt [SCS01]. Dieses Erkenntnis untermauert die aufgestellte Hypothese, dass die stärkste psychologische Blendung in einer kürzeren Begegnungsentfernung zu erwarten ist, als die stärkste physiologische Blendung. Folglich bestätigt es die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit, Anforderungen zu entwickeln, die eine kontinuierliche Reduzierung der physio- und psychologischen Blendung im Passiervorgang gewährleisten.

Die Umfrage gibt zudem Aufschluss, welcher Blendanteil störender wahrgenommen wird. Die hierzu gestellten Fragen (4, 8 und 10) belegen, dass beide Blendanteile gleichermaßen blendend (Bewertung  $\approx 5$ ) wahrgenommen werden (vgl. Abbildung 4.9). Zwar entsprechen die Bewertungen in Anlehnung an die de Boer-Skala einer „gerade akzeptablen“ Blendung, dennoch wurden

in beiden Gruppen vereinzelt Bewertungen von „störend“ bis „unerträglich“ abgegeben. Da Blendung einen enormen Einfluss auf die Verkehrssicherheit nimmt, dürfen auch vereinzelt Bewertungen nicht vernachlässigt werden.

Darüber hinaus zeigt sich der erwartete Effekt der gezielten Information über die indirekte Blendung (Frage 10, siehe Abbildung 4.10). Aus der Versuchsgruppe geben über 40 % die indirekte Blendung als primäre Blendursache an. Aus der Kontrollgruppe sind es hingegen nur knapp 20 %. Die gezielte Information über die indirekte Blendung hat allerdings keinen statistisch signifikanten Einfluss ( $p = 0,29$ ) auf die Bewertung der indirekten Blendung. Eine Minimierung der indirekten Blendung ist dennoch anzustreben. Sofern ein Rückschluss von der Stichprobe auf die Grundgesamtheit der Verkehrsteilnehmer zulässig wäre, würde sich mindestens jeder fünfte nicht mehr durch die indirekte Blendung geblendet fühlen.

Abschließend bleibt zu sagen, dass die Ergebnisse die Relevanz eines adaptiven blendfreien Abblendlichtes bestätigen und der indirekten Blendung mindestens derselbe Stellenwert beizumessen ist, wie der direkten Blendung. Aus diesem Grund beschäftigen sich die nachfolgenden Kapitel mit der Entwicklung von Bewertungsmethoden und Anforderungen an ein adaptives blendfreies Abblendlicht.

---

## 5 Laboruntersuchungen relevanter Einflussgrößen

Das nachfolgende Kapitel fasst alle innerhalb der Licht- und Fahrerassistenzhalle von IAV unter idealisierten und wiederholbaren Bedingungen durchgeführten Versuche zusammen. Ziel aller Versuche war, Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht bei spiegelnden Fahrbahnoberflächen zu entwickeln.

### 5.1 Reflexionseigenschaften verschiedener Oberflächen

Die Reflexionseigenschaften der Fahrbahn sind maßgeblich von den Bestandteilen der Deckschicht abhängig. Unterschiedliche Aufhellgesteine verursachen einen anderen Leuchtdichtekoeffizienten für Vorwärts- und Rückwärtsreflexion [SCS01]. Dieser Effekt ist ebenfalls aufgrund verschiedener Nässegrade der Fahrbahn zu beobachten. Daher untersucht das vorliegende Kapitel den Einfluss verschiedener Oberflächen im trockenen und nassen Zustand auf folgende Aspekte:

- Leuchtdichtekoeffizient für Rückwärtsreflexion.
- Effekt des über einen definierten Bereich reflektierten Lichtstroms auf die Erhöhung der Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L der ECE [ECE112].

Neben vier verschiedenen Fahrbahndeckschichten, die im Verhältnis von 3 : 1 (Asphalt:Betton) gewählt wurden<sup>1</sup>, wird zusätzlich eine Bodenfliese aus der Licht- und Fahrerassistenzhalle von IAV analysiert. Die Halle bietet wiederholbare Messbedingungen und dient als Referenzumgebung für künftige Bewertungsmethoden. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die Reflexionseigenschaften des Bodens mit den, aus der Literatur bekannten Reflexionseigenschaften abzugleichen. Hierbei gilt es folgende Hypothese zu untersuchen:

- *Die Reflexionseigenschaften des Hallenbodens als Referenzuntergrund können durch einen Umrechnungsfaktor auf den nassen Zustand anderer Proben angepasst werden, da die Bodenfliese vergleichbare Reflexionseigenschaften wie eine nasse Fahrbahn aufweist.*

---

<sup>1</sup>Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS; seit 2014 Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, kurz: BMVI) teilte mit [BMVI12], dass im Jahr 2010 74,8% der rund 52.800 km Bundesstraße eine Asphaltdeckschicht besaßen und 25,4% eine Betondeckschicht.

---

### 5.1.1 Methodik

Die Reflexionseigenschaften verschiedener Oberflächen wurden zweigeteilt untersucht. Im ersten Teil wurde der Leuchtdichtekoeffizient für Rückwärtsreflexion  $R_R$  aus Fahrerperspektive bestimmt. Im zweiten Teil wurde die Blendbeleuchtungsstärke  $E_B$  am Auge eines entgegenkommenden Verkehrsteilnehmers bewertet.

Abbildung 5.1 zeigt die untersuchten Fahrbahndeckschichten und die Bodenfliese sowohl im trockenen als auch im nassen Zustand. Um vergleichbare Bedingungen zu gewährleisten, wurde der nasse Zustand mittels 10 Sprühstößen destilliertem Wasser realisiert. Die Beleuchtung der Oberflächen erfolgte mit dem Halogen-Reflexionssystem eines ‘‘Trabant nT‘‘ Scheinwerfers [MKB11]. Dieser Scheinwerfer wurde gewählt, da er bei IAV entwickelt wurde und der Lichtstärkeverteilungskörper daher genauestens bekannt war. Alle Messungen wurden gemäß ECE spannungsgeregelt bei 13,2V durchgeführt [ECE112]. Die Versuchsdurchführung der beiden Teilversuche wird nachfolgend separat beschrieben.

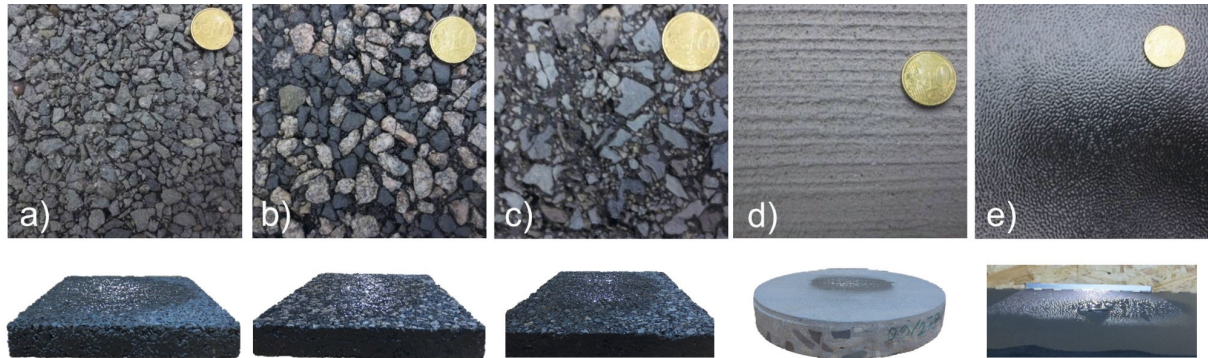


Abbildung 5.1: Analytierte Fahrbahndeckschichten (a-d) und Bodenfliese (e) im trockenen (oben) und nassen (unten) Zustand. Bei der Bodenfliese (e) ist zudem die Blendenöffnung zur Anleuchtung der Proben angedeutet. (vgl. [See13], [KSM<sup>+</sup>13a])

#### Leuchtdichtekoeffizient

Der Leuchtdichtekoeffizient  $q_r$  bzw. aufgrund der Anleuchtung durch Kfz-Scheinwerfer  $R_R$  genannt, wird gemäß CIE 144:2001 [CIE01] nach Formel 5.1 ermittelt.

$$R_R(\epsilon_i, \epsilon_o, \delta) = \frac{L(\epsilon_i, \epsilon_o)}{E_{\perp}(\epsilon_i)} (cd * m^{-2} * lx^{-1}) \quad (5.1)$$

Der Messaufbau, eine beispielhafte Messposition und die getroffenen Annahmen sind in Abbildung 5.2 zu sehen. Der Winkel zwischen Beleuchtungs- und Beobachtungsebene ( $\delta$ ) wird als Vereinfachung zu  $\delta = 0$  gesetzt. Sowohl Lichteinfallswinkel ( $\epsilon_i$ ), als auch Lichtausfallswinkel ( $\epsilon_o$ ) variieren in Abhängigkeit der untersuchten Messposition.

Bevor mit den Messungen gestartet wurde, erfolgte eine Einbrennphase  $> 30$  min zur Stabilisierung des Lichtstroms. Für jede Messposition fand eine Erfassung der vertikalen und horizontalen

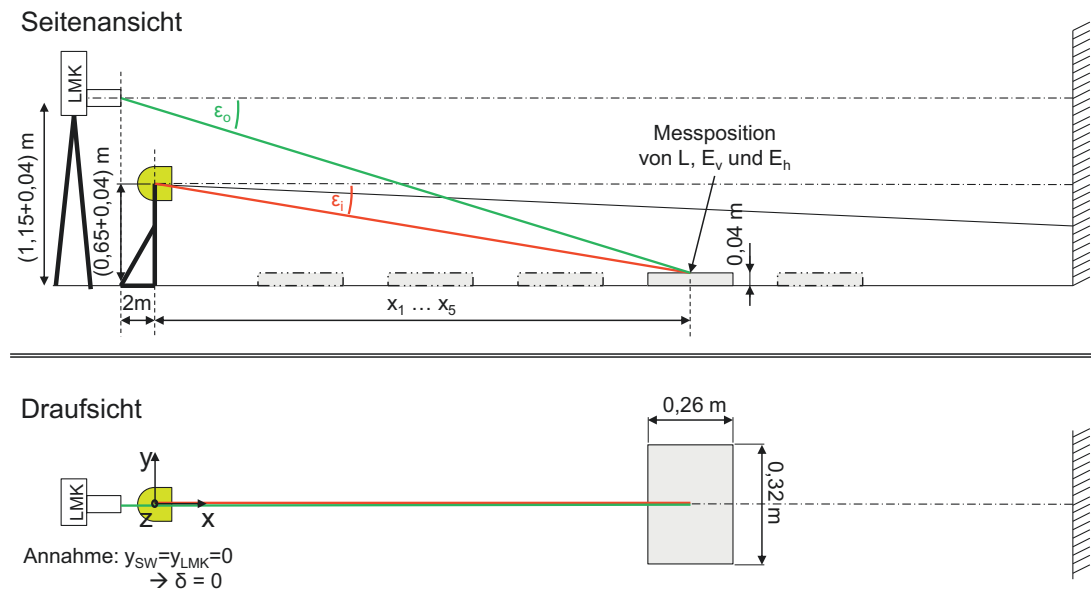


Abbildung 5.2: Messaufbau zur Ermittlung des Leuchtdichtekoeffizienten  $R_R$  für Rückwärtsreflexion (vgl. [See13])

Beleuchtungsstärke mittels Photometer statt. Beide Beleuchtungsstärken sind zur Berechnung der resultierenden, radialen Beleuchtungsstärke  $E_{\perp}$  an der betrachteten Messposition erforderlich. Alternativ ist diese über den Arkustangens aus der vertikalen Beleuchtungsstärke  $E_v$  und dem jeweiligen Lichteinfallswinkel  $\epsilon_i$  berechenbar. Bei der Messung der vertikalen Beleuchtungsstärke kam zur Abschattung des über den Boden reflektierten Lichts eine Blende zum Einsatz. Somit wurde lediglich die direkte Beleuchtungsstärke gemessen.

Die Leuchtdichte an der jeweiligen Messposition wurde mittels Leuchtdichtemesskamera, kurz LMK, (TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau, DE) aus Beobachterposition erfasst (siehe Abbildung 5.2). Beide Größen werden benötigt, um  $R_R$  nach Formel 5.1 zu berechnen.

### Blendbeleuchtungsstärke

Abbildung 5.3 zeigt die Skizze des gewählten Messaufbaus. Um sowohl die direkte als auch indirekte Blendbeleuchtungsstärke zu bewerten, wurden an dem in 25 m entfernten Messschirm die beiden Messpunkte B50L(direkt) und B50L(indirekt) definiert.

Die am Boden markierte Position RP repräsentiert den mathematisch ermittelten Reflexpunkt ( $\epsilon_i = \epsilon_o$ ) einer Begegnungsentfernung von 50 m. Wenngleich das Maximum des Leuchtdichtekoeffizienten auf der Straße meist vor oder leicht hinter dem mathematisch ermittelten Reflexpunkt liegt ([Dam95], [Hof03], [Köh11]), wird das Maximum der Leuchtdichte im Falle einer komplett mit Wasser benetzten Fahrbahn nahezu im Bereich des mathematischen Reflexpunktes gemessen ([Ros00], [Köh11]). Den mathematischen Reflexpunkt daher als relevanten Referenzpunkt zu wählen, stellt eine einfache und wiederholbare Versuchsbedingung dar.



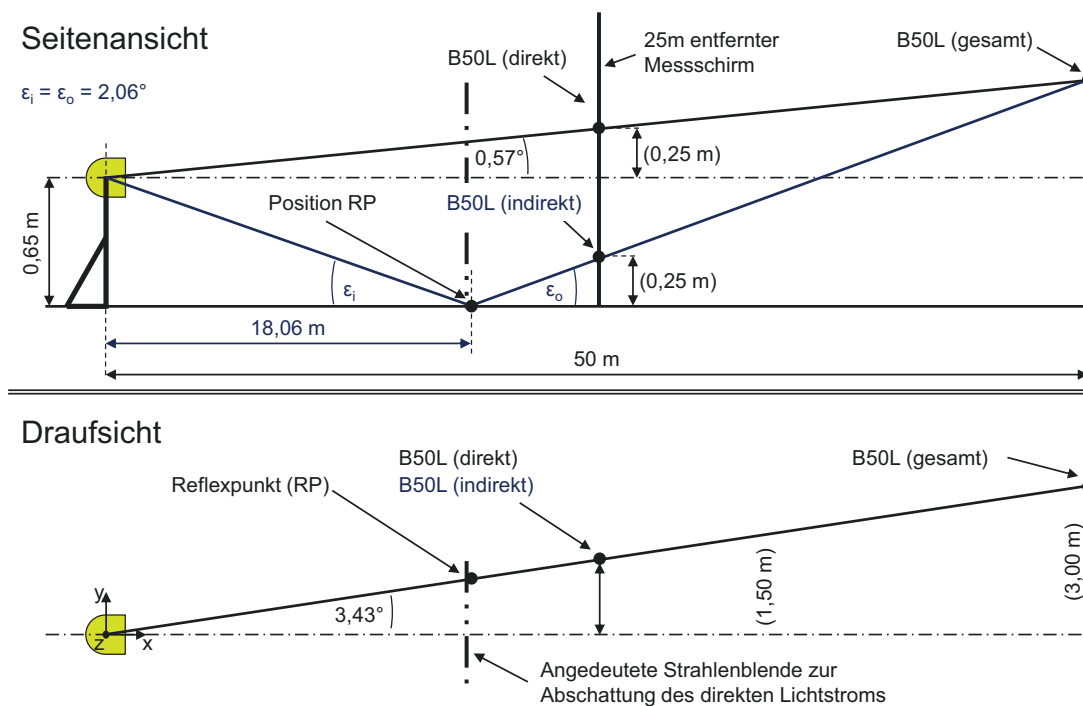


Abbildung 5.3: Messaufbau zur Bewertung der direkten und indirekten Blendbeleuchtungsstärke (vgl. [KSM<sup>+</sup>13a], [See13])

Zur Abschattung des direkten Blendanteils wurde vor dieser Position (in Richtung Scheinwerfer) eine Blende aufgestellt, die eine Blendenöffnung enthält (siehe Abbildung 5.1, Bodenfliese (e), nass). Die mathematisch bestimmte Blendenöffnung gewährleistet, dass nur das über die Bodenprobe reflektierte Licht auf den Messschirm trifft.

Nach der Einbrennphase des Scheinwerfers wurden zunächst die direkte und gesamte Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L(direkt) mittels Photometer gemessen. Zur Ermittlung der direkten Blendbeleuchtungsstärke wurden ebenfalls Blenden im Strahlengang positioniert, damit nur das direkte Licht auf den Messschirm trifft.

Der Effekt des über die Position RP reflektierten Lichts auf die indirekte Blendung am Punkt B50L(indirekt) wurde messtechnisch mit der LMK am Messschirm erfasst. Die LMK wurde dazu zwischen der in Abbildung 5.3 angedeuteten Strahlenblende und dem Messschirm aufgestellt. Da die 10 Sprühstöße des destillierten Wassers nur einer feuchten Fahrbahndeckschicht gleichen, wurde zuletzt auf die Bodenfliese ein flächendeckender Wasserfilm aufgebracht, der einer Art Spiegel gleicht.

Die Auswertung der Messungen erfolgte über die am lambertschen Messschirm gemessene Leuchtdichte. Der Reflexionsgrad des Messschirms beträgt 94 %. Im Vergleich zu Formel 5.1 ergibt sich der Leuchtdichtekoeffizient des Schirms somit winkelunabhängig nach Formel 5.2. Der Quoti-



ent der gemessenen Leuchtdichten der trockenen und nassen Proben entspricht folglich dem Quotienten der Beleuchtungsstärken (Formel 5.3).

$$q = \frac{L_i}{E_i} = \text{const.}; \quad (\text{cd} * \text{m}^{-2} * \text{lx}^{-1}) \quad (5.2)$$

mit  $i$ : *Fahrbahnzustand* ( $n = \text{nass}$ ;  $t = \text{trocken}$ )

$$\Rightarrow q = \frac{L_n}{E_n} = \frac{L_t}{E_t} \Rightarrow \frac{L_n}{L_t} = \frac{E_n}{E_t} \quad (5.3)$$

### 5.1.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden nachfolgend getrennt für die Leuchtdichtekoeffizienten und die Beleuchtungsstärke angeführt. Es werden nicht alle Ergebnisse im Detail angeführt, weswegen an dieser Stelle auf Anhang B verwiesen sei.

#### Leuchtdichtekoeffizient

In Summe wurden 10 Verläufe des Leuchtdichtekoeffizienten für Rückwärtsreflexion  $R_R$  aus Fahrerperspektive ermittelt (siehe Abbildung 5.4). Die Diagramme sind zudem vergrößert in Abbildung B.1, Anhang B dargestellt.

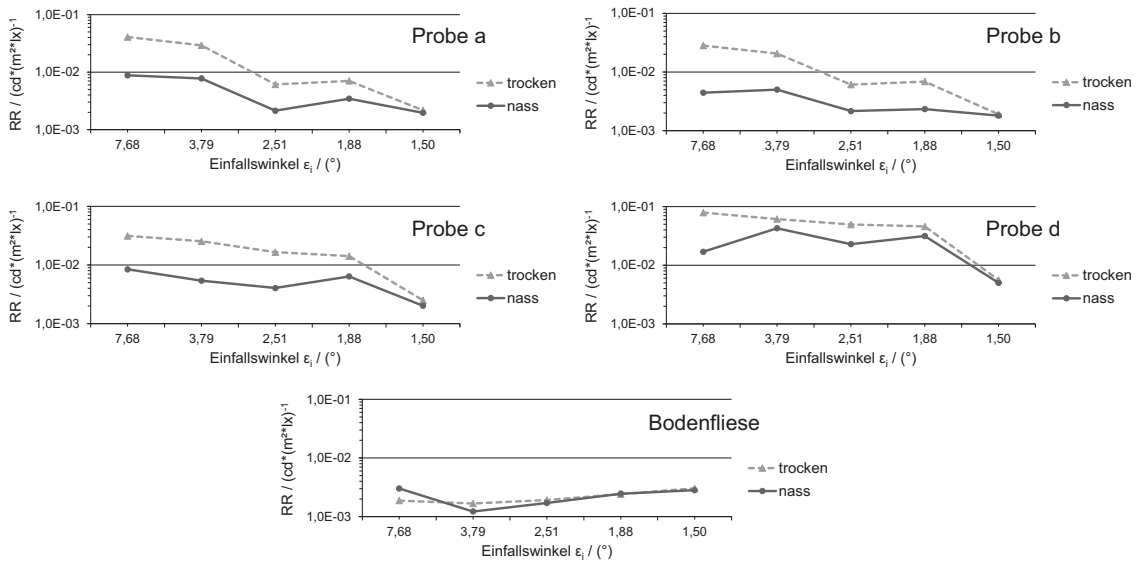


Abbildung 5.4: Verläufe der Leuchtdichtekoeffizienten für Rückwärtsreflexion  $R_R$  der analysierten Fahrbahnedeckschichten (a - d) und der Bodenfliese in Abhängigkeit des Einfallswinkels  $\epsilon_i$  im trockenen und nassen Zustand (Messwerte siehe Tabelle B.1, Anhang B)

Im Vergleich zur Bodenfliese weisen die Fahrbahnedeckschichten weit höhere Werte für  $R_R$  auf. Fahrbahnedeckschicht b besitzt hierbei den niedrigsten Leuchtdichtekoeffizienten. Zudem verdeutlicht der Vergleich, dass alle Fahrbahnedeckschichten mit abnehmenden  $\epsilon_i$  einen abfallen-

den Verlauf aufweisen. Die Bodenfliese weist hingegen mit abnehmendem  $\epsilon_i$  höhere Werte für  $R_R$  auf und ist daher vergleichbar mit dem einer nassen Fahrbahnoberfläche [SCS01] (siehe Abbildung 5.5).

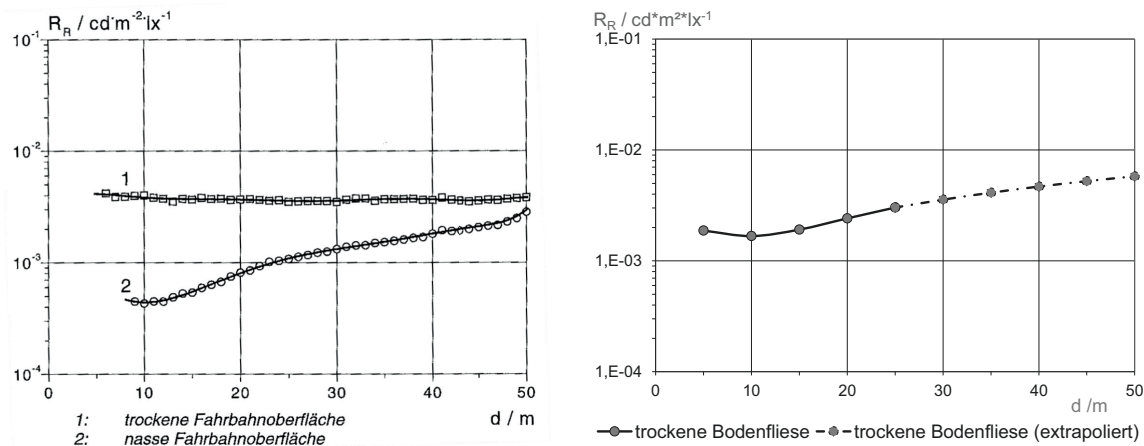


Abbildung 5.5: Vergleich des Leuchtdichtekoeffizienten  $R_R$  für Rückwärtsreflexion (li.: nach [SCS01]; re.: Bodenfliese der IAV Licht- und Fahrerassistenzhalle)

Den Erwartungen entsprechend führt die Benetzung mit Wasser zu einer Reduzierung der Leuchtdichtekoeffizienten (siehe Abbildung 5.4). Die Leuchtdichtekoeffizienten aller Fahrbahn-deckschichten erfahren nahezu eine Parallelverschiebung zu kleineren  $R_R$ . Bei der Betondeck-schicht (Probe d) ist der Effekt nicht so deutlich zu erkennen. Bei der Bodenfliese ist zwischen trocken und nass keine Reduzierung von  $R_R$  erkennbar.

### Blendbeleuchtungsstärke

Die am Punkt B50L(direkt) (siehe Abbildung 5.3) gemessene direkte Blendbeleuchtungsstärke beträgt  $0,47 \text{ lx}$ . Ohne Blenden im Strahlengang resultiert an diesem Punkt eine Beleuchtungsstärke von  $2,22 \text{ lx}$ . Das über den Hallenboden reflektierte Licht verursacht somit am Messpunkt B50L(direkt) eine um  $1,75 \text{ lx}$  erhöhte Blendbeleuchtungsstärke. Die gesamte Blendbeleuchtungsstärke beträgt folglich nahezu das fünffache der rein direkten Blendbeleuchtungsstärke. Alle weiteren Ergebnisse beziehen sich auf die gemessene Leuchtdichte, die im Bereich des Messpunktes B50L(indirekt) gemessen wurde.

Abbildung 5.6 zeigt den Effekt der Wechselwirkung von Fahrbahn-deckschicht und Nässegrad auf die indirekte Blendung aufgrund des über Position RP reflektierten Lichts. Die gemessenen Leuchtdichten und daraus berechneten Beleuchtungsstärken am Punkt B50L(indirekt) (siehe Abbildung 5.3) sind in Tabelle B.2 unter Anhang B zu finden. Ein Wert  $> 1$  bedeutet einen Anstieg der Blendbeleuchtungsstärke und umgekehrt. Probe b weist den größten Anstieg auf. Dieses Verhalten ist auf den niedrigen Leuchtdichtekoeffizienten für Rückwärtsreflexion (vgl. Abbildung 5.4) zurückzuführen und auf die Tatsache, dass eine nasse Fahrbahn eine erhöhte Vorwärtsre-

flexion verursacht. Die Bodenfliese weist hingegen einen Wert  $\ll 1$  auf. Wie bereits bei den Leuchtdichtekoeffizienten für Rückwärtsreflexion ist dieses Verhalten auf die Perlenbildung und die damit einhergehende diffuse Reflexion zurückzuführen. Aus diesem Grund und zur Analyse einer nahezu spiegelnden Oberfläche wurde abschließend ein flächendeckender Wasserfilm auf die Bodenfliese an der Position RP aufgebracht.

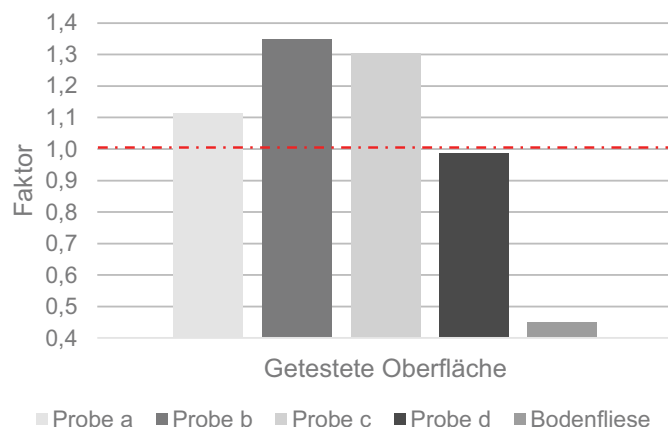


Abbildung 5.6: Faktoren, um welche die Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L(indirekt) aufgrund des, über die mit Wasser besprühte Position RP, reflektierten Lichtstroms verändert wird

Abbildung 5.7 zeigt, dass die spiegelnde Oberfläche zu einer nahezu vollständig gerichteten Reflexion führt. Das Reflexbild der Bodenfliese ist deutlich am Messschirm zu erkennen. Die dort am Messpunkt B50L(indirekt) ermittelte Blendbeleuchtungsstärke ist um mehr als das 67-fache erhöht (siehe Tabelle B.2, Anhang B).

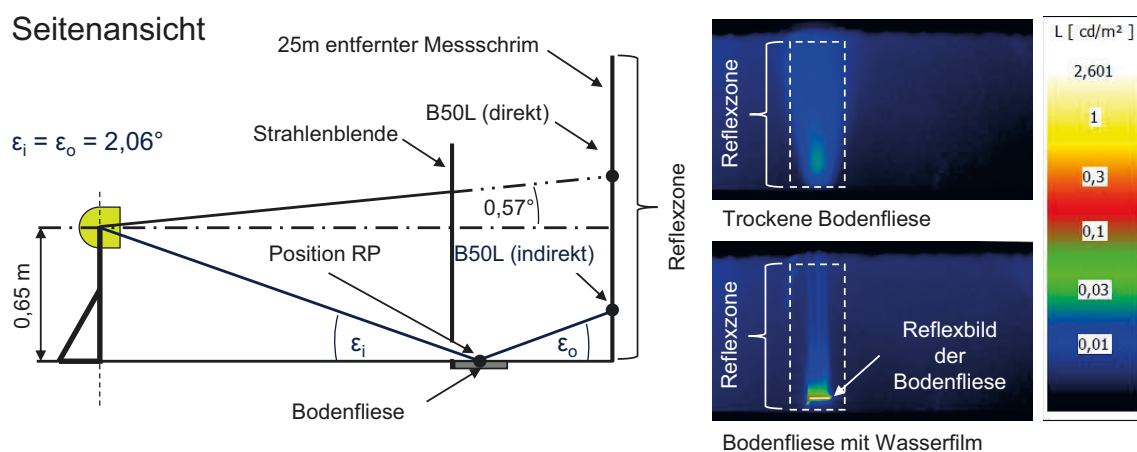


Abbildung 5.7: Effekt des über den Bereich des Reflexpunktes (Position RP) reflektierten Lichtstroms auf die Leuchtdichte am Messschirm aufgrund unterschiedlicher Zustände der Bodenfliese (oben: trocken; unten: flächendeckender Wasserfilm)

### 5.1.3 Fazit

Die durchgeführte Untersuchung bestätigt, dass unterschiedliche Bestandteile der Fahrbahn-deckschicht zu unterschiedlichen Leuchtdichtekoeffizienten für Rückwärtsreflexion führen. Durch Aufbringen von Wasser wird der Leuchtdichtekoeffizient zusätzlich reduziert. Bei den drei getesteten Asphaltproben bewirkt das aufgebrauchte Wasser einen ähnlichen Effekt. Bei der Betonprobe und der Bodenfliese sind keine deutlichen Effekte erkennbar. Beim Beton ist es vermutlich auf ein schnelleres Abtrocknungsverhalten des Materials zurückzuführen. Bei der Bodenfliese ist es durch die Perlenbildung und die damit verbundene diffuse Reflexion bedingt (vgl. Abbildung 5.1, Bodenfliese (e), nass). Hervorzuheben ist die Vergleichbarkeit der ermittelten Leuchtdichtekoeffizienten für Rückwärtsreflexion der Bodenfliese mit dem von SCHMIDT-CLAUSEN und SCHWENKSCHUSTER ermittelten Verlauf für eine nasse Fahrbahn [SCS01] (siehe Abbildung 5.5). In weiterführenden Studien wäre noch die Vergleichbarkeit der Leuchtdichtekoeffizienten für Vorwärtsreflexion der Bodenfliese mit einer realen nassen Fahrbahn zu überprüfen.

Anhand der ermittelten Leuchtdichtekoeffizienten für Rückwärtsreflexion der verschiedenen Fahrbahn-deckschichten und der Bodenfliese aus der Licht- und Fahrerassistenz-Halle wurden Faktoren bestimmt, die eine Umrechnung in die Leuchtdichtekoeffizienten der Fahrbahn-deckschichten ermöglichen (Tabelle B.3, Anhang B). Die Licht- und Fahrerassistenzhalle bietet daher eine geeignete Referenzumgebung zur Bewertung der Wahrnehmung unter realen Bedingungen (siehe auch [Muz14]).

Zur genaueren Nachbildung des Leuchtdichtekoeffizienten  $R_R$  sind bei weiterführenden Untersuchungen mehrere Stützstellen über die gesamte Messentfernung zu wählen. Speziell bei kleinen Einfallswinkeln ist die Ermittlung von  $R_R$  allerdings fehlerbehaftet, da nur wenige Pixel der Leuchtdichteaufnahme zur Auswertung dienen. Für detaillierte Untersuchungen sei an dieser Stelle auf KÖHLER [Köh11] verwiesen.

Die Ergebnisse der Blendbeleuchtungsstärke verdeutlichen den Effekt der Wechselwirkung aus Fahrbahn-deckschicht und Nässegrad auf die Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer. In Abhängigkeit der Bestandteile der Fahrbahn-deckschicht wird die Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L(indirekt) unterschiedlich stark erhöht. Probe (b) mit dem höchsten Anteil an Aufhellgestein erhöht die Blendbeleuchtungsstärke mit  $\approx 35\%$  am stärksten (siehe Abbildung 5.6). Zu berücksichtigen ist, dass diese Effekte anhand von sehr geringen Leuchtdichten ermittelt wurden (siehe Tabelle B.2, Anhang B).

Insbesondere der flächendeckende Wasserfilm, der einer spiegelnden Oberfläche gleicht, führt zu einer nahezu gerichteten Reflexion und erhöht die Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L(indirekt) um mehr als das 67-fache (vgl. Abbildung 5.6). Dies war deutlich an der am Messschirm gemessenen Leuchtdichte sichtbar (vgl. Abbildung 5.7). Ein direkter Rückschluss auf die Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L(gesamt) ist anhand der ermittelten Faktoren am Messpunkt B50L(indirekt) allerdings nicht zulässig. Dieser Effekt ist in weiteren Studien näher zu untersuchen, bei denen eine Messentfernung von 50 m realisiert werden kann.

## 5.2 Reflexblendung - statisch

Kapitel 5.1 verdeutlicht den Effekt der Reflexionseigenschaften verschiedener Fahrbahndeck-schichten in Wechselwirkung mit dem Nässegrad auf die resultierende Blendbeleuchtungsstärke. Insbesondere der flächendeckende Wasserfilm im Bereich des mathematischen Reflexpunktes führt zu einem starken Anstieg der Blendbeleuchtungsstärke. Dabei ist deutlich die Variation des Reflexionsanteils von diffus nach gerichtet zu erkennen (vgl. Abbildung 5.6). Dieser Effekt wurde anhand eines einzelnen Prototypen-Scheinwerfers untersucht. Im folgenden Kapitel wird der Effekt unter realitätsnäheren Bedingungen betrachtet. Hierzu werden beide im Fahrzeug verbauten Scheinwerfer untersucht. Zusätzlich wird analysiert, ob besonders der Bereich des mathematischen Reflexpunktes die Blendbeleuchtungsstärke beeinflusst. Dazu wird die Reflexionseigenschaft des Untergrunds streifenweise modifiziert. Dem Versuch selbst liegt folgende Hypothese zugrunde:

- *Es besteht die Möglichkeit, den geometrisch relevanten Bereich, in dem es aufgrund einer spiegelnden Oberfläche zu einer Reflexblendung kommt, vorab mathematisch zu bestimmen und somit bei der Auslegung von Kfz-Scheinwerfern zu berücksichtigen.*

### 5.2.1 Methodik

Das Fahrzeug<sup>2</sup> wurde in 25 m Messentfernung parallel zum Messschirm ausgerichtet (siehe Abbildung 5.8). Die elektrische Versorgung des Fahrzeuges wurde während der Messungen über ein externes Ladegerät gewährleistet. Spannungsschwankungen<sup>3</sup> sind aufgrund des elektronischen Vorschaltgeräts (EVG) der Scheinwerfer kleiner gleich 0,05 V. Die Messungen starteten, nachdem Strom und Spannung stabil waren. Anhand eines entwickelten Geometriemodells (siehe Kapitel 7.1) und der bekannten Scheinwerferanbauhöhe von 0,67 m wurden die geometrisch relevanten Bereiche ermittelt. Für den Reflexpunkt wurde eine Entfernung von 10,4 m, ausgehend vom Koordinatenursprung ermittelt. Unter der Annahme  $\epsilon_i = \epsilon_o$  trifft der reflektierte Lichtstrahl am Messpunkt RP<sub>25</sub> in einer Höhe von 0,94 m auf den Messschirm. Dies entspricht der analysierten Höhe nach CIE 188:2010 [CIE10], in der Lichtverteilungen hinsichtlich deren Blendpotential verglichen werden. Gemäß ECE [ECE123] und dem dort definierten Punkt B50L zur Blendungsbewertung beträgt die relevante Entfernung allerdings 50 m und nicht 25 m. Aus diesem Grund wurde mit Hilfe des entwickelten Geometriemodells ein weiterer Messpunkt (Messpunkt RP<sub>50</sub>) ermittelt, der zur Blendentfernung in 50 m gehört. Der zugehörige Reflexpunkt (Position RP<sub>50</sub>) befindet sich hierbei in einer Entfernung von 20,8 m vor dem Fahrzeug. Der an diesem Punkt reflektierte Lichtstrahl trifft anschließend in einer Höhe von 0,135 m auf den Messschirm. Zur Analyse des Effektes der Reflexblendung werden nicht die einzelnen Messpunkte, sondern horizontale Linien (Linie-RP<sub>25</sub> und Linie-RP<sub>50</sub>) auf Höhe der beiden Messpunkte untersucht. Entsprechend

---

<sup>2</sup>VW Passat 3BG, BJ 2004; Projektionsscheinwerfer mit Gasentladungslampen

<sup>3</sup>Beobachtung bei Untersuchungen zum Einbrennverhalten von Scheinwerfern ( $U_{min} = 13,17$  V;  $U_{max} = 13,22$  V).

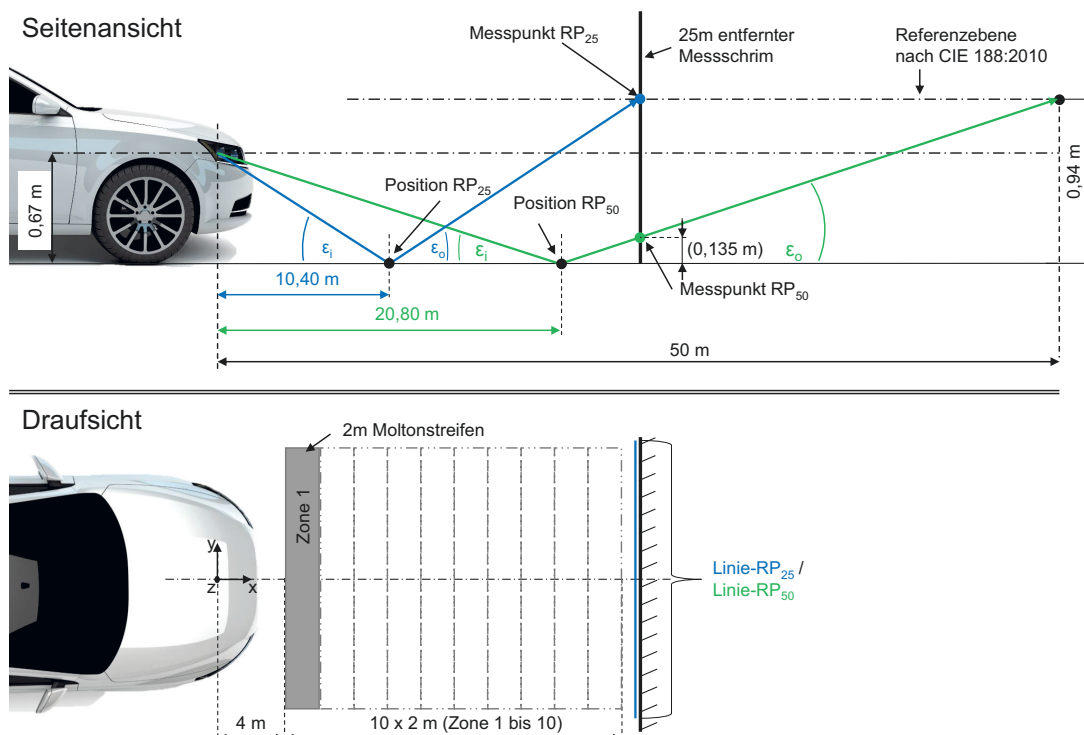


Abbildung 5.8: Messaufbau zur Analyse des Einflusses der Reflexblendung auf die gemessene Leuchtdichte und zur Verifizierung des entwickelten Geometriemodells

Formel 5.2 sowie Formel 5.3 kann anhand der gemessenen Leuchtdichten auf die Erhöhung der Blendbeleuchtungsstärke geschlossen werden.

Der Messablauf gestaltete sich wie folgt: Zunächst wurde am Messschirm die Leuchtdichteverteilung beider Scheinwerfer ohne Blenden im Strahlengang als Referenz aufgenommen. Anschließend wurde diese Messung erneut mit Blenden im Strahlengang durchgeführt, um den Effekt des über den gesamten Hallenboden reflektierten Lichts zu berücksichtigen. Zusätzlich zu den Leuchtdichtemessungen wurde entlang der horizontalen Linie- $RP_{25}$  die vertikale Beleuchtungsstärke kurz vor dem Messschirm gemessen (siehe Photometeraufbau in Abbildung 5.10).

Alle weiteren Messungen erfolgten ohne Blenden im Strahlengang. Zunächst wurden streifenweise die Reflexionseigenschaften des Hallenbodens modifiziert. Dies erfolgte durch zwei Meter breite Molton<sup>4</sup>-Streifen (vgl. Abbildung 5.8 und Abbildung 5.9). Der erhöhte diffuse Reflexionsanteil des Molton führt zu einer Reduzierung der Vorwärtsreflexion und einer damit verbundenen Reduzierung der am Messschirm messbaren Leuchtdichte. Dies soll Aufschluss geben, welcher Bereich im Vorfeld der Scheinwerferlichtverteilung besonders zu einer Reduzierung beiträgt.

Des Weiteren wurden jeweils die Bodenfliesen im Bereich der ermittelten Reflexpunkte flächendeckend mit Wasser benetzt. Die relevanten Bereiche wurden mit Hilfe des entwickelten

<sup>4</sup>Molton ist ein Gewebe, das meist zu 100% aus Baumwolle besteht. Häufiger Einsatzbereich: Veranstaltungstechnik und im Theater.



Abbildung 5.9: Modifikation der Reflexionseigenschaften mittels Molton-Streifen

Geometriemodells bestimmt. Damit das am Messschirm zu sehende Reflexbild der Bodenfliese (siehe Abbildung 5.10) in 50 m die gleiche Höhe wie in 25 m hat, ist an der Position  $RP_{50}$  die doppelte Länge in x-Richtung mit Wasser zu benetzen.

Die gezielte Beeinflussung der Reflexionseigenschaft soll aufzeigen, um welchen Faktor die Blendung aufgrund der Reflexblendung steigt und ob die mathematisch ermittelten Bereiche zur Auslegung des optischen Systems eines adaptiven blendfreien Abblendlichtes geeignet sind.

### 5.2.2 Ergebnisse

Abbildung 5.10 visualisiert die wesentlichen Unterschiede zwischen den analysierten Zuständen. Links ist die Messung mit Blenden im Strahlengang, gefolgt von der Messung ohne Blenden dargestellt. Rechts ist zuletzt die Messung mit der nassen Bodenfliese am Reflexpunkt Position  $RP_{25}$  zu sehen. Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass das Streulicht oberhalb der HDG stark erhöht ist. Mit Blenden werden oberhalb der HDG Leuchtdichten im Bereich  $0,1 \text{ cd/m}^2 - 0,3 \text{ cd/m}^2$  gemessen. Ohne Blenden steigt die Leuchtdichte auf  $\approx 0,8 \text{ cd/m}^2$ . Dies impliziert mehr als eine Verdopplung der messbaren Beleuchtungsstärke.

Die am Reflexpunkt Position  $RP_{25}$  flächendeckend mit Wasser benetzte Bodenfliese verstärkt diesen Effekt sichtbar. Mit einer mittleren Leuchtdichte von  $\approx 1,5 \text{ cd/m}^2$  sind am Messschirm deutlich die Reflexbilder der Bodenfliese zu erkennen (vgl. Abbildung 5.10, rechts). Im Vergleich zur Messung mit Blenden im Strahlengang bedeutet dies eine Erhöhung der Leuchtdichte um das Fünffache, wofür maßgeblich die am Reflexpunkt mit Wasser benetzte Bodenfliese verantwortlich ist. Die geometrische Höhe des auf den Messschirm projizierten Reflexes beträgt ca. 0,10 m. Diese Höhe wurde anhand einer Leuchtdichteschwelle ermittelt, die entsprechend der ohne Blenden im Strahlengang gemessenen Leuchtdichte zu  $0,8 \text{ cd/m}^2$  gewählt wurde. Wird die gemessene Höhe im entwickelten Geometriemodell als Parameter genutzt, resultiert auf der Fahr-



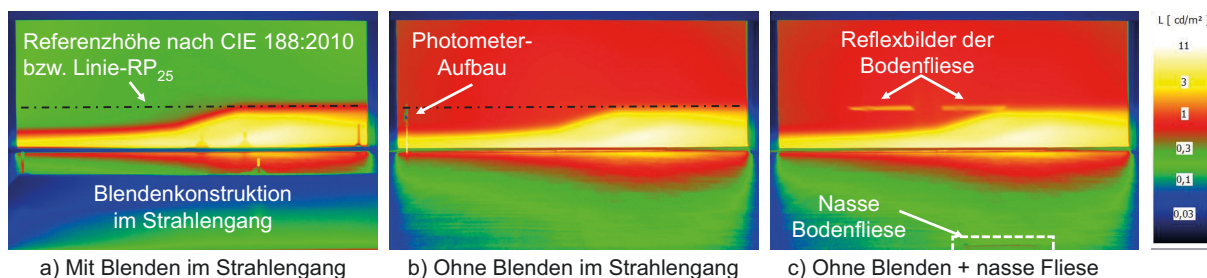


Abbildung 5.10: Gegenüberstellung der am Messschirm aufgenommenen Leuchtdichten (links: mit Blenden im Strahlengang; Mitte: ohne Blenden; rechts: ohne Blenden, mit nasser Bodenfliese; jeweils beide Scheinwerfer aktiv)

bahn ein Reflexbereich von 0,64 m longitudinaler Ausdehnung in einer Entfernung von 10,10 m bis 10,74 m, ausgehend vom Koordinatenursprung. Sowohl Ausdehnung als auch geometrische Lage entsprechen der benetzten Stelle. Zudem liegt der mathematisch berechnete Reflexpunkt in dem ermittelten Feld. Die am Reflexpunkt Position  $RP_{50}$  flächendeckend mit Wasser benetzte Bodenfliese bestätigt diesen Effekt. Wegen der bereits am Messschirm vorhandenen Abblendlichtverteilung ist der Effekt allerdings visuell kaum sichtbar.

Die gemessene Beleuchtungsstärke entlang der horizontalen Linie- $RP_{25}$ , in einer Höhe von 0,94 m, sowohl mit als auch ohne Blenden im Strahlengang, ist Abbildung 5.11 zu entnehmen. Aufgrund des über den Hallenboden reflektierten Lichtstroms ist die Blendbeleuchtungsstärke an den Messpunkten durchschnittlich um den Faktor 3,14 erhöht. Die ebenfalls in Abbildung 5.11 dargestellte Leuchtdichte entlang der horizontalen Linie- $RP_{25}$  ist um einen durchschnittlichen Faktor von 2,81 erhöht.

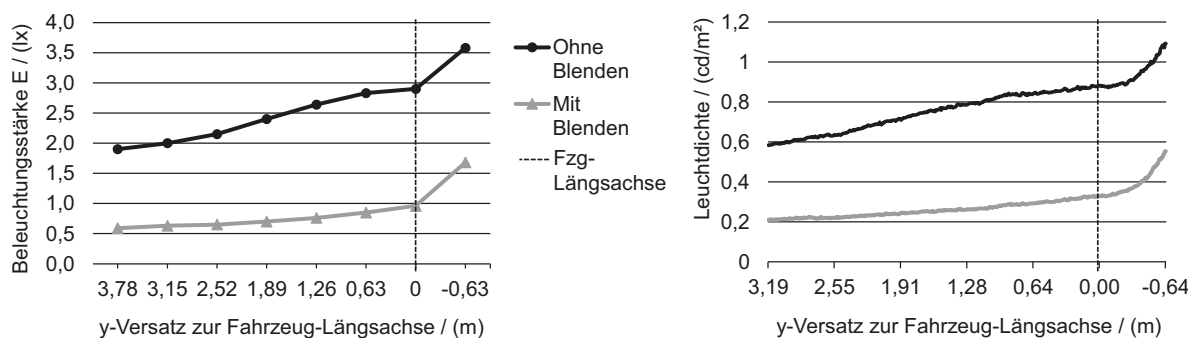


Abbildung 5.11: Gemessene Blendbeleuchtungsstärke (links) und Leuchtdichte (rechts) entlang der horizontalen Linie- $RP_{25}$  in einer Höhe von 0,94 m in 25 m Entfernung (Messwerte, siehe Tabelle B.4, Anhang B).

Abbildung 5.12 zeigt den Effekt der getesteten Modifikation der Reflexionseigenschaften durch das Aufbringen der Molton-Streifen. Bei Linie- $RP_{25}$  wird die mittlere Leuchtdichte vorrangig durch die Zonen 7 bis 9 beeinflusst. Darüber hinaus hat Zone 4 einen erhöhten Einfluss. In dieser Zone befindet sich der zugehörige Reflexpunkt. Bei Linie- $RP_{50}$  wird die mittlere Leuchtdichte



vorrangig durch die Zonen 9 und 10 beeinflusst. Der zugehörige Reflexpunkt liegt hier in Zone 9. Allerdings weist auch Zone 4 einen erhöhten Effekt auf. Es ist daher nicht auszuschließen, dass dieser Effekt auf einen systematischen Messfehler zurückzuführen ist. Anhand der eingefügten Trendlinien und deren Steigung ist zu erkennen, dass bei Linie-RP<sub>50</sub> Zonen, die näher am Messschirm liegen, einen größeren Effekt auf die mittlere Leuchtdichte haben als bei Linie-RP<sub>25</sub>. Unabhängig davon haben alle Zonen einen Einfluss auf die messbare mittlere Leuchtdichte und sind daher bei der Auslegung eines adaptiven blendfreien Abblendlichtes zu berücksichtigen.

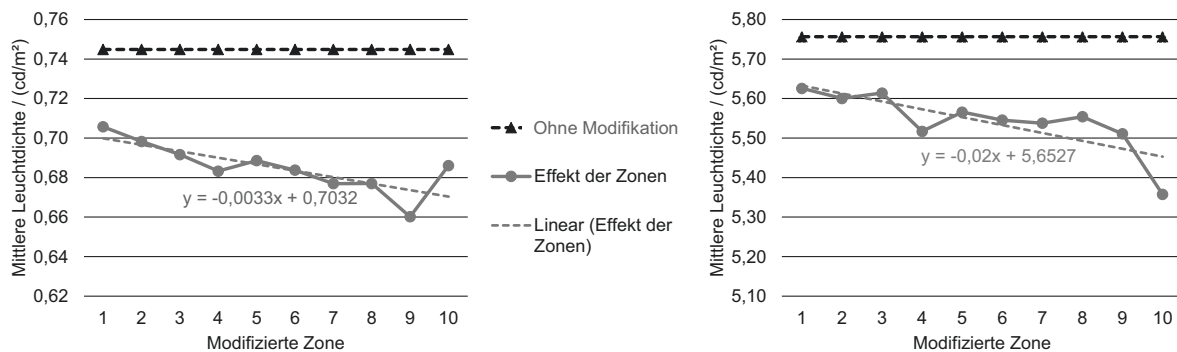


Abbildung 5.12: Gemessene Leuchtdichte entlang der horizontalen Linie-RP<sub>25</sub> (links) und der horizontalen Linie-RP<sub>50</sub> (rechts) in Abhängigkeit der modifizierten Zone

### 5.2.3 Fazit

Der in verschiedenen Studien untersuchte Einfluss der Reflexblendung (u.a. [Dam95], [Ros00], [SCS01]) wurde anhand des zuvor beschriebenen Versuchs unter wiederholbaren Bedingungen verifiziert. Die Reflexion der Vorfeldausleuchtung beeinflusst das Streulicht oberhalb der HDG stark (siehe Abbildung 5.10). Dies wiederum führt dazu, dass der vorgeschriebene Grenzwert der Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L grundsätzlich überschritten wird (vgl. [Mat10], [SCS01]). Folglich sind technische Lösungen zu suchen, die diesen Effekt unterbinden (u.a. [Fis15]). Hierzu soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten.

Der Effekt der mit Wasser benetzten Bodenfliese bestätigt die zu Beginn aufgestellte Hypothese. Das entwickelte Geometriemodell (siehe auch Kapitel 7.1) ist geeignet, um geometrische Anforderungen an ein adaptives blendfreies Abblendlicht für spiegelnde Fahrbahnoberflächen abzuleiten.

Der Vergleich der gemessenen Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte entlang der horizontalen Linie-RP<sub>25</sub> (siehe Abbildung 5.11) verifiziert, dass die am Messschirm gemessene Leuchtdichte geeignet ist, um auf die relative Erhöhung der Blendbeleuchtungsstärke zu schließen. Abweichungen sind darauf zurückzuführen, dass die Beleuchtungsstärke nicht direkt am Messschirm, sondern kurz vor dem Messschirm in der gleichen Höhe gemessen wurde.

Ebenfalls wurde nachgewiesen, dass die Modifikation definierter Zonen des Vorfeldes der Scheinwerferlichtverteilung einen Effekt auf die messbare Leuchtdichte hat. Dabei zeigt sich, dass bei Linie-RP<sub>25</sub> die modifizierte Zone mit dem größten Effekt nur bedingt mit dem Bereich des mathematischen Modells übereinstimmt. Die Blendbeleuchtungsstärke in 50 m würde dadurch, wenn überhaupt, nur gering beeinflusst werden. Dies ist auf den flachen Winkel zurückzuführen, unter dem der reflektierte Lichtstrom aus den Zonen 8 bis 10 auf den Messschirm bei Linie-RP<sub>25</sub> auftrifft (vgl. Abbildung 5.8). Bei Linie-RP<sub>50</sub> ist zutreffend, dass speziell die Zonen vor dem Messschirm einen Einfluss auf die messbare Leuchtdichte haben. Dies stimmt mit dem Bereich des mathematischen Modells überein. Die Steigungen der ermittelten Trendlinien (siehe Abbildung 5.12) machen deutlich, dass mit steigender Messhöhe (Linie-RP<sub>50</sub> → Linie-RP<sub>25</sub>) der Bereich des größten Einflusses auf die messbare Leuchtdichte in Richtung Blendquelle, bzw. Scheinwerfer wandert.

Zusammenfassend liefert die vorgestellte Methode einen ersten Ansatz, um verschiedene Systeme bzw. deren Lichtverteilung hinsichtlich des Effekts der Reflexblendung unter wiederholbaren Bedingungen zu bewerten. So lange der Faktor der Blendungserhöhung oberhalb der HDG ermittelt wird (siehe Abbildung 5.8, Linie-RP<sub>25</sub>), kann daraus ein Faktor abgeleitet werden, der zum Vergleich verschiedener Scheinwerfer dient. Die zusätzliche horizontale Linie-RP<sub>50</sub> in 0,135 m Höhe ist allerdings nur bedingt geeignet, um einen direkten Rückschluss auf die in 50 m resultierende Blendung ziehen zu können. In einer Messhöhe unterhalb der HDG ist lediglich eine Bewertung der absoluten Erhöhung der Leuchtdichte zulässig. Das zuvor reflektierte Licht überlagert sich in diesen Höhen mit dem direkten Scheinwerferlicht, das erst in größeren Entfernungen auf den Asphalt trifft. Ein relativer Vergleich der Erhöhung ist daher unzulässig.

Im nächsten Schritt wird die Wechselwirkung zwischen Anbauhöhe und der jeweils modifizierten Zone untersucht.

### 5.3 Anbauhöhe des Scheinwerfers

In Kapitel 5.1 und 5.2 wurde der Einfluss geänderter *Umgebungsbedingungen* näher beleuchtet. Nachfolgend wird auf den Einfluss des *Fahrzeuges* (vgl. Tabelle 4.1, S. 43) eingegangen und der Effekt einer geänderten Scheinwerferanbauhöhe auf die direkte und speziell die indirekte Blendung analysiert. Neben der Variation der Anbauhöhe werden zusätzlich die Reflexionseigenschaften definierter Zonen des Untergrunds modifiziert (vgl. Kapitel 5.2), um die Wechselwirkung zwischen Anbauhöhe und modifizierter Zone zu prüfen. Ziel dabei ist die Überprüfung der nachfolgenden Hypothese:

- *In Abhängigkeit der Scheinwerferanbauhöhe sind unterschiedliche Zonen des Abblendlichtes zu maskieren, da sich der Reflexpunkt aufgrund der geometrischen Bedingungen in longitudinaler Richtung verschiebt.*
-

### 5.3.1 Methodik

Der in seiner Anbauhöhe variable Scheinwerfer wurde in 25 m Entfernung orthogonal zum Messschirm ausgerichtet. Als Referenzscheinwerfer kam das Halogen-Reflexionssystem des ‐Trabant nT‐ zum Einsatz (vgl. Kapitel 5.1). Alle Messungen wurden gemäß ECE spannungsgeregelt bei einer Versorgungsspannung von 13,2 V durchgeführt [ECE112]. Um lediglich den Effekt einer unabhängigen Variable zu untersuchen, wurde der Scheinwerfer konstant bei  $-1\%$  Neigungswinkel belassen - was bei Anbauhöhen  $\leq 1000$  mm zulässig ist - und nur die Anbauhöhe variiert.

Insgesamt wurden drei Anbauhöhen: 0,53 m, 0,65 m und 0,82 m analysiert und die Reflexionseigenschaften von acht Zonen variiert. Der Messaufbau und die definierten Zonen sind in Abbildung 5.13 zu sehen. Die mittlere Anbauhöhe stellt dabei eine durchschnittliche Referenz-Anbauhöhe von Kfz-Scheinwerfern dar. Auf diese Anbauhöhe wurde der Messpunkt B50L referenziert und bei den anderen beiden Anbauhöhen in dieser Höhe belassen.

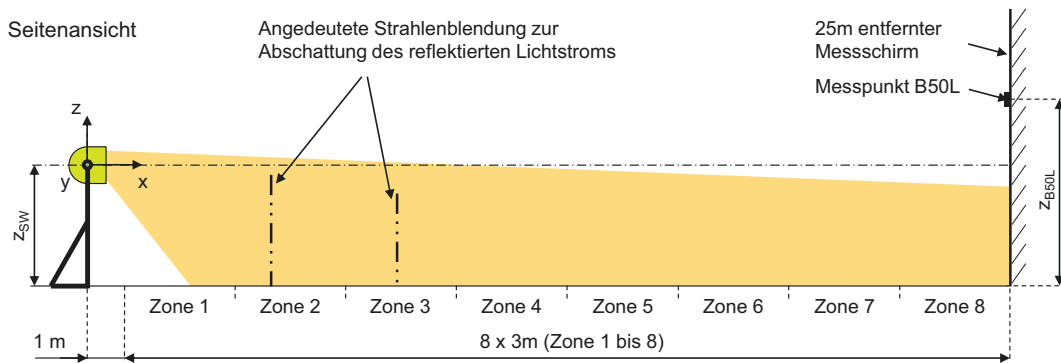


Abbildung 5.13: Messaufbau zur Bewertung der Wechselwirkung aus Scheinwerferanbauhöhe  $z_{SW}$  und Reflexionseigenschaft des Untergrunds (Zonen) auf die messbare Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L

Der Messablauf gestaltete sich wie folgt: Zunächst wurde bei jeder Anbauhöhe eine Referenzmessung durchgeführt, um die gesamte Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L zu erfassen. Bei der Referenz-Anbauhöhe von 0,65 m wurde zusätzlich eine Messung mit Blenden im Strahlengang (vgl. Abbildung 5.13) durchgeführt, um lediglich den direkten Blendanteil zu ermitteln. Anschließend wurde ein Molton-Streifen in den Zonen ausgelegt, um die Reflexionseigenschaften des Untergrunds streifenweise zu verändern (vgl. Kapitel 5.2). Zu jeder Zone wurde die Blendbeleuchtungsstärke am Messpunkt B50L erfasst und eine Leuchtdichteaufnahme des Messschirms aufgenommen. Anhand der Leuchtdichteaufnahmen wird der Effekt visuell überprüft. Die zu erwartende Reduzierung der messbaren Blendbeleuchtungsstärke durch die Modifikation der Reflexionseigenschaften soll Aufschluss über die Zonen geben, die in Abhängigkeit der Scheinwerferanbauhöhe zu maskieren sind. Zudem soll aufgezeigt werden, ob die messtechnisch relevanten Zonen mit denen des selbst entwickelten Geometriemodells (siehe Kapitel 7.1) übereinstimmen.

Zusätzlich wurde die Lichtstärkeverteilung des “Trabant nT“-Scheinwerfers (siehe Abbildung B.3, Anhang B) simulativ auf die direkte Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Anbauhöhe getestet. Die simulative Analyse wurde durchgeführt, da bei den Messungen innerhalb der Licht- und Fahrerassistenz-Halle die direkte Blendbeleuchtungsstärke nur für die Anbauhöhe von 0,65 m erfasst wurde. Anhand dieser Analyse soll aufgezeigt werden, ob die Anbauhöhe einen stärkeren Effekt auf die direkte oder indirekte Blendbeleuchtungsstärke hat. Eine Änderung der Anbauhöhe bedeutet eine translatorische Verschiebung des Scheinwerfers in z-Richtung. Bei einer höheren Scheinwerferanbauhöhe liegt der Messpunkt B50L folglich näher an der HDG und umgekehrt. Anstelle der translatorischen Verschiebung wurde der Scheinwerfer simulativ um die y-Achse rotiert (vgl. Abbildung 5.13). Tabelle 5.1 enthält die eingestellten Winkel.

Tabelle 5.1: Parameter zur simulativen Analyse des Effekts der Scheinwerferanbauhöhe auf die direkte Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L

Mess-entfernung (m)	Referenz-anbauhöhe (m)	Vergleichs-anbauhöhe (m)	Translatorische Anpassung in z (m)	Rotatorische Anpassung um y (°)
25	0,65	0,53	(-) 0,12	(+) 0,28
		0,82	(+) 0,17	(-) 0,38

### 5.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der drei getesteten Anbauhöhen sind in Abbildung 5.14 zusammengefasst. Bei der Referenzanbauhöhe von 0,65 m wurde eine direkte Blendbeleuchtungsstärke von 0,41 lx ermittelt. Die gesamte Blendbeleuchtungsstärke beträgt 2,02 lx. Mit steigender Anbauhöhe wird am konstant gehaltenen Punkt B50L eine höhere Blendbeleuchtungsstärke gemessen.

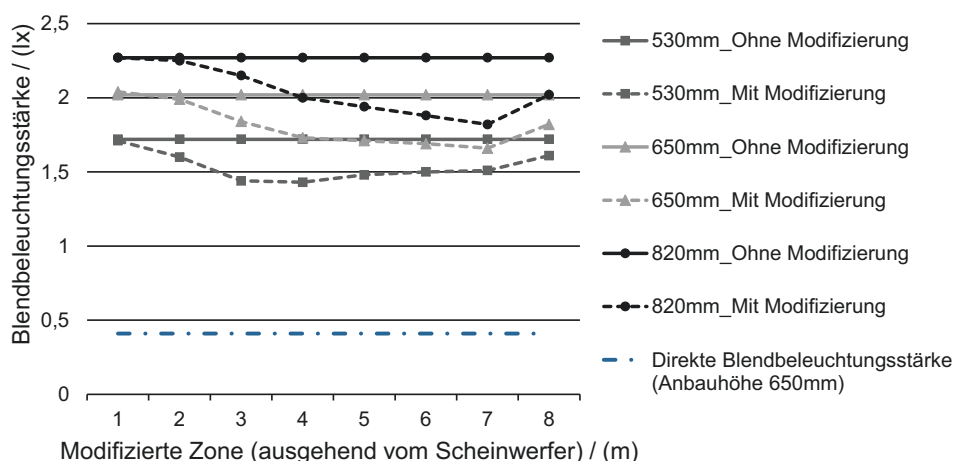


Abbildung 5.14: Effekt der Wechselwirkung aus Scheinwerferanbauhöhe und Modifikation der jeweiligen Zone auf die messbare Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L bei unterschiedlichen Anbauhöhen (Messwerte, siehe Tabelle B.6, Anhang B)

Abbildung 5.14 verdeutlicht, dass die relevante Zone zur maximalen Reduzierung der Blendbeleuchtungsstärke mit zunehmender Scheinwerferanbauhöhe in Richtung Messschirm wandert. Die erzielbare Reduzierung durch die einzelnen Zonen beträgt dabei zwischen 16,9% - 19,8%. Die Summe aller Zonen würde eine Reduzierung von 80% (bei 0,82 m) bis zu 86% (bei 0,53 m) der messbaren Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L ermöglichen. Alle ermittelten Werte sind der Tabelle B.6 im Anhang B zu entnehmen.

Tabelle 5.2 enthält die Ergebnisse der simulativen Analyse des LVK. Mit zunehmender Anbauhöhe steigt die direkte Blendbeleuchtungsstärke am konstant gehaltenen Punkt B50L.

Tabelle 5.2: Direkte Blendbeleuchtungsstärken am Punkt B50L in Abhängigkeit der Scheinwerferanbauhöhe der simulativen Analyse

LVK	Mess-entfernung (m)	Scheinwerfer-anbauhöhe (m)	Messposition (°)		Beleuchtungs-stärke (lx)
			horizontal	vertikal	
Trabant nT	25	0,53	-3,4	0,85	0,33
		0,65		0,57	0,34
		0,82		0,19	0,43

In Abbildung 5.15 ist der Effekt der Anbauhöhe auf die direkte und die gesamte Blendbeleuchtungsstärke dargestellt. Es zeigt sich, dass die gesamte Blendbeleuchtungsstärke mit zunehmender Anbauhöhe einen stärkeren Anstieg aufweist als die direkte Blendbeleuchtungsstärke. Dies verdeutlichen die in Abbildung 5.15 enthaltenen Geradengleichungen. Die Steigung der Geradengleichung der gesamten Blendbeleuchtungsstärke ist größer als die der direkten Blendbeleuchtungsstärke. Folglich hat die Anbauhöhe bei konstanter Messentfernung einen stärkeren Effekt auf die indirekte als auf die direkte Blendbeleuchtungsstärke.

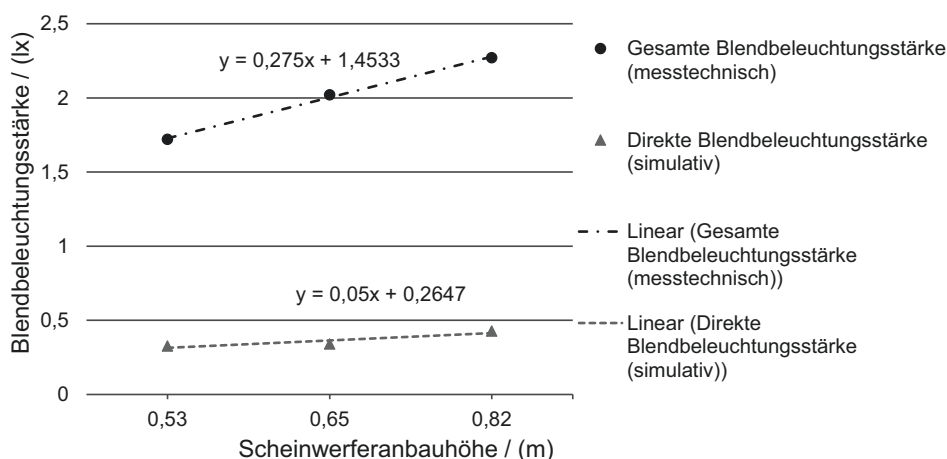


Abbildung 5.15: Effekt der Scheinwerferanbauhöhe auf die direkte und gesamte Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L

Alle ermittelten Werte der direkten Blendbeleuchtungsstärke sind  $< 0,45$  lx. Die Messwerte der gesamten Blendbeleuchtungsstärke am Messpunkt B50L sind hingegen alle  $> 1,70$  lx. Dies verdeutlicht ebenfalls den starken Effekt der indirekten Blendung.

### 5.3.3 Fazit

Die Untersuchung bestätigt, dass in Abhängigkeit der Scheinwerferanbauhöhe unterschiedliche Bereiche des Abblendlichtes zu maskieren sind. Mit steigender Anbauhöhe verschiebt sich die relevante Zone in größere Entfernungen.

Das entwickelte Geometriemodell ermöglicht eine Vorhersage der zu maskierenden Zonen. Für die Anbauhöhe von 0,53 m stimmen die berechnete und die messtechnisch ermittelte Entfernung überein. Bei den anderen beiden Anbauhöhen liegen die mathematisch ermittelten Entfernungen näher beim Scheinwerfer als die messtechnisch erfassten (siehe Abbildung B.4, Anhang B). An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Bodenfliesen der Licht- und Fahrerassistenz-Halle keine rein gerichtete Reflexion aufweisen. Eine rein gerichtete Reflexion resultierte erst durch das Aufbringen eines flächendeckenden Wasserfilms auf die Bodenfliese (vgl. Abbildung 5.10, S. 68). Das entwickelte Geometriemodell basiert allerdings auf der Annahme einer gerichteten Reflexion und ermittelt die Entfernung anhand  $\epsilon_i = \epsilon_o$ . Daher werden die Abweichungen bei höheren Anbauhöhen zunächst auf die Reflexionseigenschaften des Hallenbodens und den ungewollten Einfluss des Messschirms zurückgeführt. Aufgrund des lambertschen Reflexionsverhaltens reflektiert der Messschirm Licht in alle Richtungen, das anschließend erneut über den Boden an den Schirm reflektiert wird. Gerade bei höheren Anbauhöhen könnte dieser Effekt zum Tragen kommen, da ein größerer Anteil des Lichtstroms auf den Messschirm trifft und wieder reflektiert wird.

Des Weiteren wurde ermittelt, dass der indirekte Blendanteil mit steigender Anbauhöhe einen größeren Effekt auf die Blendbeleuchtungsstärke hat als der direkte Blendanteil. Dies gilt zunächst für identische Neigungswinkel und den Scheinwerfer, der innerhalb der Referenzumgebung untersucht wurde. Es bleibt zu prüfen, welchen Effekt ein geänderter Scheinwerferneigungswinkel auf die Blendbeleuchtungsstärke hat. Zudem bleibt ungeklärt, ob niedrigere Anbauhöhen aufgrund der höheren Beleuchtungsstärken auf der Fahrbahn zu einer erhöhten psychologischen Blendung führen würden.

In Anbetracht der Tatsache, dass bei der Referenzanbauhöhe von 0,65 m zwischen direkter und gesamter Blendbeleuchtungsstärke ein Faktor von 5 ermittelt wurde (siehe Abbildung 5.14), bei den Untersuchungen aus Kapitel 5.2 allerdings nur ein Faktor von 3, liegt die Vermutung nahe, dass der Unterschied auf die Lichtverteilung des Scheinwerfers zurückzuführen ist. Folglich ist davon auszugehen, dass Scheinwerfer trotz Gesetzeskonformität im Straßenverkehr bei spiegelnden Fahrbahnoberflächen stark unterschiedliche Blendbeleuchtungsstärken verursachen. Dies ist genauer zu untersuchen.

Abschließend bleibt zu sagen, dass eine Bewertung der Blendung nicht nur anhand der direkten Blendbeleuchtungsstärke erfolgen sollte. Die indirekte Blendbeleuchtungsstärke nimmt bei nasser

---



Fahrbahn einen weit größeren Anteil an der Gesamtblendung ein. Aus diesem Grund empfiehlt sich eine Bewertung des Verhältnisses von direkter zu indirekter Blendbeleuchtungsstärke (siehe Kapitel 7.4).

## 5.4 Reflexblendung - im Passiervorgang

Aufgrund der hohen Dynamik im Straßenverkehr tragen im Passiervorgang stets andere Bereiche der Scheinwerferlichtverteilung zur Reflexblendung bei. Im Falle einer regennassen Fahrbahn, bei der das Licht überwiegend gerichtet reflektiert wird, lassen sich diese Bereiche eingrenzen. Die Reflexblendung wird hierbei vorrangig durch das Licht verursacht, das entlang der Reflexlinien, die sich zwischen Scheinwerfer und Beobachter auf der Fahrbahn ausbilden, reflektiert wird. Die Reflexlinien werden im Jargon auch als "Blendkeulen" bezeichnet. Abbildung 5.16 zeigt schematisch einige Reflexlinien in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung.

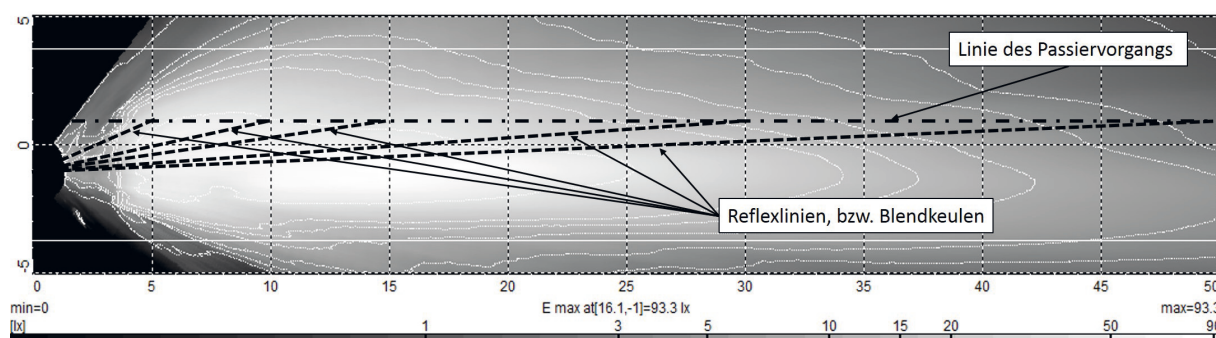


Abbildung 5.16: Straßenszene aus Vogelperspektive (bird's eye view) zur schematischen Darstellung der Reflexlinien, die sich zwischen Scheinwerfer und Beobachter auf der Fahrbahn ausbilden (sog. "Blendkeulen")

Neben der direkten Blendbeleuchtungsstärke sind die Reflexlinien maßgeblich für die resultierende Blendbeleuchtungsstärke verantwortlich. Da sich Abblendlichtverteilungen trotz gesetzlicher Vorschriften unterscheiden, prüft die nachfolgende Untersuchung folgende Hypothese:

- *In Abhängigkeit der Begegnungsentfernung verursachen heutige Serienscheinwerfer unterschiedliche Beleuchtungsstärken entlang der Reflexlinien, die auf die jeweilige systembedingte Lichtverteilung zurückzuführen sind.*

### 5.4.1 Methodik

Zum Vergleich heutiger Serienscheinwerfer wurden die Lichtverteilungen eines Halogen-, Xenon- und LED-Scheinwerfers analysiert. Alle Scheinwerfer entstammen ein und demselben Fahrzeug. Daher wurde eine einheitliche Scheinwerferanbauhöhe von 0,65 m gewählt. Die resultierenden Beleuchtungsstärkeverteilungen auf Fahrbahnhöhe sind in Abbildung B.6 im Anhang B zu sehen.

Tabelle 5.3 liefert eine Übersicht der untersuchten Blendwinkel mit den zugehörigen Begegnungsdistanzen und weiteren geometrischen Bedingungen. Die Blendwinkel wurden unter Berücksichtigung der begrenzten Messgeometrie gewählt, die bei den Leuchtdichtemessungen innerhalb der Licht- und Fahrerassistenz-Halle von IAV zur Verfügung stand. Die genannten Blendwinkel entsprechen unter den getroffenen Annahmen einem Passiervorgang von 57,30 m bis 19,04 m und beinhalten somit die relevante Blendentfernung von 50 m [CIE10].

Tabelle 5.3: Parameter zur Analyse der Reflexlinien im Passiervorgang innerhalb einer Referenzumgebung mit begrenzter Messentfernung (Annahme: Lateraler Versatz zwischen Scheinwerfer und Auge = 2,0 m; konstante Messentfernung = 30 m)

Nr.:	Blendwinkel / (°)	Begegnungsdistanz (m)	Resultierende Länge der Verbindungslinie (m)	Abstand Reflexpunkt RP vom Ursprung (m)	Spiegelwinkel ( $\epsilon_i = \epsilon_o$ ) / (°)	Höhe der LMK - Fahrerperspektive $z_{LMK}$ (m)	Höhe der LMK - Perspektive des Gegenverkehrs $z_{LMK,1} \dots z_{LMK,10}$ (m)
1	2	57,30	57,34	20,15	1,85	1,20	0,32
2	2,5	45,83	45,87	16,12	2,31		0,56
3	3	38,18	38,23	13,43	2,77		0,80
4	3,5	32,72	32,78	11,52	3,23		1,04
5	0	$\infty$	$\infty$	-	-		1,20
6	4	28,62	28,69	10,08	3,69		1,28
7	4,5	25,43	25,50	8,96	4,15		1,53
8	5	22,87	22,96	8,07	4,61		1,77
9	5,5	20,78	20,88	7,34	5,07		2,01
10	6	19,04	19,14	6,73	5,52		2,25

Zunächst wurden die Reflexlinien (vgl. Abbildung 5.16) hinsichtlich der radialen Beleuchtungsstärke analysiert. Dies erfolgte unter Einsatz der Lichtsimulationssoftware LucidShape. Als lateraler Abstand zwischen dem Scheinwerfer und den Augen eines entgegenkommenden Verkehrsteilnehmers wurde ein Versatz von 2,0 m angenommen.

Bei den Leuchtdichtemessungen wurden die Reflexlinien aus Fahrerperspektive und der Perspektive des Gegenverkehrs analysiert. Dies veranschaulicht der in Abbildung 5.17 dargestellte Messaufbau.

Zur Nachbildung der Blendwinkel waren die Scheinwerfer auf einem Drehteller aufgebracht und konnten rotatorisch um ihre z-Achse gedreht werden (siehe Abbildung 5.17). Die optische Achse des Objektivs der LMK wurde in einer Ebene mit der optischen Achse des Scheinwerfers positioniert ( $\delta = 0^\circ$  für die Fahrerperspektive, bzw.  $180^\circ$  für die Perspektive des Gegenverkehrs). Als Beobachterhöhe  $z_{LMK}$  wurde für die Fahrerperspektive eine Höhe von 1,2 m gewählt. Im Falle des Gegenverkehrs wurde die Beobachterhöhe aufgrund der begrenzten Messentfernung von  $x_{ME} = 30$  m variiert (siehe Tabelle 5.3). Der Beobachtungswinkel der LMK wurde dabei jeweils auf den mathematisch ermittelten Reflexpunkt ( $x_1$  bis  $x_{10}$ ) ausgerichtet. Diese Vorgehensweise ermöglicht trotz konstanter Messentfernung die Nachstellung der im Passiervorgang auftretenden geometrischen Bedingungen.

Um zusätzlich den Einfluss geänderter Reflexionseigenschaften der Fahrbahn zu berücksichtigen, wurde Molton ausgelegt, um eine Art „trockene“ Fahrbahndeckschicht mit erhöhtem diffu-



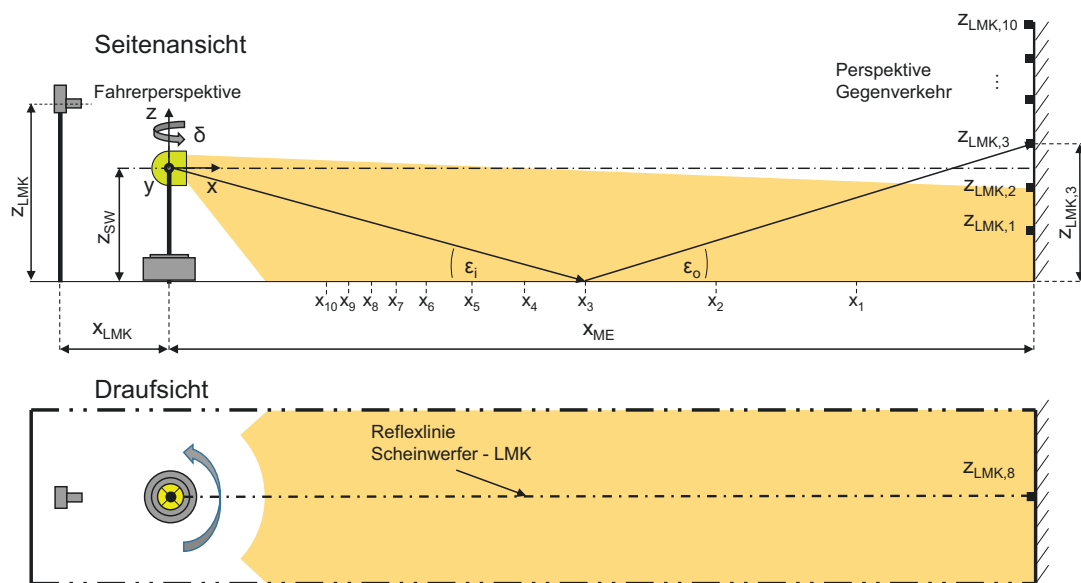


Abbildung 5.17: Messaufbau zur Analyse der Reflexblendung im Passiervorgang bei konstanter Messentfernung  $x_{ME}$

sen Reflexionsanteil zu simulieren. Als Art „nasse“ Fahrbahn dient die in der Halle ausgelegte Bodenfliese, die einen erhöhten gerichteten Reflexionsanteil aufweist.

Zur Bewertung des Effekts geänderter Reflexionseigenschaften wurde die Leuchtdichte entlang der in Abbildung 5.17 dargestellten Reflexlinie „Scheinwerfer-LMK“ betrachtet. Aus der Perspektive des Gegenverkehrs resultieren aufgrund der zuvor genannten Änderungen die in Abbildung 5.18 gegenübergestellten Situationen.



Abbildung 5.18: Erscheinungsbild der „Blendkeulen“ bei geänderten Reflexionseigenschaften der Fahrbahndeckschicht (li. Bodenfliese, re. Molton) (vgl. [BMK<sup>+</sup>13])

Zusätzlich zu den Leuchtdichtemessungen wurde bei dem Xenon-Scheinwerfer die vertikale Beleuchtungsstärke entlang der Reflexlinie bei  $\delta = 0^\circ$  in zwei Meter Abständen gemessen. Für die Messung wurde eine spezielle Photometerhalterung entwickelt, in die der Photometerkopf gelegt wird (siehe Abbildung B.5, Anhang B). Das über den Boden reflektierte Licht wird von

der Halterung abgeschattet und folglich nur die direkte, vertikale Beleuchtungsstärke  $E_v$  gemessen. Der Vergleich soll aufzeigen, inwieweit die gemessenen Beleuchtungsstärken mit denen aus der Analyse mit der Lichtsimulationssoftware übereinstimmen und ob daher letztgenannte für weiterführende Auswertungen in Verbindung mit den Leuchtdichtemessungen zulässig sind.

### 5.4.2 Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse werden entsprechend der zuvor beschriebenen Methodik zweigeteilt angeführt. Zunächst wird auf die Beleuchtungsstärke eingegangen. Anschließend werden die Ergebnisse der Leuchtdichtemessungen dargestellt.

#### Beleuchtungsstärke

Abbildung 5.19 zeigt die radiale Beleuchtungsstärke entlang der Reflexlinien. Die Diagramme sind zudem vergrößert in Abbildung B.7, Anhang B dargestellt.

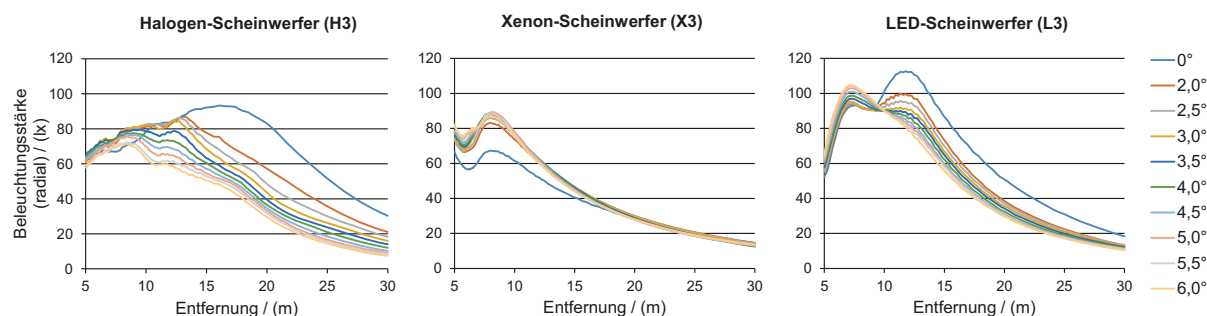


Abbildung 5.19: Radiale Beleuchtungsstärke entlang der Reflexlinien auf Höhe der Fahrbahn-deckschicht in Abhängigkeit des Blendwinkels für den jeweiligen Scheinwerfer

Systembedingt resultieren für die Beleuchtungsstärke unterschiedliche Verläufe (siehe Abbildung 5.19). Beim Halogen-Scheinwerfer nimmt die maximale Beleuchtungsstärke mit zunehmendem Blendwinkel ab und verschiebt sich zu kürzeren Distanzen. Beim Xenon-Scheinwerfer nimmt die maximale Beleuchtungsstärke mit zunehmendem Blendwinkel hingegen zu und befindet sich konstant in einer Entfernung von  $\approx 8$  m. Die Besonderheit beim Xenon-Scheinwerfer ist, dass die Verläufe der Beleuchtungsstärke ab einer Entfernung  $> 20$  m nahezu kongruent sind. Der LED-Scheinwerfer ist ähnlich dem Halogenscheinwerfer. Beim LED-Scheinwerfer steigt die maximale Beleuchtungsstärke mit zunehmendem Blendwinkel allerdings erneut an. Im wesentlichen unterscheiden sich die Reflexlinien der Scheinwerfer hinsichtlich der maximalen Beleuchtungsstärke, der Lage des Maximums sowie des Verlaufs in Abhängigkeit des getesteten Blendwinkels. Aus diesem Grund empfiehlt sich ein direkter Vergleich der Blendkeulen eines Blendwinkels.

In Abbildung 5.20 ist ein direkter Vergleich der Reflexlinie bei dem Blendwinkel  $\Theta$  von  $6^\circ$  zu sehen. Sowohl der Halogen-Scheinwerfer als auch der Xenon-Scheinwerfer weisen hier Maximalwerte  $< 100$  lx auf. Der LED-Scheinwerfer weist hingegen einen Maximalwert von knapp 105 lx

auf und verursacht entlang der Reflexlinie im Bereich 5 m - 20 m insgesamt höhere Beleuchtungsstärken.

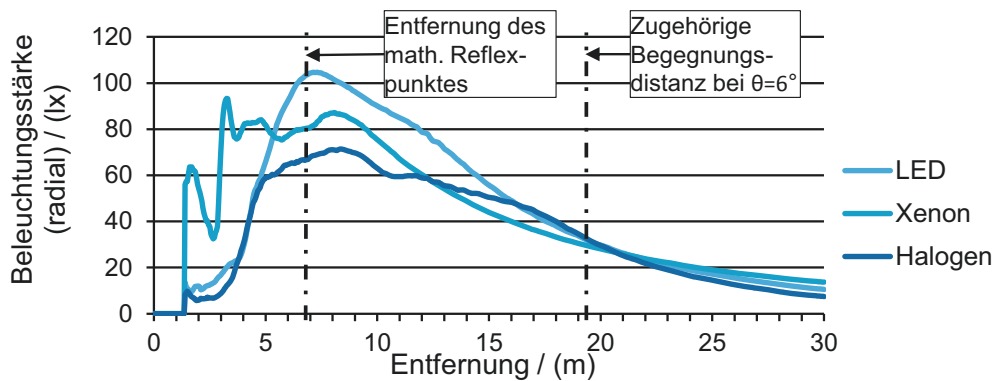


Abbildung 5.20: Radiale Beleuchtungsstärken entlang der Reflexlinien bei  $\Theta = 6^\circ$  in Abhängigkeit des Scheinwerfersystems

Abbildung 5.21 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs der Beleuchtungsstärken aus Simulation und Messung. Die Abweichungen sind  $< 10\%$  und sowohl auf systematische als auch zufällige Fehler zurückzuführen. Aufgrund der Höhe des Photometerkopfes wird nicht direkt am eigentlichen Messpunkt gemessen, sondern näher zum Scheinwerfer. Aus diesem Grund ist beim Einsatz der Photometerhalterung und der gewählten Messgeometrie ein Korrekturfaktor<sup>5</sup> von 1,099 zu berücksichtigen, um den der Messwert den tatsächlichen Wert am Messpunkt übersteigt. Zudem ist zu berücksichtigen, dass nur die vertikale Beleuchtungsstärke und nicht die radiale gemessen wird. Mit zunehmender Messentfernung ist der dadurch entstehende Cosinus-Fehler allerdings vernachlässigbar. Die Ergebnisse zeigen, dass die radiale Beleuchtungsstärke der Simulation für weiterführende Auswertungen in Verbindung mit den Leuchtdichtemessungen genutzt werden kann.

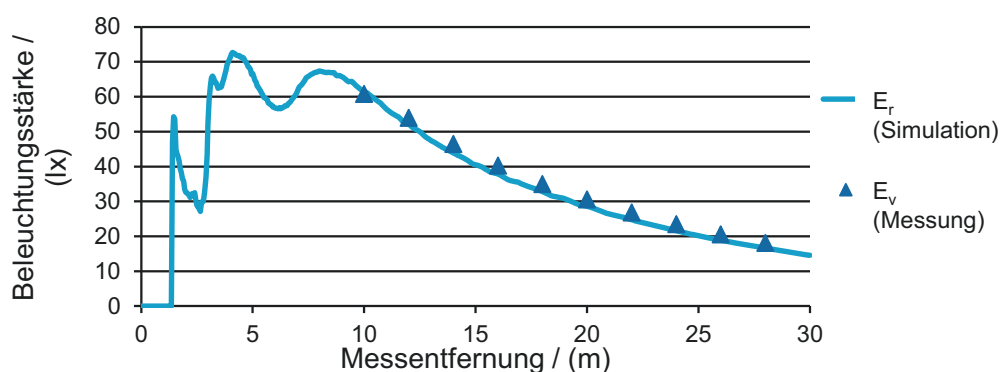


Abbildung 5.21: Vertikale  $E_v$  und radiale Beleuchtungsstärke  $E_r$  bei  $\Theta = 0^\circ$  am Beispiel des Xenon-Scheinwerfers (Messwerte, siehe Tabelle B.7, Anhang B)

<sup>5</sup>Der erforderliche Faktor wurde mit Hilfe des photometrischen Entfernungsgesetzes  $E = I/r^2$  ermittelt, in dem die Lichtstärke  $I(cd)$  für beide Messentfernungen gleichgesetzt und nach der Beleuchtungsstärke  $E(lx)$  am eigentlichen Messpunkt auf Fahrbahnhöhe aufgelöst wurde:  $E_1 = E_2 * (r_2^2/r_1^2)$

## Leuchtdichte

Die Ergebnisse der Leuchtdichtemessungen werden nachfolgend entsprechend der analysierten Beobachterpositionen in Fahrerperspektive und Perspektive des Gegenverkehrs untergliedert.

### Fahrerperspektive

Abbildung 5.22 zeigt die auf dem Hallenboden gemessene Leuchtdichte entlang der Reflexlinie „Scheinwerfer-LMK“ (vgl. Abbildung 5.17) für alle getesteten Blendwinkel. Wie bereits bei den Beleuchtungsstärken sind auch hier die systembedingten Unterschiede zu erkennen.

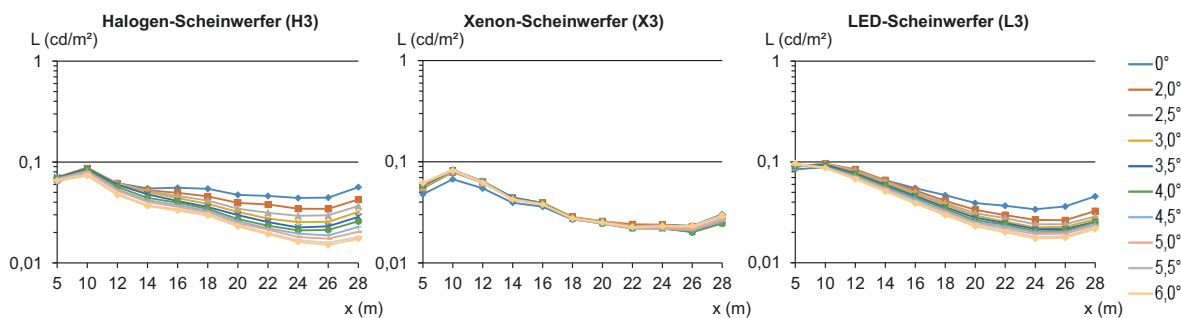


Abbildung 5.22: Leuchtdichte entlang der Reflexlinie „Scheinwerfer-LMK“ in Abhängigkeit des Blendwinkels  $\Theta$  für den jeweiligen Scheinwerfer (Untergrund: Bodenfliese)

Abbildung 5.23 zeigt zum Vergleich die auf dem Molton gemessene Leuchtdichte entlang der Reflexlinie „Scheinwerfer-LMK“ (vgl. Abbildung 5.17) für alle getesteten Blendwinkel. Die Diagramme sind zudem vergrößert in Abbildung B.8, Anhang B dargestellt.

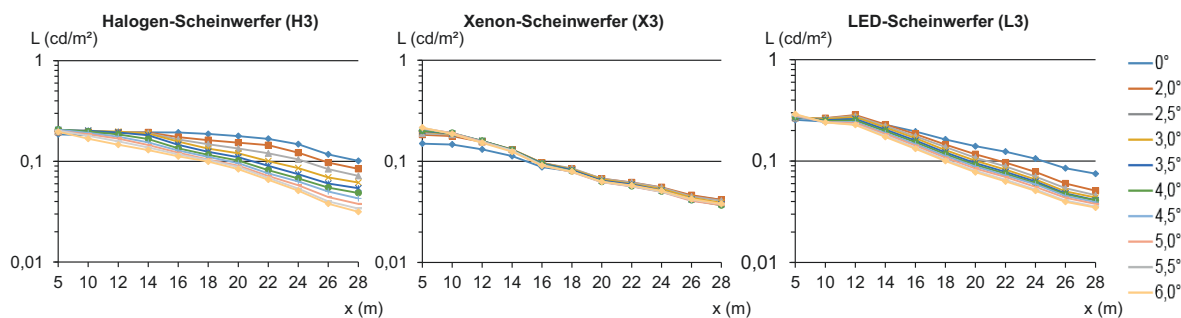


Abbildung 5.23: Leuchtdichte entlang der Reflexlinie „Scheinwerfer-LMK“ in Abhängigkeit des Blendwinkels  $\Theta$  für den jeweiligen Scheinwerfer (Untergrund: Molton)

Die geänderten Reflexionseigenschaften durch den ausgelegten Molton (vgl. Abbildung 5.23 mit Abbildung 5.22) führen zu einer durchschnittlichen Erhöhung der Leuchtdichte entlang der Reflexlinien um den Faktor 2,8. Am größten ist die Erhöhung der Leuchtdichte in einer Entfernung von 12 m bis 20 m. In Entfernungen  $> 20$  m nimmt die Erhöhung wieder ab. Dies gleicht dem

ermittelten Verhalten zwischen einer trockenen und nassen Fahrbahn, deren Leuchtdichtekoeffizienten sich in größeren Entfernungen wieder angleichen (vgl. Abbildung 5.5, S. 62).

### Perspektive des Gegenverkehrs

Wesentlich entscheidender ist, wie sich die Leuchtdichte entlang der Reflexlinie aus der Perspektive des Gegenverkehrs ändert, um eine Aussage über die Blendung treffen zu können.

Abbildung 5.24 verdeutlicht, dass die Leuchtdichte durch geänderte Reflexionseigenschaften um bis zu dem 150-fachen erhöht wird. Der LED-Scheinwerfer weist mit  $981 \text{ cd/m}^2$  das geringste Maximum auf. Anschließend kommt der Halogen-Scheinwerfer mit  $1120 \text{ cd/m}^2$  und zuletzt der Xenon-Scheinwerfer mit  $1226 \text{ cd/m}^2$ , dessen Maximum sich näher am Scheinwerfer befindet. Die genannte Rangordnung widerspricht der Rangordnung der ermittelten maximalen Beleuchtungsstärken entlang der Reflexlinien bei  $\Theta = 6^\circ$  (vgl. Abbildung 5.19). Dementsprechend müsste die maximale Leuchtdichte bei dem LED-Scheinwerfer gemessen werden.

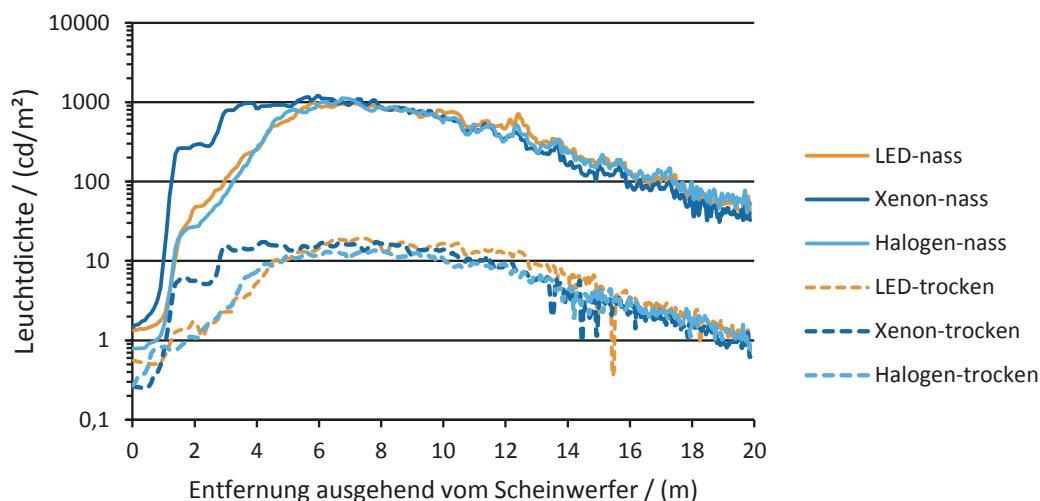


Abbildung 5.24: Effekt geänderter Reflexionseigenschaften auf die Leuchtdichte entlang der Reflexlinie aus der Perspektive des Gegenverkehrs (Blendwinkel  $\Theta = 6^\circ$ )

Die Lage der Leuchtdichtemaxima zeigt, dass speziell der Bereich direkt vor dem Scheinwerfer zur Blendung beiträgt. Sowohl der Halogen- als auch der LED-Scheinwerfer weisen in diesem Bereich niedrigere Beleuchtungsstärken als der Xenon-Scheinwerfer auf (vgl. Abbildung 5.20). Aus diesem Grund verursacht der LED-Scheinwerfer die geringste Leuchtdichte, trotz der höchsten Beleuchtungsstärke entlang der Reflexlinie.

Bei der Analyse der Reflexlinien wurde zudem beobachtet, dass die Leuchtdichtemaxima bei nasser Fahrbahndeckschicht (Bodenfliese) geometrisch stets hinter dem theoretischen Reflexpunkt ( $\hat{=}$  näher am Scheinwerfer) liegen. Bei trockener Fahrbahn tauchen sie hingegen sowohl vor als auch hinter dem theoretischen Reflexpunkt auf.

### 5.4.3 Fazit

Die Untersuchung bestätigt, dass heutige Serienscheinwerfer aufgrund der systembedingten Abblendlichtverteilungen unterschiedliche “Blendkeulen“ verursachen. Systembedingt resultieren daraus entlang der Reflexlinie unterschiedliche Beleuchtungsstärken (siehe Abbildung 5.19). Die wesentlichen Unterschiede sind die Lage und der Betrag der Maxima, sowie das Profil der Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Entfernung. Die Beleuchtungsstärke stellt zunächst ein geeignetes Kriterium zum Vergleich der “Blendkeulen“ dar.

Die Ergebnisse der Leuchtdichtemessungen verdeutlichen die systembedingten Unterschiede (siehe Abbildung 5.24). Die Lage der maximalen Leuchtdichte entlang der Reflexlinie ist allerdings ungleich der Lage der maximalen Beleuchtungsstärke (vgl. Abbildung 5.19 mit Abbildung 5.24). Aus diesem Grund ist ebenfalls die Leuchtdichte bei der Blendungsbewertung zu berücksichtigen. Anderenfalls würde bei einem Blendwinkel von  $\Theta = 6^\circ$  der LED-Scheinwerfer die schlechteste Bewertung hinsichtlich der Beleuchtungsstärke erhalten, obwohl der Xenon-Scheinwerfer die maximale Leuchtdichte verursacht (siehe Abbildung 5.20 und Abbildung 5.24). In weiterführenden Studien wäre zu untersuchen, ob die ermittelten Unterschiede der maximalen Leuchtdichten überhaupt als störend empfunden werden.

Des Weiteren haben die geänderten Reflexionseigenschaften einen starken Einfluss auf die Blendung. Das Adaptationsniveau des Fahrers wird entlang der Reflexlinien um einen durchschnittlichen Faktor von 2,8 herabgesetzt (siehe Abbildung 5.22 und Abbildung 5.23). Gleichzeitig wird die Leuchtdichte entlang der Reflexlinie aus der Perspektive des Gegenverkehrs um einen durchschnittlichen Faktor von 150 erhöht (siehe Abbildung 5.24). Das Maximum der Leuchtdichte befindet sich im trockenen Fahrbahnzustand (Molton) vor oder hinter dem theoretischen Reflexpunkt, was vergleichbar mit den Ergebnissen von KÖHLER [Köh11] ist. Entsprechend der Ergebnisse von DAMASKY [Dam95] verschiebt es sich bei einer nassen Fahrbahn (Bodenfliese der Halle) in Richtung Scheinwerfer, liegt allerdings nahe dem Reflexpunkt (vgl. [Ros00]). Die Variation der Lage des Maximums ist auf die systembedingten Lichtverteilungen zurückzuführen.

Zusammenfassend eignet sich die vorgestellte Bewertungsmethode, um verschiedene Scheinwerfer hinsichtlich der verursachten “Blendkeulen“ zu vergleichen. Die eingesetzte Photometerhalterung erweist sich dabei als hilfreich, um die Ausrichtung des Scheinwerfers zu überprüfen und anschließend die Beleuchtungsstärken aus der Simulation (vgl. Abbildung 5.21) für weiterführende Analysen zu nutzen. Eine direkte Aussage über die Blendbeleuchtungsstärke am Auge ist mit der Bewertungsmethode allerdings nicht möglich. Hierzu sind weitere Berechnungsschritte erforderlich. Eine Möglichkeit wäre die integrale Bewertung entlang der Reflexlinie (vgl. [Ros00], [Hof03]).

---

## 6 Untersuchungen relevanter Einflussgrößen im Freien

Das nachfolgende Kapitel fasst alle im Freien abgehaltenen Untersuchungen zusammen, die bei IAV am Entwicklungszentrum in Gifhorn auf der Applikationsstrecke durchgeführt wurden. Ziel der Untersuchungen war, Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht bei spiegelnden Fahrbahnoberflächen zu entwickeln. Insbesondere wurde der Einfluss verschiedener Abblendlichtverteilungen auf die Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang und auf die Bewertung der psychologischen Blendung untersucht.

### 6.1 Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang

Die Ergebnisse aus Kapitel 5.4 zeigen, dass die zur indirekten Blendung beitragenden Blendkeulen systembedingt stark variieren. Je nach Scheinwerfersystem ist folglich im Passiervorgang mit unterschiedlichen Blendbeleuchtungsstärken zu rechnen. Daher empfiehlt sich eine Analyse der Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang.

In diesem Kapitel wird speziell die Wechselwirkung aus systembedingter Lichtverteilung und einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche betrachtet. Folgende Hypothesen liegen der Untersuchung zugrunde:

- *Die Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang wird bei einer trockenen Fahrbahn vorrangig durch den direkten Blendanteil verursacht, der mit zunehmender Begegnungsentfernung ansteigt. Dies liegt in der Charakteristik der Abblendlichtverteilung begründet, die oberhalb der HDG mit zunehmendem Vertikalwinkel weniger Lichtstrom abstrahlt.*
  - *Der dem Fahrbahnrand nähere, rechte Scheinwerfer verursacht im Passiervorgang eine geringere Blendbeleuchtungsstärke als der der Fahrbahnmitte nähere, linke Scheinwerfer. Dies ist auf den vergrößerten lateralen Abstand zwischen Scheinwerfer und Beobachter zurückzuführen.*
  - *Im Passiervorgang, insbesondere bei einer spiegelnden Fahrbahn, ist mit stark unterschiedlichen Blendbeleuchtungsstärken zu rechnen. Verursacht werden diese durch die Wechselwirkung aus systembedingter Abblendlichtverteilung und dem Zustand der Fahrbahnoberfläche.*
  - *Anhand einer Bewertungsfunktion in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung kann von der Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang bei trockener Fahrbahn auf die bei nasser*
-



*Fahrbahn geschlossen werden, da für die Erhöhung die geänderten Reflexionseigenschaften der Fahrbahn verantwortlich sind.*

Das Ziel der Untersuchung ist, neue Bewertungsmethoden abzuleiten. Diese sollen eine Bewertung der Blendbeleuchtungsstärke während eines Passiervorgangs bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen bereits frühzeitig im Entwicklungsprozess von Kfz-Scheinwerfern ermöglichen. Zudem soll eine Unterscheidung zwischen direkter und indirekter Blendbeleuchtungsstärke möglich sein.

### 6.1.1 Methodik

Die Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang wurde dreigeteilt untersucht. Die einzelnen Teilversuche werden nachfolgend detailliert beschrieben. Allen gleich ist dabei der in Abbildung 6.1 dargestellte Versuchsaufbau. Dieser zeigt die untersuchte Begegnungssituation. Die Scheinwerferanbauhöhe betrug 0,65 m. Als Beobachterhöhe wurde 1,20 m angesetzt (vgl. [CIE10]). Die Beleuchtungsstärke wurde entlang der Passierlinie in fünf Meter Schritten erfasst. Zudem zeigt Abbildung 6.1 die Verbindungslinien zwischen Scheinwerfer und Beobachter, jeweils bei gleichem Blendwinkel  $\Theta$ , entlang der sich die in Kapitel 5.4 analysierten Blendkeulen auf der Fahrbahn ausbilden.

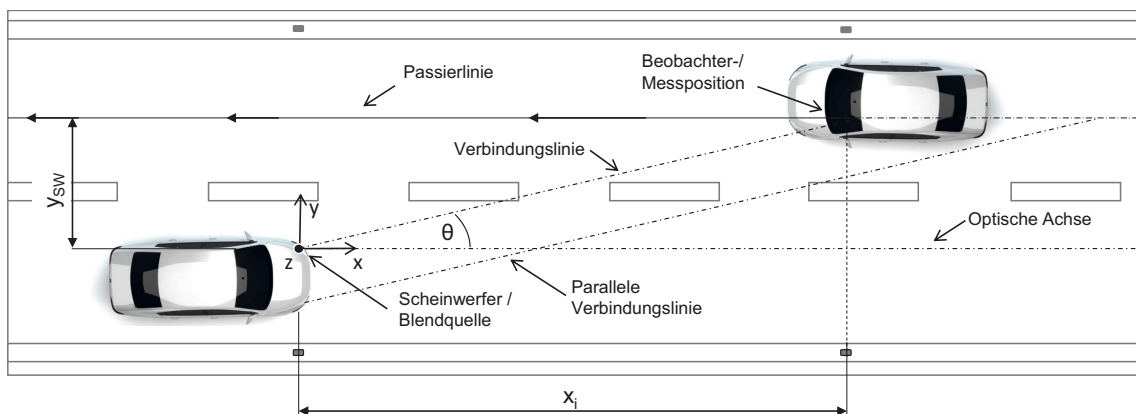


Abbildung 6.1: Versuchsaufbau zur Bewertung der Blendung im Passiervorgang

#### Teilversuch I: Analyse der Abblendlichtverteilung des “Trabant nT“ Scheinwerfers

Zur Ermittlung der direkten Blendbeleuchtungsstärke wurde die Lichtstärkeverteilung des “Trabant nT“ zunächst simulativ analysiert. Der am Goniophotometer erfasste LVK wurde unter Zuhilfenahme der Simulationssoftware LucidShape auf die am Auge befindliche Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang untersucht. Hierzu wurde in einer Höhe von 0,55 m oberhalb der H-H-Ebene eine horizontale Ebene durch den LVK gelegt. Dies entspricht bei der gewählten Scheinwerferanbauhöhe einer Beobachterhöhe von 1,2 m. Die Blendbeleuchtungsstärke wurde anschließend entlang der Passierlinie (siehe Abbildung 6.1) gemessen. Die Passierlinie lag dabei



in einem lateralen  $y$ -Versatz von 2,13 m zur optischen Achse des Scheinwerfers. Der  $y$ -Versatz resultiert aus der angenommenen Scheinwerferanbaubreite von 1,20 m und der in Kapitel 3.5 beschriebenen Bewertungsmethode der CIE.

Zur Ermittlung der gesamten Blendbeleuchtungsstärke wurden Messungen auf der Applikationsstrecke bei IAV durchgeführt. Die geometrischen Bedingungen der Simulation wurden dabei entsprechend übernommen. Die Versorgung des Scheinwerfers erfolgte spannungsgeregelt bei 13,2 V.

Neben der Blendbeleuchtungsstärke wurde ebenfalls die äquivalente Schleierleuchtdichte  $L_{v\_eq}$  nach Formel 2.4 berechnet. Anhand dieser kann eine Aussage über die physiologische Blendung getroffen werden, um aufzuzeigen, in welcher Entfernung mit der maximalen Reduzierung der Sehleistung zu rechnen ist.

Um zusätzlich den Effekt einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche auf die Blendbeleuchtungsstärke zu analysieren, wurde eine handelsübliche Kunststofffolie auf die Fahrbahn aufgebracht. Aufgrund des höheren gerichteten Reflexionsanteils gleicht das Reflexionsverhalten der Kunststofffolie dem Verhalten einer „nassen“ Fahrbahn (vgl. [Ros00], [SCS01]). Um möglichst wenig Störstellen zu haben, wurde auf eine faltenfreie Aufbringung der Folie geachtet.

Zum Vergleich des direkten und indirekten Blendanteils im Passiervorgang wurde die indirekte Blendbeleuchtungsstärke anhand der Differenz aus gesamter und direkter Blendbeleuchtungsstärke ermittelt. Anschließend wurden beide Blendanteile relativ gegenübergestellt. Dies wurde sowohl für die trockene als auch die spiegelnde Fahrbahnoberfläche durchgeführt. Somit kann eine Aussage getroffen werden, welcher Blendanteil in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung vorrangig die Blendbeleuchtungsstärke beeinflusst.

## Teilversuch II: Vergleich verschiedener Abblendlichtverteilungen

Die Lichtverteilung des “Trabant nT“ allein lässt noch keine Aussage über die systemabhängige Variation der Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang zu. Aus diesem Grund wurden die Scheinwerfer von sechs weiteren Fahrzeugen<sup>1</sup> einem Vergleich unterzogen. Hierbei handelt es sich sowohl um Reflexions- als auch Projektionssysteme, die mit den heute gängigen Leuchtmitteln ausgestattet sind.

Zur Ermittlung der direkten Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang wurden die LVK aller Scheinwerfer unter Zuhilfenahme der Simulationssoftware LucidShape analysiert. Die Vorgehensweise ist dabei identisch mit der beim “Trabant nT“ Scheinwerfer.

Um den Effekt der Scheinwerferanbaubreite zu analysieren, wurden jeweils die linken und rechten Scheinwerfer der Fahrzeuge verglichen. Als Scheinwerferanbaubreite wurde bei allen Fahrzeugen von 1,40 m ausgegangen. Der laterale  $y$ -Versatz zwischen optischer Achse des Scheinwerfers und

---

<sup>1</sup>Aus rechtlichen Gründen dürfen an dieser Stelle weder Marken- noch Modellbezeichnungen der gewählten Fahrzeuge genannt werden.

der Passierlinie (vgl. Abbildung 6.1) beträgt abgerundet 2,00 m für den linken und 3,40 m für den rechten Scheinwerfer.

In Summe wurden 16 Lichtverteilungen (8x linker Scheinwerfer, 8x rechter Scheinwerfer) auf deren direkte Blendbeleuchtungsstärke untersucht. Sechs Lichtverteilungen (3x links, 3x rechts) davon gehören zu einem Fahrzeug (Referenz-Fahrzeug). Diese werden im letzten Teilversuch noch weiter analysiert.

### **Teilversuch III: Vergleich verschiedener Abblendlichtverteilungen eines Referenz-Fahrzeuges**

Im vorherigen Teilversuch wurden die Abblendlichtverteilungen des Referenz-Fahrzeuges bereits hinsichtlich der direkten Blendbeleuchtungsstärke analysiert. Ziel dieses Teilversuchs war, die Abblendlichtverteilungen hinsichtlich der gesamten Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang bei unterschiedlichen Fahrbahnzuständen zu analysieren.

Zur Ermittlung der gesamten Blendbeleuchtungsstärke, die unter realen Bedingungen resultiert, wurden Messungen auf der Applikationsstrecke bei IAV durchgeführt. Die Scheinwerfer-Paare wurden dazu auf einer Art "Tisch" aufgebracht und parallel zur Fahrbahnoberfläche ausgerichtet. Der Tisch selbst wurde rechtwinklig zur Fahrtrichtung ausgerichtet. Die optischen Achsen der beiden Scheinwerfer verliefen somit parallel zur Fahrtrichtung. Alle weiteren geometrischen Bedingungen wurden vom vorherigen Teilversuch übernommen. Die Versorgungsspannung der Scheinwerfer betrug 13,2 V.

Der Versuchsablauf gestaltete sich wie folgt: Zunächst wurde in jeder Messentfernung eine Dunkelmessung aufgenommen, die vom eigentlichen Messwert abgezogen wurde. Anschließend wurde in jeder Messentfernung die Blendbeleuchtungsstärke des linken, des rechten und beider Scheinwerfern zusammen gemessen. Die Scheinwerfer wurden währenddessen nicht ausgeschaltet, sondern nur abgedeckt. Dieser Ablauf wurde bei allen drei Scheinwerfersystemen wiederholt.

Zur Analyse des Effekts einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche auf die Blendbeleuchtungsstärke wurde auch bei diesem Teilversuch eine Kunststoffolie auf die Fahrbahndeckschicht aufgebracht (vgl. Teilversuch I). Anschließend wurden die gleichen Messungen bei trockener Fahrbahn erneut durchgeführt.

Anhand der gemessenen Blendbeleuchtungsstärken bei trockener ( $E_{Fahrbahn;trocken}$ ) und spiegelnder ( $E_{Fahrbahn;spiegelnd}$ ) Fahrbahnoberfläche wurde mittels Formel 6.1 der Quotient ermittelt.

$$F_{Fahrbahnzustand} = \frac{E_{Fahrbahn;spiegelnd}(lx)}{E_{Fahrbahn;trocken}(lx)} \quad (6.1)$$

Dieser Quotient entspricht dem Faktor, um den die Blendbeleuchtungsstärke aufgrund einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche erhöht wird. Abschließend wurde für den Mittelwert der Faktoren der linken und rechten Scheinwerfer jeweils eine Ausgleichsfunktion in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung ermittelt.

### 6.1.2 Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse werden nachfolgend - entsprechend der Methodik - dreigeteilt aufgeführt.

#### Teilversuch I: Analyse der Abblendlichtverteilung des "Trabant nT" Scheinwerfers

Die Analyse des "Trabant nT" Scheinwerfers liefert für die Blendbeleuchtungsstärke im Begegnungsfall vergleichbare Ergebnisse, wie sie auch in der Literatur zu finden sind. Abbildung 6.2 zeigt die simulativ ermittelte direkte Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung. Mit abnehmender Begegnungsentfernung steigt diese auf maximal 0,31 lx an. Der zulässige Grenzwert von 350 cd, der in 50 m Entfernung einer Blendbeleuchtungsstärke von 0,14 lx entspricht, wird nicht überschritten.

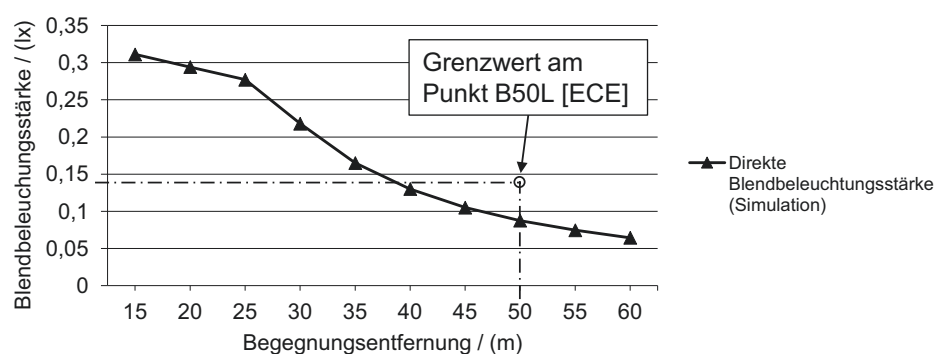


Abbildung 6.2: Direkte Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung, verursacht durch die Abblendlichtverteilung des "Trabant nT" Scheinwerfers (Messwerte, siehe Tabelle C.1, Anhang C)

Abbildung 6.3 (links) zeigt die gesamte Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung sowohl bei trockener als auch spiegelnder Fahrbahnoberfläche. Zusätzlich ist die aus der Simulation ermittelte direkte Blendbeleuchtungsstärke enthalten.

In Abbildung 6.3 (rechts) ist die äquivalente Schleierleuchtdichte  $L_{s\_eq}$  in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung dargestellt. Da der Blendwinkel  $\Theta$  quadratisch in die Berechnung der äquivalenten Schleierleuchtdichte eingeht, führen größere Begegnungsentfernungen zu einer stärkeren Reduzierung der Sehleistung.

Die Ergebnisse belegen, dass die simulierte direkte Beleuchtungsstärke einen ähnlichen Verlauf wie die gemessene Beleuchtungsstärke bei einer trockenen Fahrbahn aufweist. Aufgrund der über die Fahrbahndeckschicht reflektierten, indirekten Beleuchtungsstärke resultiert eine Differenz zwischen beiden. Diese ist bei der trockenen Fahrbahn betragsmäßig gering. Erst der erhöhte gerichtete Reflexionsanteil durch die aufgebraachte Kunststoffolie führt betragsmäßig zu einer großen Differenz. Mit abnehmender Begegnungsentfernung steigt die Blendbeleuchtungsstärke stark an. Bei dem untersuchten Reflexionssystem und dem gewählten Messaufbau resultiert

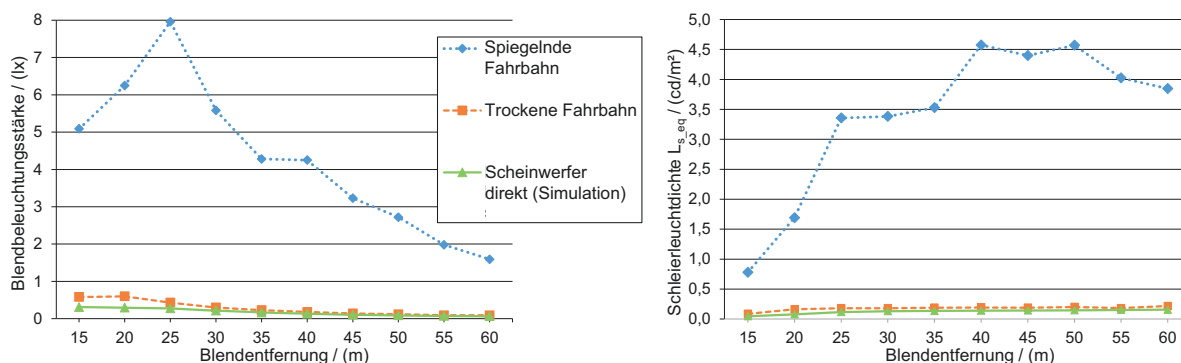


Abbildung 6.3: Blendbeleuchtungsstärke (links) und äquivalente Schleierleuchtdichte (rechts) in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung bei trockener und spiegelnder Fahrbahnoberfläche, verursacht durch das Abblendlicht des “Trabant nT“ Scheinwerfers (Messwerte, siehe Tabelle C.1, Anhang C)

hieraus bei 25 m das Maximum der Blendbeleuchtungsstärke (siehe Abbildung 6.3, links). Verglichen mit der trockenen Fahrbahn ist die Blendbeleuchtungsstärke um nahezu das 20-fache erhöht. Dies impliziert noch nicht die maximale Reduzierung der Sehleistung. Mit dieser ist in einer Entfernung von 40 m bis 50 m zu rechnen (siehe Abbildung 6.3, rechts).

Abbildung 6.4 verdeutlicht den Effekt des direkten und indirekten Blendanteils auf die Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung. Bei der trockenen Fahrbahnoberfläche überwiegt mit zunehmender Begegnungsentfernung der direkte Blendanteil. Der indirekte Blendanteil beträgt dabei weniger als 30 %. Bei der spiegelnden Fahrbahnoberfläche ist der indirekte Anteil  $> 90\%$  und über die Begegnungsentfernung nahezu konstant. Eine genauere Betrachtung lässt einen leichten Anstieg mit zunehmender Begegnungsentfernung erkennen. Der Anteil der direkten Blendbeleuchtungsstärke verhält sich entsprechend gegenläufig. Mit weniger als 10 % ist der direkte Anteil vernachlässigbar.

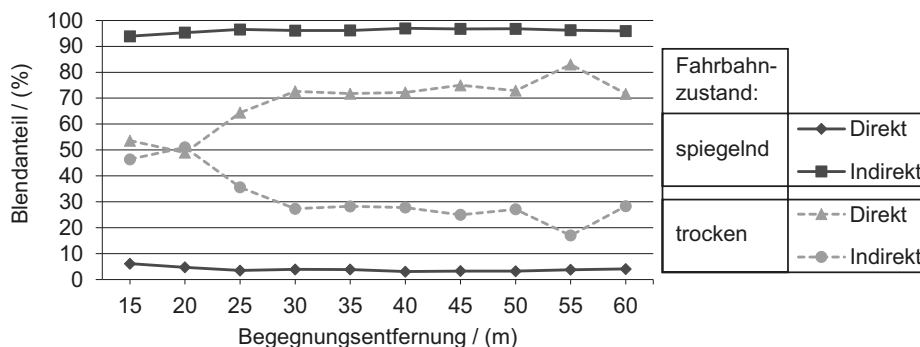


Abbildung 6.4: Blendanteil (%) der direkten und indirekten Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung bei unterschiedlichen Reflexionseigenschaften der Fahrbahn (Messwerte, siehe Tabelle C.1, Anhang C)

### Teilversuch II: Vergleich verschiedener Abblendlichtverteilungen

Der Vergleich verschiedener Abblendlichtverteilungen belegt, dass die direkte Blendbeleuchtungsstärke zwischen den Abblendlichtverteilungen stark differiert. Insbesondere ist dies in kurzen Begegnungsentfernungen der Fall.

Abbildung 6.5 zeigt die direkte Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung. In Begegnungsentfernungen  $< 50$  m werden in Abhängigkeit der Abblendlichtverteilung deutlich unterschiedliche Blendbeleuchtungsstärken ermittelt. Ab einer Begegnungsentfernung von 50 m sind die Beleuchtungsstärken nahezu identisch. Dabei ist ein systembedingter Trend zu erkennen. Insbesondere Systeme, die am wenigsten einer Punktlichtquelle gleichen, verursachen in kurzen Entfernungen hohe Blendbeleuchtungsstärken. Dies war speziell bei dem getesteten Halogen- und LED-System des Referenzfahrzeugs der Fall. Das Xenon-System, das einer Punktlichtquelle am ähnlichsten ist, erzielte in kurzen Entfernungen die niedrigsten Werte.

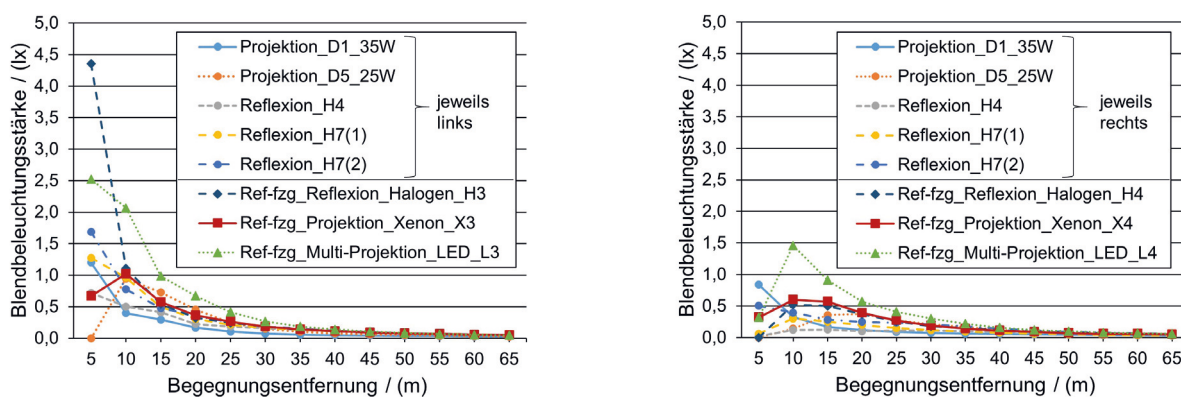


Abbildung 6.5: Direkte Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung und der Scheinwerferanbauposition (links: der Fahrbahnmitte nähere, linke Scheinwerfer; rechts: der Fahrbahnrand nähere, rechte Scheinwerfer; Messwerte, siehe Tabelle C.2, Anhang C)

Des Weiteren verdeutlicht Abbildung 6.5, dass die Scheinwerferanbaubreite und somit der laterale Abstand zwischen Scheinwerfer und Beobachter zu unterschiedlichen Blendbeleuchtungsstärken führt. Die Abblendlichtverteilungen der dem Fahrbahnrand näheren, rechten Scheinwerfer haben jeweils einen geringeren Einfluss auf die Blendbeleuchtungsstärke.

### Teilversuch III: Vergleich verschiedener Abblendlichtverteilungen eines Referenz-Fahrzeuges

Der Vergleich der verschiedenen Abblendlichtverteilungen des Referenz-Fahrzeuges bestätigt, dass die Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang systembedingt und aufgrund einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche stark variiert.

Abbildung 6.6 zeigt die Blendbeleuchtungsstärken, die im Passiervorgang bei trockener Fahrbahnoberfläche gemessen werden. Die im Freien gemessene gesamte Blendbeleuchtungsstärke

ke ist nahezu deckungsgleich mit der direkten Blendbeleuchtungsstärke der Simulation (vgl. Abbildung 6.5). Dies bestätigt den geringen Effekt einer trockenen Fahrbahn auf die Blendbeleuchtungsstärke, der bereits bei Teilversuch I aufgezeigt wurde. Zudem verursacht der der Fahrbahnmitte nähere, linke Scheinwerfer höhere Blendbeleuchtungsstärken als der dem Fahrbahnrand nähere, rechte Scheinwerfer.

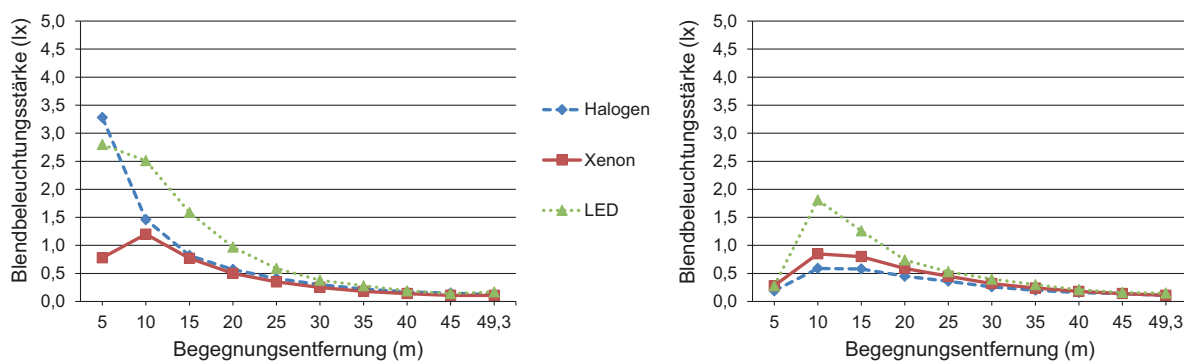


Abbildung 6.6: Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung bei trockener Fahrbahn (links: der Fahrbahnmitte nähere, linke Scheinwerfer; rechts: dem Fahrbahnrand näherer, rechte Scheinwerfer; Messwerte, siehe Tabelle C.3, Anhang C)

Abbildung 6.7 zeigt die Blendbeleuchtungsstärken, die im Passiervorgang bei spiegelnder Fahrbahnoberfläche gemessen werden. Es zeigt sich erneut, dass vorrangig der der Fahrbahnmitte nähere, linke Scheinwerfer höhere Blendbeleuchtungsstärken als der dem Fahrbahnrand nähere, rechte Scheinwerfer verursacht. Einzige Ausnahme stellt die Abblendlichtverteilung des rechten Xenon-Scheinwerfers dar.

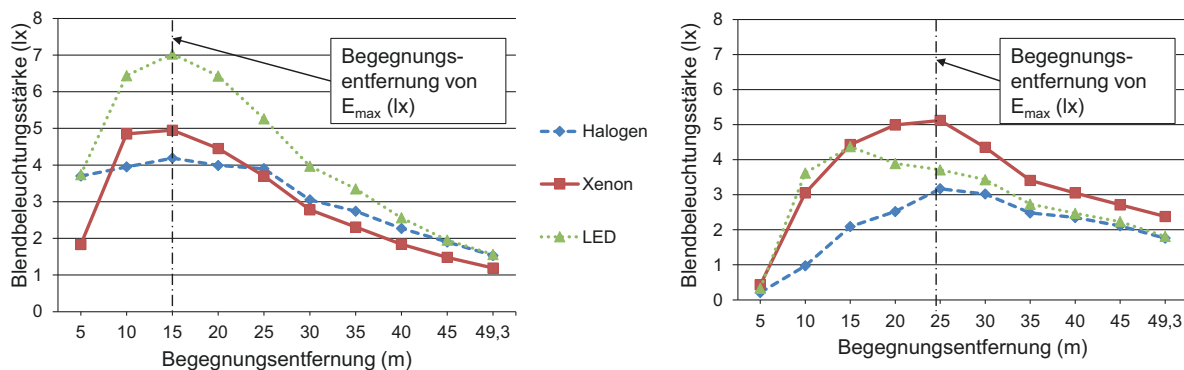


Abbildung 6.7: Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung bei spiegelnder Fahrbahn (links: der Fahrbahnmitte nähere, linke Scheinwerfer; rechts: dem Fahrbahnrand näherer, rechte Scheinwerfer; Messwerte, siehe Tabelle C.3, Anhang C)

Des Weiteren resultieren in Abhängigkeit der Scheinwerferanbauposition unterschiedliche Begegnungsentfernungen, in denen die maximale Blendbeleuchtungsstärke gemessen wird (vgl. Abbildung 6.7). Mit Ausnahme des rechten LED-Scheinwerfers verschiebt sich das Maximum von  $\approx 15$  m (linker Scheinwerfer) zu  $\approx 25$  m (rechter Scheinwerfer). Dieser Versatz entspricht einer Parallelverschiebung der zwischen Blendquelle und Beobachter eingezeichneten Verbindungslinien (vgl. Abbildung 6.1). Eine Berechnung über die trigonometrische Tangensfunktion belegt, dass beiden Maxima ein horizontaler Blendwinkel  $\Theta = 7,6^\circ$  zugrunde liegt.

In Abbildung 6.8 sind die Blendbeleuchtungsstärken zu sehen, die beide Abblendlichtverteilungen gemeinsam bei trockener und spiegelnder Fahrbahnoberfläche im Passiervorgang verursachen. Die Gegenüberstellung lässt den Effekt der Wechselwirkung aus Abblendlichtverteilung und spiegelnder Fahrbahnoberfläche erkennen. Die maximale Blendbeleuchtungsstärke ist in einer Begegnungsentfernung zwischen 5 m - 25 m zu erwarten und erreicht Werte von bis zu 11,4 lx für die LED-Scheinwerfer.

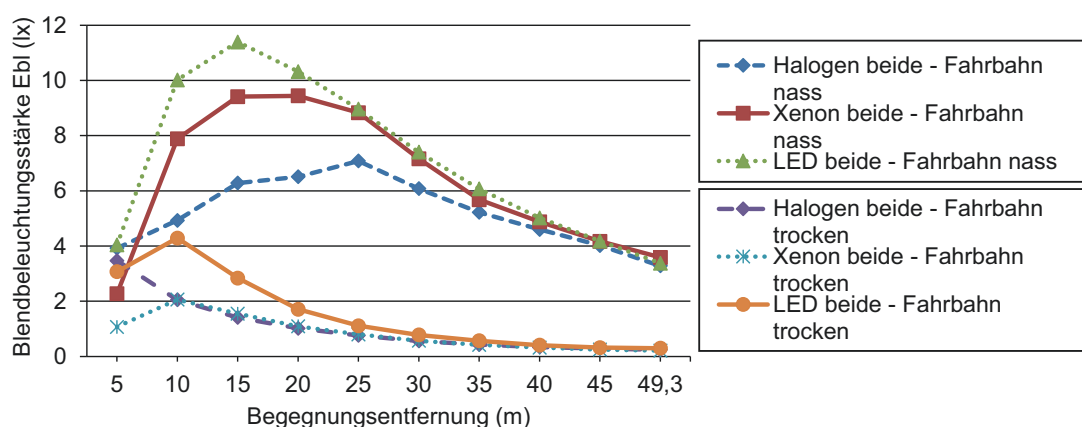


Abbildung 6.8: Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung, verursacht durch die Lichtverteilungen beider Scheinwerfer bei unterschiedlichen Fahrbahnzuständen (Messwerte, siehe Tabelle C.3, Anhang C)

Abbildung 6.9 verdeutlicht, um welchen Faktor die Blendbeleuchtungsstärke aufgrund einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche erhöht wird. Bei allen getesteten Lichtverteilungen ist in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung ein vergleichbarer Trend zu erkennen. Dieser resultiert aus der geänderten Reflexionseigenschaft der Fahrbahnoberfläche. Die Unterschiede sind auf die systembedingten Lichtverteilungen und die Anbauposition zurückzuführen. So haben die Lichtverteilungen der dem Fahrbahnrand näheren, rechten Scheinwerfer in größeren Begegnungsentfernungen einen größeren Effekt. Daher wurde für jede Anbauposition eine spezifische Funktion ermittelt. Die Funktionen eignen sich zur Abschätzung der zu erwartenden Blendbeleuchtungsstärke aufgrund einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche.



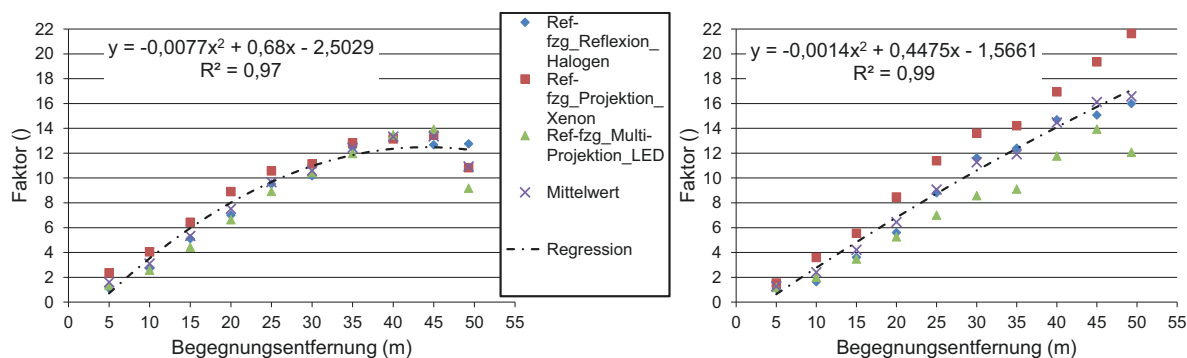


Abbildung 6.9: Entfernungsabhängige Faktoren, um welche die Blendbeleuchtungsstärke aufgrund einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche, im Vergleich zu einer trockenen Oberfläche erhöht wird (links: linke Scheinwerferanbauposition, rechts: rechte Scheinwerferanbauposition; Messwerte, siehe Tabelle C.3, Anhang C)

### 6.1.3 Fazit

Die Untersuchungen bestätigen, dass die Wechselwirkung aus systembedingter Lichtverteilung und spiegelnder Fahrbahnoberfläche die Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang stark erhöht. Anhand der Versuche konnten alle aufgestellten Hypothesen bestätigt werden.

Der erste Teilversuch beweist, dass die Blendbeleuchtungsstärke bei trockener Fahrbahnoberfläche primär durch den direkten Blendanteil bestimmt wird. Mit zunehmender Begegnungsentfernung steigt dieser Blendanteil an. Bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche ist der Einfluss der Blendanteile invertiert. Mehr als 90 % der Blendbeleuchtungsstärke werden durch den indirekten Blendanteil verursacht. Daher ist der indirekte Blendanteil gezielt durch ein adaptives blendfreies Abblendlicht zu minimieren. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde zur Bewertung des dominierenden Blendanteils die dimensionslose Maßzahl GIR entwickelt (siehe Kapitel 7.3).

Der zweite und dritte Teilversuch verdeutlichen den Einfluss der Scheinwerferanbaubreite. Die Lichtverteilungen der der Fahrbahnmitte näheren, linken Scheinwerfer verursachen überwiegend höhere Blendbeleuchtungsstärken. Dabei ist zu beachten, dass die linken Scheinwerfer unter einem geringeren Blendwinkel im Gesichtsfeld eines entgegenkommenden Verkehrsteilnehmers erscheinen als die rechten. Die physiologische Blendung wird dadurch nochmals erhöht. Die Maxima der Blendbeleuchtungsstärke werden unabhängig von den getesteten Anbaupositionen bei einem Blendwinkel von  $\Theta = 7,6^\circ$  gemessen (siehe Abbildung 6.7). Folglich wird davon ausgegangen, dass der hier vorliegende Spiegelwinkel einen besonderen Einfluss auf die indirekte Blendung nimmt. Aufgrund der erzielten Ergebnisse wird es als sinnvoll erachtet, den linken Scheinwerfer hinsichtlich der physio- und der psychologischen Blendung im Entwicklungsprozess kritischer zu betrachten als den rechten Scheinwerfer. Dies bestätigen ebenfalls die Ergebnisse von ROSENHAHN [Ros00]. Die Relevanz wäre durch weitere Probandenstudien unter Bewertung der physio- und der psychologischen Blendung zu verifizieren. Zudem ist es nicht zulässig, die

durch einen Scheinwerfer verursachte Blendbeleuchtungsstärke zu verdoppeln, um auf die Blendbeleuchtungsstärke beider Scheinwerfer im Straßenverkehr zu schließen.

Der dritte Teilversuch bestätigt zudem, dass die systembedingten Lichtverteilungen bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche stark unterschiedliche Blendbeleuchtungsstärken verursachen. Die Blendbeleuchtungsstärke in einer Begegnungsentfernung von 15 m variiert systembedingt zwischen 6,3 lx und 11,4 lx (siehe Abbildung 6.8). In größeren Begegnungsentfernungen wird die Blendbeleuchtungsstärke um mehr als das 20-fache erhöht. Die maximale Erhöhung der Blendbeleuchtungsstärke tritt dabei in Entfernungen  $> 45$  m auf. Da größere Begegnungsentfernungen aufgrund des geringeren Blendwinkels einen stärkeren Einfluss auf die physiologische Blendung haben, wird die Sehleistung dadurch zusätzlich reduziert.

Anhand der Ergebnisse wurde sowohl für den linken als auch den rechten Scheinwerfer eine Funktion in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung ermittelt, die eine Vorhersage der zu erwartenden Blendbeleuchtungsstärke bei spiegelnder Fahrbahnoberfläche ermöglichen. Zudem kann mit Hilfe der Funktionen die Erhöhung der Schleierleuchtdichte und somit der physiologischen Blendung abgeschätzt werden. Zunächst gelten die Funktionen allerdings nur für die getesteten geometrischen Bedingungen und Lichtverteilungen und eignen sich für eine vorläufige Abschätzung. Um die Ergebnisse umfassend zu verifizieren, wären Messungen mit weiteren Abblendlichtverteilungen durchzuführen. Ebenso wäre es empfehlenswert, Begegnungsentfernungen  $> 50$  m zu untersuchen. Es ist allerdings davon auszugehen, dass der Effekt mit zunehmender Begegnungsentfernung rückläufig sein wird, da das Abblendlicht nur bis zu einer Entfernung von  $\approx 65$  m auf den Asphalt trifft. Die ermittelte Funktion für die Lichtverteilungen der der Fahrbahnmitte näheren, linken Scheinwerfer lässt zumindest darauf schließen (siehe Abbildung 6.9). Basierend auf den zuvor genannten Ergebnissen wurde CAGE, eine Software zur computerbasierten Blendungsbewertung, entwickelt (siehe Kapitel 7.4).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass heutige Abblendlichtverteilungen trotz Gesetzeskonformität insbesondere bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche zu einer unterschiedlichen physiologischen Blendung führen. Ob die getesteten Lichtverteilungen auch zu einer unterschiedlichen psychologischen Blendungen führen, wird im nächsten Kapitel untersucht.

## 6.2 Abblendlichtverteilungen verschiedener Scheinwerfersysteme

Die Abblendlichtverteilungen verschiedener Scheinwerfersysteme verursachen im Passiervorgang unterschiedliche Blendbeleuchtungsstärken, wie Kapitel 6.1 belegt. Ebenfalls wurde bei den Versuchen beobachtet, dass sich der Objektkontrast eines ca. 100 m entfernten Verkehrszeichens bei spiegelnder Fahrbahnoberfläche um nahezu das Fünffache erhöht. Eine spiegelnde Fahrbahnoberfläche begünstigt folglich eine Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung (siehe [Hug07]).

In diesem Kapitel wird die Wechselwirkung aus Fahrbahnzustand und Abblendlicht verschiedener Scheinwerfersysteme eines Fahrzeuges sowohl auf die Sichtbedingungen des Fahrers als auch auf die physiologische und psychologische Blendung des Gegenverkehrs untersucht. Insbesondere geht es um den Einfluss der Lichtverteilung und um den Effekt eines blendfreien Abblendlichtes bei spiegelnder Fahrbahnoberfläche (vgl. [BSA<sup>+</sup>08], [Fis15]). Zudem werden folgende Hypothesen geprüft:

- *In Abhängigkeit der Abblendlichtverteilung variiert die Erkennbarkeitsentfernung bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche aufgrund von unterschiedlichen Vorfeldleuchtdichten und Objektkontrasten zum Umfeld.*
- *Das bei einer spiegelnder Fahrbahnoberfläche vorwärts reflektierte Scheinwerferlicht führt zu einem erhöhten Objektkontrast, der es ermöglicht, die durch die Scheinwerfer eines entgegenkommenden Fahrzeuges verursachte äquivalenten Schleierleuchtdichte  $L_{v\_eq}$  zu kompensieren.*
- *In Abhängigkeit der Abblendlichtverteilung wird bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche die psychologische Blendung unterschiedlich bewertet. Dies ist auf die Lichtverteilung entlang der Reflexlinie und die dadurch verursachte Blendbeleuchtungsstärke zurückzuführen.*
- *Die indirekte Blendung bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche wird störender als die direkte Blendung bei trockener Fahrbahn empfunden. Die Ursache ist der höhere Blendanteil, der durch die "Blendkeulen" verursacht wird.*

Das Ziel der Untersuchung ist, die Effektivität eines blendfreien Abblendlichtes und die Unterschiede hinsichtlich der psychologischen Blendung aufgrund unterschiedlicher Abblendlichtverteilungen aufzuzeigen (Abblendlichtverteilungen, siehe Abbildung B.6, Anhang B). Zudem sollen die Ergebnisse verdeutlichen, welchen Einfluss eine spiegelnde Fahrbahnoberfläche und die damit verbundene indirekte Blendung auf die Verkehrssicherheit und den Fahrkomfort hat.

### 6.2.1 Methodik

Der Versuch wurde den allgemeinen Methoden zur Blendungsbewertung entsprechend (vgl. Kapitel 2.2.2) zweigeteilt durchgeführt. Zunächst wird auf die Versuchsparameter eingegangen.

**Versuchsparameter**

Tabelle 6.1 zeigt die Versuchsparameter der beiden Teilversuche. Die spiegelnde Fahrbahnoberfläche wird dabei mit Hilfe einer handelsüblichen Kunststoffolie realisiert, die auf die Fahrbahn aufgebracht wird. Im folgenden wird der dadurch erzeugte Fahrbahnzustand als „nass“ bezeichnet. Um zufällige Effekte bei der Bewertung der psychologischen Blendung auszuschließen, wurde eine Signifikanzanalyse durchgeführt. Der allgemeine Versuchsaufbau sowie die beiden Teilversuche werden nachfolgend detailliert beschrieben.

Tabelle 6.1: Versuchsparameter der beiden Teilversuche

Teilversuch	Unabhängige Variablen	Abhängige Variablen
I	<b>Abblendlichtverteilung des Scheinwerfersystems (li. und re. Scheinwerfer)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reflexion-Halogen</li> <li>• Projektion-Xenon</li> <li>• Multi-Projektion LED</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adaptationsleuchtdichte <math>L_{ad}</math> (cd/m<sup>2</sup>)</li> <li>• Objektkontrast <math>c_w</math> ()</li> <li>• Blendbeleuchtungsstärke <math>E_{bl,v}</math> (lx)</li> <li>• Äquivalente Schleierleuchtdichte <math>L_{s,eq}</math> (cd/m<sup>2</sup>)</li> </ul>
	<b>Zustand der Fahrbahnoberfläche</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Trocken</li> <li>• „Nass“ (Kunststoffolie)</li> </ul>	
II	<b>Abblendlichtverteilung des Scheinwerfersystems (nur li. Scheinwerfer)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reflexion-Halogen</li> <li>• Projektion-Xenon</li> <li>• Multi-Projektion LED</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Psychologische Blendung nach de Boer ()</li> </ul>
	<b>Zustand der Fahrbahnoberfläche</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Trocken</li> <li>• „Nass“ (Kunststoffolie)</li> </ul>	
	<b>Blendungsart</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Direkt</li> <li>• Indirekt</li> <li>• Direkt + Indirekt</li> </ul>	

**Allgemeiner Versuchsaufbau**

Abbildung 6.10 zeigt den allgemeinen Versuchsaufbau. Das in Kapitel 4.2 beschriebene Geometriemodell stellt die Grundlage dafür dar. Mit geringfügigen Anpassungen ist der Versuchsaufbau für beide im folgenden beschriebenen Teilversuche gültig.

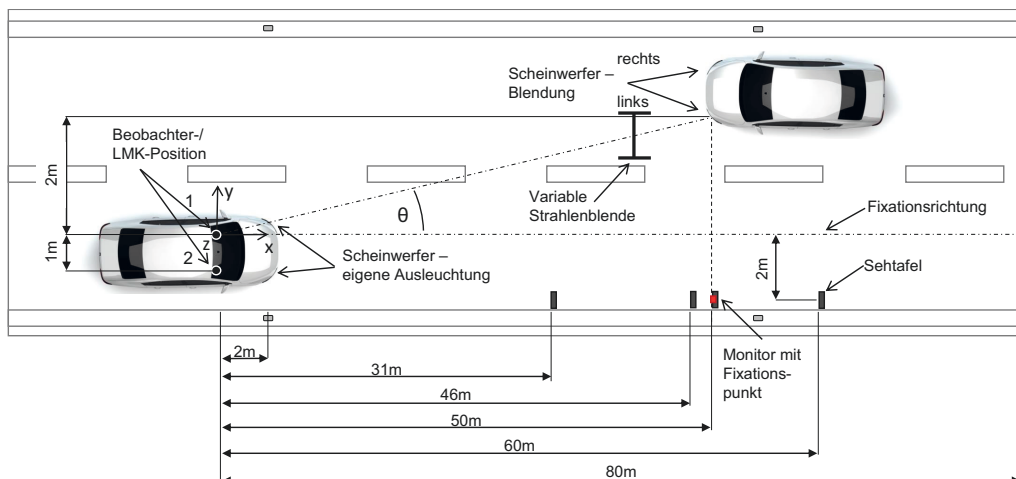


Abbildung 6.10: Versuchsaufbau zur Analyse des Einflusses verschiedener Scheinwerfersysteme und Fahrbahnzustände auf die Sichtbedingungen für den Fahrer und die physio- und psychologische Blendung des Gegenverkehrs

### Teilversuch I: Adaptationsleuchtdichte, Erkennbarkeitsentfernung und physiologische Blendung

Bei Teilversuch I wurde an Beobachterposition 1 zunächst die Leuchtdichtemesskamera in einer Höhe von  $z = 1,20$  m aufgestellt und in Fixationsrichtung ausgerichtet. Die Scheinwerfer für die eigene Ausleuchtung wurden 2 m vor der LMK aufgebaut. Die Ausrichtung der Scheinwerfer erfolgte wie bei dem in Kapitel 6.1 beschriebenen Teilversuch III (siehe S. 86).

Die Adaptationsleuchtdichte  $L_{ad}$  wurde anhand der mittleren Leuchtdichte ermittelt, die innerhalb einer Ellipse ( $2^\circ$  vertikal,  $10^\circ$  horizontal) gemessen wurde (vgl. [WV13]). Als Fixationsentfernungen wurden 31 m und 46 m gewählt. Diese Entfernungen entsprechen den Fixationsentfernungen bei einer nassen und einer trockenen Fahrbahn [SCS01].

Zur Bewertung des Effekts einer „nassen“ Fahrbahn auf die Erkennbarkeitsentfernung wurden Sehtafeln am rechten Fahrbahnrand aufgestellt und deren Objektkontrast ermittelt. Die Sehtafeln besitzen die Abmaße  $0,3\text{ m} \times 0,3\text{ m}$  und einen Reflexionsgrad von 6% ([Lans09], nach [Völ06]). Die Positionen der Sehtafeln in 31 m und 46 m Entfernung wurden in Anlehnung an die Fixationsentfernungen bei nasser und trockener Fahrbahn gewählt [SCS01]. Zusätzlich wurden zwei weitere Sehtafeln in 60 m und 80 m Entfernung aufgestellt. Der Objektkontrast  $C_W$  wurde dabei an der Kante ermittelt, die zwischen trockener und „nasser“ Fahrbahnoberfläche den stärksten Effekt erkennen lässt. Begründet liegt dies in der Tatsache, dass die Kante mit dem höchsten Kontrast, bzw. Schatten eine hohe Korrelation mit der Erkennbarkeitsentfernung aufweist (vgl. [Völ06]).

Zur Bewertung der physiologischen Blendung wurden baugleiche Serienscheinwerfer in 50 m Entfernung aufgebaut. Anhand dieser wurde der Effekt eines entgegenkommenden Scheinwerferpaares auf die Adaptationsleuchtdichte untersucht. Die Ausrichtung der Scheinwerfer erfolgte auch hier wie bei dem Teilversuch III in Kapitel 6.1 (siehe S. 86). Die Adaptationsleuchtdichte wurde erneut mittels LMK aus Beobachterposition 1 gemessen. Zur Bewertung wurde wieder die Ellipse ( $2^\circ$  vertikal,  $10^\circ$  horizontal) herangezogen. Ebenfalls wurde an Beobachterposition 1 die vertikale Blendbeleuchtungsstärke  $E_{bl,v}$  gemessen. Dazu wurde vor der LMK ( $x = 0,7$  m) in gleicher Höhe ein Photometer aufgestellt. Anhand der gemessenen Beleuchtungsstärke und den geometrischen Bedingungen wurde die äquivalente Schleierleuchtdichte  $L_{s\_eq}$  ermittelt. Zur Ermittlung von  $L_{s\_eq}(cd/m^2)$  wurde als Altersfaktor  $k = 10$  gewählt und der Blendwinkel  $\Theta$  anhand der geometrischen Bedingungen aus Abbildung 6.10 berechnet.

Abschließend wurde geprüft, ob der erhöhte Objektkontrast bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche ausreichend ist, um die äquivalente Schleierleuchtdichte zu kompensieren. Dazu wurde die maximale Erhöhung des Objektkontrastes durch die Xenon-Scheinwerfer der maximal zu erwartenden äquivalenten Schleierleuchtdichte durch die LED-Scheinwerfer gegenübergestellt.

Alle zuvor genannten Bewertungen wurden sowohl bei trockener als auch spiegelnder Fahrbahn vorgenommen. Aufgrund des zu entwickelnden adaptiven blendfreien Abblendlichts war insbesondere die spiegelnde Fahrbahn von Bedeutung.

## Teilversuch II: Psychologische Blendung und Effekt eines maskierten Abblendlichts

Zur Darstellung des Teilversuchs II wird nachfolgend auf die Vorversuche, den angepassten Versuchsaufbau, den Versuchsablauf und die Signifikanzanalyse eingegangen.

### *Vorversuche*

In einem ersten Vorversuch wurde geprüft, ob es zulässig wäre, bei einer „nassen“ Fahrbahn acht Probanden (zwei Reihen à vier Probanden) gleichzeitig die psychologische Blendung bewerten zu lassen (vgl. [LK09]). An den Positionen der acht Probanden wurden stark unterschiedliche Blendbeleuchtungsstärken ( $1,51 \text{ lx} < E_{Bl} < 3,58 \text{ lx}$ ) gemessen, weswegen diese Überlegung verworfen wurde (siehe Abbildung C.1, Anhang C). Letztendlich wurden zwei Positionen in Anlehnung an den Messpunkt B50L [ECE112] und den Punkt der höchsten Wahrscheinlichkeit eines entgegenkommenden Augenpaares aus CIE 188:2010 [CIE10] gewählt. Der y-Versatz von 1 m zwischen den Positionen ist ähnlich dem zwischen Fahrer und Beifahrer eines Pkws. Dies ermöglicht eine Überprüfung, ob bei „nasser“ Fahrbahn ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Bewertungen der psychologischen Blendung in Abhängigkeit der Beobachterposition vorliegt (vgl. Klettwitz-Test [ZHK13]). Zudem gewährleisteten die gewählten Positionen identische Blendwinkel für beide Beobachterpositionen ( $\Theta_1 = \Theta_2 = 4,58^\circ$ ). Dies ist aufgrund des in 50 m am rechten Fahrbahnrand aufgestellten Monitors gegeben, auf dem ein roter Fixationspunkt dargeboten wurde.

In einem weiteren Vorversuch wurde die erforderliche Blende für das blendfreie Abblendlicht getestet. Hierzu wurde eine trapezförmige Blende in den Strahlengang des Xenon-Systems eingebracht (Details siehe Abbildung C.2, Anhang C). Diese wurde bewusst trapezförmig ausgelegt, um einen annähernd rechteckigen Ausschnitt aus der Lichtverteilung auf der Fahrbahn zu realisieren (vgl. [WKM15]). Aufgrund dieser Blende bildet sich entlang der Verbindungslinie zwischen Blendquelle und Beobachter keine Blendkeule aus und die Blendbeleuchtungsstärke bei „nasser“ Fahrbahn ist vergleichbar mit der bei trockener Fahrbahn (Messwerte, siehe Tabelle C.4, Anhang C).

Der letzte Vorversuch stellte den Probedurchlauf der geplanten Studie dar [Gär15]. Dieser wurde mit 4 Probanden durchgeführt. Hierbei wurden zusätzlich verschiedene Begegnungsentfernungen getestet. Dies sollte den Effekt einer „nassen“ Fahrbahn auf die physio- und psychologische Blendung im Passiervorgang untersuchen. Der zeitliche Umfang von mehr als 2 h pro Probandenteam erwies sich allerdings als nicht zumutbar. Daher wurde der Versuch auf die gesetzlich relevante Begegnungsentfernung von 50 m ([ECE112], [CIE10]) beschränkt, wenngleich die kritische Begegnungsentfernung bei nasser Fahrbahn bei 70 m liegt (vgl. [SCS01]).

### *Versuchsaufbau*

Der Versuchsaufbau leitet sich aus Abbildung 6.10 ab. Folgende Anpassungen wurden für den Versuch vorgenommen: Die LMK wurde entfernt und an Beobachterposition 1 und 2 nahmen Probanden Platz. Mittig zwischen den beiden Probanden wurde ein Photometer in der Beobacht-



erhöhe von 1,2 m aufgestellt. Anhand der dort gemessenen Beleuchtungsstärke wurde überwacht, dass während der Studie konstante Bedingungen gegeben waren.

Die Ausleuchtung der Fahrbahn wurde durch einen Satz Halogenscheinwerfer realisiert, der 2 m vor den Probanden in einer Anbauhöhe von 0,65 m aufgebaut wurde. Die Scheinwerfer, die hinsichtlich der psychologischen Blendung zu bewerten waren, wurden in einer Entfernung von 50 m und einem y-Versatz von 2 m zur Beobachterposition 1 aufgestellt. Zu bewerten waren jeweils der linke Halogen-, Xenon- und LED-Scheinwerfer eines Fahrzeugs. Zusätzlich war ein blendfreies Abblendlicht zu bewerten. Dieses wurde unter Einsatz des Xenon-Scheinwerfers realisiert, in dessen Strahlengang die im Vorversuch ermittelte trapezförmige Blende eingebracht wurde, um den indirekten Blendanteil abzuschatten. Die trapezförmige Blende war dazu an der variablen Strahlenblende befestigt, die im folgenden näher beschrieben wird. Alle Scheinwerfer wurden spannungsgeregelt bei einer Versorgungsspannung von 13,2 V betrieben.

Die in Abbildung 6.10 dargestellte variable Strahlenblende (siehe auch Abbildung C.2, Anhang C) wurde zur Darbietung der unterschiedlichen Blendsituationen aufgestellt. Die Blende war so konzipiert, dass entweder der "direkte" oder "indirekte" Blendanteil dargeboten werden konnte. Durch Öffnen beider Teilblenden wurde die "gesamte" Blendsituation dargeboten, so wie sie im Straßenverkehr auftritt. Zusätzlich war die trapezförmige Blende integriert, die eine Darbietung des blendfreien Abblendlichts ermöglichte.

### ***Versuchspersonen***

Insgesamt nahmen 30 Probanden an der Studie teil. Diese wurden alle einer Anamnese unterzogen. Ausschlusskriterien waren Farbfehlsichtigkeit und Sehschärfe ( $\text{Visus} > 0,7$ ). Zur Untersuchung des Farbsehvermögens kamen Ishihara-Tafeln und zur Prüfung des Fernvisus ein SZB-LCS-Test zum Einsatz. Aufgrund der Anamnese-Ergebnisse mussten zwei Probanden von der anschließenden Auswertung ausgeschlossen werden. Der Altersdurchschnitt der bei der Auswertung berücksichtigten Teilnehmer ( $n = 28$ ) betrug 22,6 Jahre, wobei der jüngste Teilnehmer 19 Jahre und der älteste Teilnehmer 33 Jahre alt war.

### ***Versuchsablauf***

Vor Versuchsbeginn wurden alle Teilnehmer per Losverfahren in 15 Teams eingeteilt. Des Weiteren erhielten die Probanden eine kurze Einweisung und wurden über den Hintergrund der Studie, den Versuchsablauf und den Versuchsaufbau informiert, um einen reibungslosen Versuchsablauf zu gewährleisten. Dabei wurden sie ebenfalls über die Bedienung der Tablets informiert, mit denen die psychologische Blendung anhand des in Abbildung 6.11 dargestellten Schiebereglers zu bewerten war. Dieser wurde in Anlehnung an eine visuelle Analogskala ausgelegt.

Nach der Einweisung wurden die Probanden gruppenweise (3 Gruppen à 8 und eine Gruppe mit 6 Probanden) zur Versuchsstrecke gebracht, um sich zunächst an die mesopischen Bedingungen zu gewöhnen ( $t \approx 10$  min) [Schi10]. Der Versuch wurde als Blindtest durchgeführt. Die Probanden wurden weder über die Scheinwerfer informiert, noch ließ die Anonymisierung einen Rückschluss auf diese zu.

---





Abbildung 6.11: Schieberegler in Anlehnung an eine visuelle Analogskala zur Bewertung der psychologischen Blendung auf einem Tablet-PC

Als Ankerreiz wurden alle drei Scheinwerfer nacheinander dargeboten, um auf die maximal mögliche Blendung hinzuweisen. Das System mit dem blendfreien Abblendlicht wurde bewusst nicht gezeigt.

Beim Versuch selbst waren zunächst alle Scheinwerfer bei „nasser“ Fahrbahn zu bewerten. Die Scheinwerfer wurden in randomisierter Reihenfolge dargeboten (Reihenfolge, siehe Tabelle C.5, Anhang C). Zu jedem Scheinwerfer wurden drei Blendsituation à 3 sec gezeigt. Die Blendsituationen wurden in identischer Reihenfolge (Gesamt, Direkt, Indirekt) präsentiert, da eine geänderte Reihenfolge zu einer unterschiedlichen Helligkeitswahrnehmung führt (vgl. [Völ06]). Die Umbauzeit zwischen den Blendsituationen diente zur Readaptation ( $\approx 10$  sec). Nachdem ein Scheinwerfer in allen drei Blendsituationen dargeboten war, nahmen die Probanden am Tablet ihre Bewertung vor. Währenddessen wurde dem nächsten Probanden-Team der Scheinwerfer in den drei Blendsituationen präsentiert. Dieser Ablauf wiederholte sich, bis der Scheinwerfer von allen Probanden-Teams der Gruppe bewertet war. Anschließend wurde der nächste Scheinwerfer aufgebaut und der zuvor beschriebene Ablauf wiederholt. Dieser Ablauf wiederholte sich viermal, bis alle Scheinwerfer und das blendfreie Abblendlicht bewertet waren. Zusätzlich zur „nassen“ Fahrbahn bewerteten zwei der vier Gruppen ( $n = 14$ ) die Scheinwerfer und das blendfreie Abblendlicht bei trockener Fahrbahn.

Die erzielten Bewertungen wurden auf verschiedene Aspekte analysiert. Zunächst wurde geprüft, ob eine gemeinsame Auswertung der beiden Beobachterpositionen zulässig ist. Anschließend wurde untersucht, ob die unterschiedlichen Abblendlichtverteilungen zu unterschiedlichen Blendungsbewertungen führen. Des Weiteren wurde analysiert, wie unterschiedlich die Blendsituationen zwischen einer „nassen“ und trockenen Fahrbahn bewertet werden. Die Ergebnisse der trockenen Fahrbahn dienen zudem zum Abgleich mit bisherigen Forschungsergebnissen [SK08a]. Zuletzt wurde die Effektivität des blendfreien Abblendlichtes bewertet. Um zu prüfen, ob sich die Bewertungen der psychologischen Blendung statistisch signifikant unterscheiden, wurde die im folgenden beschriebene Signifikanzanalyse durchgeführt.

### ***Signifikanzanalyse***

Mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests wurden die an Beobachterposition 1 und 2 erhobenen Daten für alle Scheinwerfersysteme, Blendsituationen und Fahrbahnzustände auf Normalverteilung geprüft. Da nicht alle Stichproben normalverteilt gewesen sind, wurden bei der Signifikanzanalyse nicht-parametrische Tests eingesetzt. Zur Analyse, ob es einen Unterschied in der mittleren Bewertung der psychologischen Blendung aufgrund der Beobachterposition gibt, wurde der U-Test (Mann-Whitney) gewählt. Dieser Test wurde gewählt, da an Beobachterposition 1 und 2

nicht die selben Probanden (= unabhängige Stichproben) die Blendung bewertet haben. Beim Vergleich der mittleren Bewertungen der psychologischen Blendung aufgrund der Abblendlichtverteilungen und des Zustands der Fahrbahnoberfläche kam der Wilcoxon-Test zum Einsatz. Dieser Test wurde gewählt, da die Situationen jeweils von den selben Probanden (= abhängige Stichproben) bewertet wurden. Als Signifikanzniveau wurde  $\alpha = 0,05$  gewählt. Folgende Hypothesen wurden den Tests zugrunde gelegt:

- $H_0$ : Es besteht kein Unterschied in den mittleren Bewertungen.
- $H_1$ : Es besteht ein Unterschied in den mittleren Bewertungen.

Als erstes wurde geprüft, ob die Bewertung der psychologischen Blendung unabhängig von der Beobachterposition ist. Bei dynamischen Feldtests auf trockener Fahrbahn wurde nachgewiesen, dass keine statistisch signifikanten Unterschiede vorliegen [ZHK13]. Aufgrund der stark unterschiedlichen Blendbeleuchtungsstärken bei nasser Fahrbahn (Messwerte, siehe Abbildung C.1, Anhang C), sollten die Ergebnisse von ZYDEK et al. [ZHK13] für eine nasse Fahrbahn verifiziert werden. Dabei wurden alle Scheinwerfersysteme und Blendsituationen getrennt analysiert.

Des Weiteren wurde geprüft, ob die Bewertungen der psychologischen Blendung zwischen den getesteten Scheinwerfern statistisch signifikant unterschiedlich sind. Dies wurde wiederum für alle drei dargebotenen Blendsituationen geprüft.

Zuletzt wurde analysiert, ob zwischen trockener und nasser Fahrbahn statistisch signifikante Unterschiede vorliegen. Es genügt hierbei, die Blendsituation „Gesamt“ und „Indirekt“ zu betrachten. Diese werden aufgrund der erhöhten Vorwärtsreflexion maßgeblich beeinflusst.

## 6.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden entsprechend der beiden Teilversuche nachfolgend zweigeteilt angeführt.

### **Teilversuch I: Adaptationsleuchtdichte, Erkennbarkeitsentfernung und physiologische Blendung**

In Abbildung 6.12 sind die innerhalb der Ellipse ( $2^\circ$  vertikal,  $10^\circ$  horizontal) ermittelten Adaptationsleuchtdichten für die beiden analysierten Fixationsdistanzen gegenübergestellt. Die kürzere Fixationsdistanz führt grundsätzlich zu höheren Adaptationsleuchtdichten. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass ein größerer Anteil der Vorfeldausleuchtung in der Ellipse liegt. Aus der Lichtverteilung der beiden Xenon-Scheinwerfer resultiert die höchste Adaptationsleuchtdichte. Die Lichtverteilung der LED-Scheinwerfer führt zur geringsten Adaptationsleuchtdichte und ist dabei nahezu um den Faktor 2 niedriger als beim Xenon-Scheinwerfer. Die ermittelten Adaptationsleuchtdichten sind auf die Beleuchtungsstärkeverteilungen der getesteten Scheinwerfer zurückzuführen (Beleuchtungsstärkeverteilungen, siehe Abbildung B.6, Anhang B).

Abbildung 6.12 verdeutlicht zudem den Effekt der „nassen“ Fahrbahnoberfläche auf die Adaptationsleuchtdichte. Diese ist je nach Fixationsentfernung um 40% - 65% reduziert. Bei näherer

Betrachtung zeigt sich, dass die Adaptationsleuchtdichte bei 46 m und trockener Fahrbahn annähernd der Adaptationsleuchtdichte bei 31 m und „nasser“ Fahrbahn entspricht. Dies ist bei allen drei getesteten Scheinwerfern der Fall. Folglich könnte eine Anpassung der Fixationsentfernung hin zu kürzeren Distanzen in der vergleichbaren Adaptationsleuchtdichte begründet liegen. Diese Hypothese müsste durch weiterführende Studien analysiert werden.

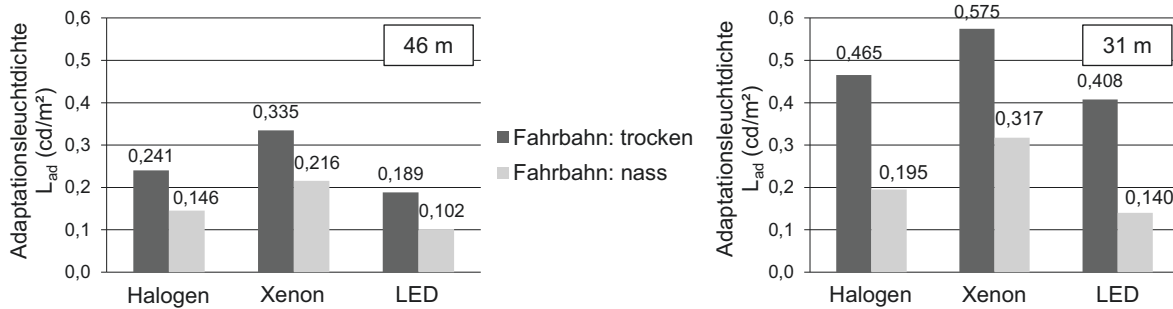


Abbildung 6.12: Adaptationsleuchtdichte bei trockener und „nasser“ Fahrbahn in Abhängigkeit der eigenen Fahrbahnausleuchtung und der Fixationsdistanz (links: 46 m, rechts: 31 m); Angenommener Adaptationsbereich:  $2^\circ/10^\circ$ -Ellipse)

Abbildung 6.13 veranschaulicht den Effekt eines entgegengerichteten Scheinwerferpaares auf die Adaptationsleuchtdichte. Die Adaptationsleuchtdichte, die durch das Scheinwerferlicht des eigenen Fahrzeugs verursacht wird, ist dabei vernachlässigbar. Die „nasse“ Fahrbahn und die sich

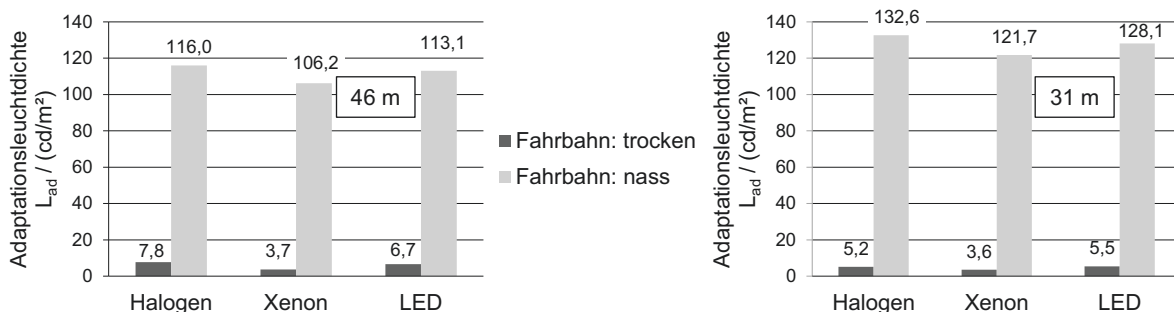


Abbildung 6.13: Adaptationsleuchtdichte bei trockener und „nasser“ Fahrbahn in Abhängigkeit der Scheinwerferpaare eines entgegengerichteten Fahrzeuges und der Fixationsdistanz (links: 46 m, rechts: 31 m); Angenommener Adaptationsbereich:  $2^\circ/10^\circ$ -Ellipse)

ausbildenden „Blendkeulen“ führen zu Adaptationsleuchtdichten, die gegenüber der trockenen Fahrbahn um das 17- bis 24fache erhöht sind. In solchen Situationen ist das Auge nicht mehr mesopisch, sondern photopisch adaptiert. Auch hier zeigen sich in Abhängigkeit des entgegengerichteten Scheinwerferpaares Unterschiede in der Adaptationsleuchtdichte. Das entgegengerichtete Halogen-Scheinwerferpaar verursacht bei beiden analysierten Fixationsentfernungen die höchste Adaptationsleuchtdichte. Das Xenon-Scheinwerferpaar führt entgegen der Erwartung zur

geringsten Erhöhung. Die verursachte Adaptationsleuchtdichte durch das LED-Scheinwerferpaar ist eher mit dem Halogen-, als mit dem Xenon-Scheinwerferpaar vergleichbar.

Abbildung 6.14 (links) zeigt die ermittelten Objektkontraste der am Fahrbahnrand aufgestellten Sehtafeln. Der Objektkontrast wurde an der zur Fahrbahnmitte gerichteten linken Kante der Sehtafel bewertet (siehe Abbildung 6.15). An dieser Kante war der Effekt der „nassen“ Fahrbahn am deutlichsten zu erkennen. Die „nasse“ Fahrbahn führt grundsätzlich zu einer Erhöhung des Objektkontrastes. Ausnahme stellt der Objektkontrast in 31 m Entfernung bei Anleuchtung durch die Xenon-Scheinwerfer dar.

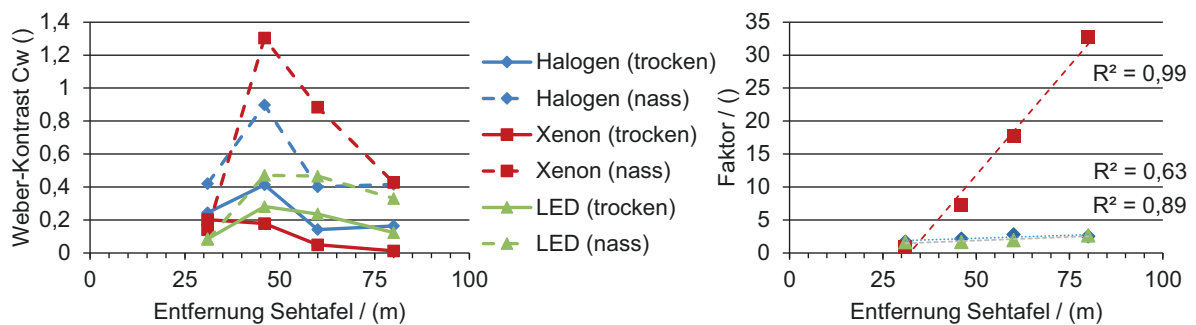


Abbildung 6.14: Ermittelte Objektkontraste und Faktoren in Abhängigkeit der Entfernung und des Scheinwerfersystems bei trockener und „nasser“ Fahrbahn. Die Objektkontraste wurden dabei an der zur Fahrbahnmitte gerichteten Kante der Sehtafel ermittelt. (Messwerte, siehe Tabelle C.7, Anhang C)

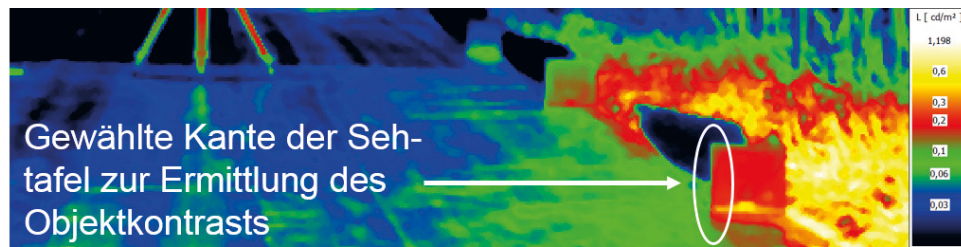


Abbildung 6.15: Ausschnitt einer Leuchtdichteaufnahme zur Visualisierung der gewählten Kante der Sehtafel zur Ermittlung des Objektkontrasts

Die in Abbildung 6.14 (rechts) dargestellten Faktoren zwischen „nasser“ und trockener Fahrbahn verdeutlichen den Effekt der Abblendlichtverteilung auf den Objektkontrast. Mit zunehmender Objektentfernung steigt der Objektkontrast bei allen Systemen stetig an. Das Xenonsystem hebt sich dabei stark vom Halogen- und LED-System ab. Die Unterschiede sind auf die Lichtverteilungen der Scheinwerfer zurückzuführen. Folglich ist davon auszugehen, dass Objekte bei nasser Fahrbahn in Abhängigkeit der Abblendlichtverteilung bei sonst gleichbleibenden Bedingungen früher wahrgenommen werden. Diese Hypothese müsste in weiterführenden Studien mit Probanden untersucht werden.

Abbildung 6.16 zeigt die an Beobachterposition 1 gemessene vertikale Blendbeleuchtungsstärke  $E_{V\_bl}(lx)$ . Bei nasser Fahrbahn werden in Abhängigkeit der Scheinwerferanbauposition stark unterschiedliche Werte gemessen. Bei trockener Fahrbahn sind diese Unterschiede nahezu vernachlässigbar, jedoch systemabhängig (vgl. [SK08a]). Die gemessene Beleuchtungsstärke des rechten Xenon-Scheinwerfers ist kritisch zu betrachten. Messungen am Goniophotometer zeigten stark unterschiedliche Werte zwischen dem analysierten und einem baugleichen Xenon-Scheinwerfer (Messwerte, siehe Tabelle C.5 (Xenon X4), Anhang C). Da Serienscheinwerfer untersucht wurden, ist im Alltag durchaus von einer solchen Streuung auszugehen.

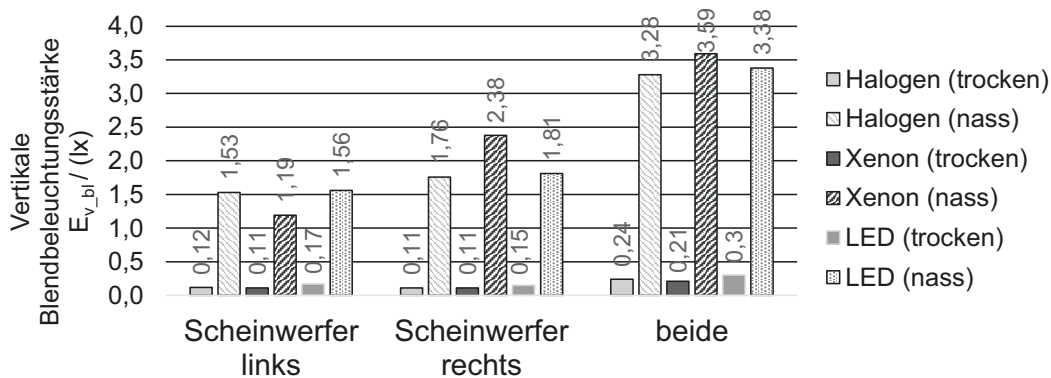


Abbildung 6.16: Vertikale Blendbeleuchtungsstärke  $E_{V\_bl}(lx)$  in Abhängigkeit des Blendscheinwerfers und des Fahrbahnzustandes in einer Begegnungsentfernung von 49,3 m

In Abbildung 6.17 sind die ermittelten äquivalenten Schleierleuchtdichten  $L_{v\_eq}(cd/m^2)$  gegenübergestellt. Diese wurden mit Hilfe von Gleichung (2.4) und den gemessenen Blendbeleuchtungsstärken berechnet. Die Ergebnisse belegen, dass die Scheinwerfer aufgrund ihrer Anbauposition und der systembedingten Lichtverteilung zu einer unterschiedlichen physiologischen Blendung führen. Insbesondere bei der „nassen“ Fahrbahn ist der Effekt deutlich erkennbar. Dies ist auf den Einfluss der „Blendkeulen“ zurückzuführen.

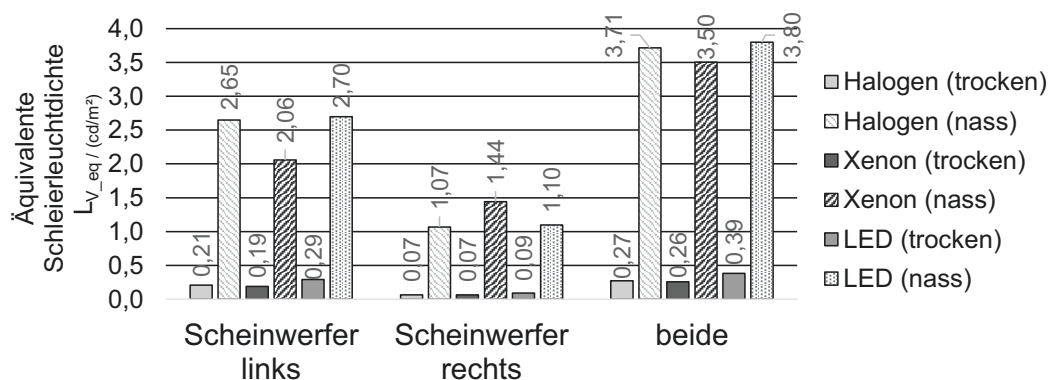


Abbildung 6.17: Äquivalente Schleierleuchtdichte  $L_{v\_eq}(cd/m^2)$  in Abhängigkeit der Scheinwerferanbauposition und des Fahrbahnzustandes

Die aufgestellte Hypothese, dass der erhöhte Objektkontrast die äquivalente Schleierleuchtdichte kompensiert, wird nicht bestätigt, wie Tabelle 6.2 verdeutlicht. Trotz erhöhtem Objektkontrast bei „nasser“ Fahrbahn wird aufgrund der äquivalenten Schleierleuchtdichte nicht der benötigte Kontrast errechnet, um die gleichen Sichtbedingungen wie bei trockener Fahrbahn ohne Blendquelle zu erzielen. Sofern Verkehrsteilnehmer das Objekt bei trockener Fahrbahn und den getesteten Versuchsbedingungen wahrnehmen würden, wäre dies bei „nasser“ Fahrbahn und vorhandener Blendquelle nicht mehr der Fall. Um diese theoretische Analyse zu verifizieren, wären weiterführende Untersuchungen mit Probanden erforderlich.

Tabelle 6.2: Vergleich des Weber-Kontrasts an der Sehtafel in 80 m Entfernung bei Anleuchtung durch die Xenon-Scheinwerfer (ohne und mit Blendung durch ein entgegenkommendes LED-Scheinwerferpaar)

Zustand der Fahrbahn	Umfeldleuchtdichte (cd/m <sup>2</sup> )	Objektleuchtdichte (cd/m <sup>2</sup> )	Weber-Kontrast ohne Blendung ( )	Weber-Kontrast mit Blendung ( )
trocken	0,0526	0,0533	0,0133	
„nass“	0,0156	0,0223	0,4295	0,0019

### Teilversuch II: Psychologische Blendung und Effekt eines blendfreien Abblendlichts

Die psychologische Blendung wurde für beide Beobachterpositionen (1, 2) gemeinsam ausgewertet, da zwischen den Positionen keine signifikanten Unterschiede ermittelt wurden, wie Tabelle 6.3 belegt.

Tabelle 6.3: Signifikanzanalyse - Vergleich der Mittelwerte der psychologischen Blendung von Beobachterposition 1 und 2 bei „nasser“ Fahrbahn

Scheinwerfer	Vergleich – Beobachterposition (1, 2)											
	Halogen			Xenon			LED			Blendfreies Abblendlicht		
Blendsituation	Gesamt	Direkt	Indirekt	Gesamt	Direkt	Indirekt	Gesamt	Direkt	Indirekt	Gesamt	Direkt	Indirekt
p-Wert ( $\alpha = 0,05$ )	0,818	0,533	0,872	0,836	0,189	1,000	0,982	0,240	0,434	0,496	0,209	0,961

In Abbildung 6.18 sind die Bewertungen der psychologischen Blendung in Abhängigkeit des getesteten Scheinwerfers und der jeweiligen Blendsituation bei „nasser“ Fahrbahn dargestellt. Die erzielten Ergebnisse belegen, dass sowohl die Gesamtblendung als auch die indirekte Blendung bei allen Serienscheinwerfern im arithmetischen Mittel niedriger als 5 de Boer-Stufen bewertet werden. Dies bedeutet nach de Boer ein Unterschreiten der gerade noch zulässigen Bewertung. Das blendfreie Abblendlicht wird in beiden Blendsituationen hingegen  $> 7$  bewertet. Dies entspricht nach de Boer einer „akzeptablen“ bis „unmerklichen“ Bewertung der Blendsituation. Die psychologische Blendung ist aufgrund des blendfreien Abblendlichtes um drei de Boer-Stufen reduziert, was den gewünschten Effekt bestätigt, der ebenfalls signifikant ist (siehe Tabelle 6.4).



Zudem belegt Abbildung 6.18, dass der Blendsituation „direkt“ und damit der direkten Blendung bei „nasser“ Fahrbahn hinsichtlich der psychologischen Blendung eine untergeordnete Rolle beizumessen ist. Unabhängig von den getesteten Serienscheinwerfern ist die Bewertung der Blendsituation „Gesamt“ vergleichbar mit der Blendsituation „Indirekt“. Dies verdeutlicht, dass die psychologische Blendung bei „nasser“ Fahrbahn maßgeblich durch den indirekten Blendanteil verursacht wird.

Des weiteren bestätigt Abbildung 6.18 die aufgestellte Hypothese, dass die psychologische Blendung in Abhängigkeit der Abblendlichtverteilungen bei „nasser“ Fahrbahn unterschiedlich bewertet wird. Wenngleich die Unterschiede statistisch nicht signifikant sind (siehe Tabelle 6.4), verursacht die Lichtverteilung des Halogen-Scheinwerfers die stärkste psychologische Blendung und die des LED-Scheinwerfers die geringste. Die Reihenfolge der Bewertung der psychologischen Blendung widerspricht allerdings den während der Studie gemessenen Blendbeleuchtungsstärken bei „nasser“ Fahrbahn (Halogen = 1,87 lx; Xenon = 1,12 lx; LED = 1,47 lx; Messwerte, siehe Tabelle C.4, Anhang C).

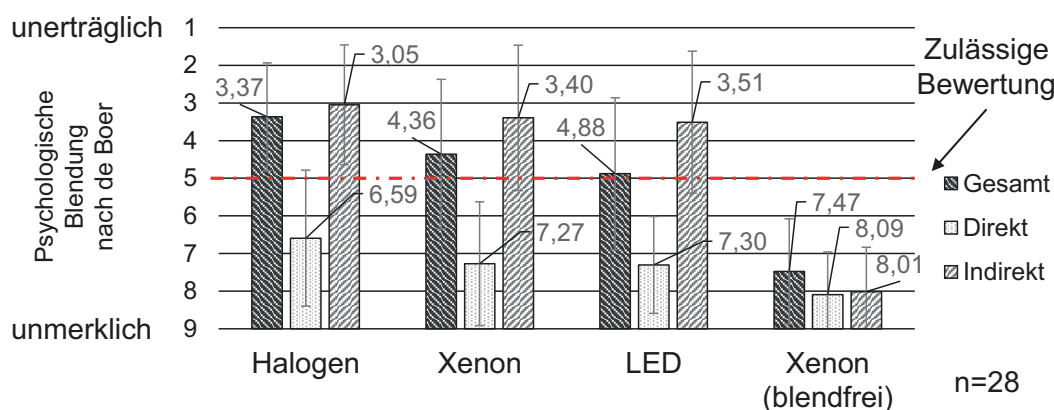


Abbildung 6.18: Bewertung der psychologischen Blendung in Abhängigkeit des getesteten Scheinwerfers und der jeweiligen Blendsituation bei „nasser“ Fahrbahn

Tabelle 6.4: Signifikanzanalyse - Vergleich der Mittelwerte der psychologischen Blendung in Abhängigkeit der Abblendlichtverteilung der Scheinwerfer bei „nasser“ Fahrbahn

Vergleich – Lichtverteilung der Scheinwerfer bei spiegelnder Fahrbahn									
	Halogen – Xenon			Halogen – LED			Xenon – LED		
Blendsituation	Gesamt	Direkt	Indirekt	Gesamt	Direkt	Indirekt	Gesamt	Direkt	Indirekt
p-Wert ( $\alpha = 0,05$ )	0,036	0,307	0,108	0,076	0,557	0,851	0,345	0,832	0,701
	Halogen – blendfreier Xenon			Xenon – blendfreier Xenon			LED – blendfreier Xenon		
Blendsituation	Gesamt	Direkt	Indirekt	Gesamt	Direkt	Indirekt	Gesamt	Direkt	Indirekt
p-Wert ( $\alpha = 0,05$ )	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,078	< 0,0001	< 0,0001	0,035	< 0,0001



Abbildung 6.19 lässt erkennen, dass die psychologische Blendung bei trockener Fahrbahn deutlich geringer blendend bewertet wird als bei der „nassen“ Fahrbahn (vgl. Abbildung 6.18). Bei der trockenen Fahrbahn wird die Blendsituation „Direkt“ bei allen vier Scheinwerfern am stärksten blendend bewertet. Die Blendsituation „Gesamt“ erhält nahezu identische Bewertungen. Die Blendsituation „Indirekt“ wird hingegen am wenigsten blendend empfunden. Folglich wird die psychologische Blendung bei trockener Fahrbahn primär durch den direkten Blendanteil verursacht, weshalb das über die Fahrbahn reflektierte Licht bei trockener Fahrbahn vernachlässigbar ist.

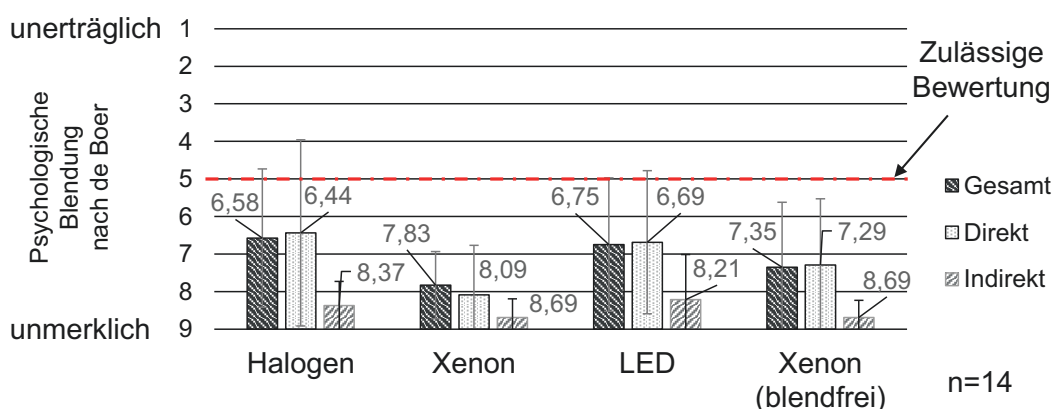


Abbildung 6.19: Bewertung der psychologischen Blendung in Abhängigkeit des getesteten Scheinwerfers und der jeweiligen Blendsituation bei trockener Fahrbahn

Tabelle 6.5 bestätigt, dass im Falle einer „nassen“ Fahrbahn insbesondere das über die Fahrbahn reflektierte Licht zu berücksichtigen ist. Aufgrund der „nassen“ Fahrbahn und der indirekten Blendung wird die psychologische Blendung signifikant stärker blendend empfunden.

Tabelle 6.5: Signifikanzanalyse - Vergleich der Mittelwerte der psychologischen Blendung in Abhängigkeit des Zustandes der Fahrbahn (trocken, „nass“)

Scheinwerfer	Vergleich – Zustand der Fahrbahn (trocken, „nass“)											
	Halogen			Xenon			LED			Blendfreies Abblendlicht		
Blendsituation	Gesamt	Direkt	Indirekt	Gesamt	Direkt	Indirekt	Gesamt	Direkt	Indirekt	Gesamt	Direkt	Indirekt
p-Wert ( $\alpha = 0,05$ )	0,003	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,006	0,092	0,000	0,791	0,003	1,000

### 6.2.3 Fazit

Die Untersuchungen bestätigen, dass die Abblendlichtverteilungen verschiedener Scheinwerfersysteme zu unterschiedlichen Bewertungen der psychologischen Blendung führen. Obwohl alle drei Abblendlichtverteilungen die gesetzlichen Vorgaben erfüllen, resultieren zwischen dem Halogen- und Xenon-Scheinwerfer bei der Blendsituation „Gesamt“ bei „nasser“ Fahrbahn sogar signifikante Unterschiede in der Bewertung der psychologischen Blendung (siehe Abbildung 6.18).

Insbesondere die indirekte Blendung bestimmt dabei die psychologische Blendung. Bei trockener Fahrbahn dominiert hingegen die direkte Blendung (vgl. Abbildung 6.18 mit Abbildung 6.19). Aufgrund des signifikanten Einflusses des indirekten Blendanteils auf die psychologische Blendung bei einer „nassen“ Fahrbahn (siehe Tabelle 6.5) ist die Abblendlichtverteilung bei der Blendungsbewertung unbedingt zu berücksichtigen.

Zudem zeigen die Untersuchungen die Effektivität eines blendfreien Abblendlichts, das neben einer deutlichen Reduzierung der Blendbeleuchtungsstärke auch eine statistisch signifikante Reduzierung der psychologischen Blendung bewirkt (vgl. Tabelle 6.4). Folglich trägt ein solches System zur Steigerung der Verkehrssicherheit bei. Durch eine adaptive Anpassung der Abblendlichtverteilung im Passiervorgang ist eine Reduzierung der physio- und psychologischen Blendung auf das Niveau einer trockenen Fahrbahn denkbar.

Hinsichtlich der aufgestellten Hypothesen wurden folgende Ergebnisse erzielt: Der Objektkontrast variiert in Abhängigkeit der Abblendlichtverteilung und steigt mit zunehmender Entfernung der Sehtafel stetig an (vgl. Abbildung 6.14 rechts). Das Abblendlicht des Xenon-Scheinwerfers weist dabei den stärksten Effekt auf. Der stetige Anstieg des Objektkontrastes ist auf die in Kapitel 5.2 erzielten Ergebnisse zurückzuführen. Wie Abbildung 6.20 veranschaulicht, wird bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche ein Objekt gleicher Höhe in größeren Entfernungen durch einen größeren Bereich vor dem Objekt angeleuchtet. Folglich wird mehr Licht auf das Objekt reflektiert. Zusätzlich erscheint die Umgebung aufgrund der höheren gerichteten Reflexion dunkler, was eine Erhöhung des Objektkontrastes begünstigt. Inwieweit dies zu einer tatsächlichen Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung beiträgt, wäre in weiterführenden Studien zu prüfen. Die erste Hypothese wurde somit teilweise bestätigt.

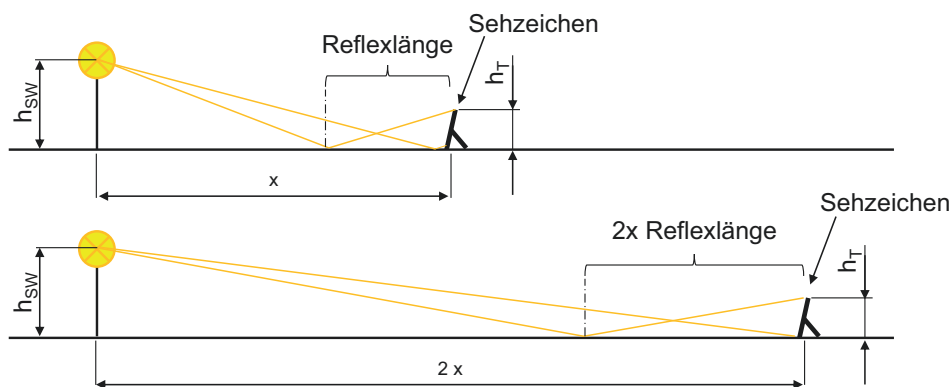


Abbildung 6.20: Veranschaulichung der Ursache für den stetigen Anstieg des Objektkontrastes mit zunehmender Entfernung

Die Hypothese, der aufgrund einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche erhöhte Objektkontrast würde eine Kompensation der äquivalenten Schleierleuchtdichte ermöglichen, wurde nicht bestätigt. Der ermittelte Objektkontrast bei „nasser“ Fahrbahn und vorhandener Blendquelle beträgt nur  $1/7$  des Objektkontrastes bei trockener Fahrbahn (vgl. Tabelle 6.2). Ohne Blendquelle ist der

Objektcontrast bei „nasser“ Fahrbahn durch die Anleuchtung mit den Xenon-Scheinwerfern allerdings um mehr als das 32-fache erhöht. Eine gezielte Anpassung der Lichtverteilung in Form des getesteten blendfreien Abblendlichtes und zusätzlicher Ausleuchtung der Bereiche, die zu einer indirekten Anleuchtung von Objekten am Fahrbahnrand beitragen, würde eine deutliche Verbesserung der Sichtbedingungen ermöglichen. Diese Hypothese müsste in Form von Probandenstudien verifiziert werden.

Die beiden weiteren Hypothesen wurden bestätigt. Die erzielten Ergebnisse belegen, dass in Abhängigkeit der Abblendlichtverteilung bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche die psychologische Blendung unterschiedlich bewertet wird. Ursache sind die sich auf der Fahrbahn ausbildenden „Blendkeulen“, die systembedingt variieren. Wenngleich die unterschiedlichen Bewertungen zwischen den Abblendlichtverteilungen statistisch nicht signifikant sind, wird der LED-Scheinwerfer im Vergleich zu den anderen beiden um bis zu 1,5 Stufen weniger blendend empfunden (siehe Abbildung 6.18). Die Abblendlichtverteilung des Halogen-Scheinwerfers wird am stärksten blendend empfunden. Dies korreliert mit den in Kapitel 5.4 analysierten Reflexlinien, bzw. „Blendkeulen“. Darüber hinaus beweisen die Ergebnisse, dass die indirekte Blendung bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche stärker blendend empfunden wird als die direkte Blendung bei trockener Fahrbahn. Dies verdeutlicht den Handlungsbedarf, mit Hilfe eines adaptiven blendfreien Abblendlichts die indirekte Blendung zu minimieren.

Zudem wurden im Rahmen der durchgeführten Teilversuche weitere Ergebnisse erzielt. Diese werden nachfolgend diskutiert.

### **Teilversuch I**

In Abhängigkeit der getesteten Scheinwerfer und deren Lichtverteilungen resultieren unterschiedliche Adaptationsleuchtdichten. Dabei sind die Adaptationsleuchtdichten bei trockener und „nasser“ Fahrbahn aufgrund der angepassten Fixationsentfernung von 46 m nach 31 m nahezu gleich. Dies könnte unter anderem eine Begründung für die Verkürzung der Fixationsentfernung von 46 m auf 31 m bei „nasser“ Fahrbahn sein.

Die ermittelten Objektcontraste spiegeln nicht die Erkennbarkeitsentfernungen wider, die anhand der Isolux-Linien der Lichtverteilungen zu erwarten waren. Eine Bewertung der Erkennbarkeitsentfernung anhand von Isoluxlinien wird daher als kritisch erachtet (vgl. [Völ06]). Es empfiehlt sich der Einsatz von Methoden, die gleichzeitig die Umgebungsbedingungen und deren Einfluss auf den Objektcontrast berücksichtigen ([MKS<sup>+</sup>13], [Muz14]).

### **Teilversuch II**

Die psychologische Blendung war an zwei Beobachterpositionen zu bewerten. Der Abstand zwischen den Positionen war dabei vergleichbar mit dem zwischen Fahrer und Beifahrer eines Pkws. Der Unterschied zwischen den Bewertungen der psychologischen Blendung aus Beobachterposition 1 und 2 ist nicht signifikant (vgl. Tabelle 6.3). Wie bereits für eine trockene Fahrbahn nachgewiesen (vgl. [ZHK13]), ist es somit auch bei einer „nassen“ Fahrbahn zulässig, die Bewertungen der psychologischen Blendung bei der Auswertung zusammenzulegen.

---

Eine mögliche Erklärung dafür, dass der Halogen-Scheinwerfer bei „nasser“ Fahrbahn die stärkste psychologische Blendung verursacht, liefert der Abgleich mit den in Kapitel 5.4 untersuchten Reflexlinien, die sich im Passiervorgang auf der Fahrbahn ausbilden. Der Halogen-Scheinwerfer weist entlang der Reflexlinie einen kontinuierlichen Verlauf der Beleuchtungsstärke auf und besitzt anders als die beiden anderen Scheinwerfer kein stark ausgeprägtes Maximum entlang der Reflexlinie (vgl. Abbildung B.4, Anhang B). Dies spiegelt sich unter anderem bei den in Teilversuch I ermittelten Adaptationsleuchtdichten wider, die bei „nasser“ Fahrbahn und entgegenkommenden Halogen-Scheinwerfern am höchsten ist (vgl. Abbildung 6.13). Folglich ist nicht das Maximum, sondern die gesamte Reflexlinie bei der Bewertung der physio- und psychologischen Blendung zu berücksichtigen. Aufgrund des signifikanten Einflusses der indirekten Blendung bei „nasser“ Fahrbahn auf die psychologische Blendung (vgl. Tabelle 6.5), ist diese bei künftigen Bewertungsmethoden und der Auslegung von Scheinwerfern und heutiger adaptiver Lichtverteilungen zu berücksichtigen.

Die erzielten Ergebnisse bei trockener Fahrbahn sind vergleichbar mit Ergebnissen von SCHILLER und KHANH [SK08a]. Abweichungen der Absolutwerte sind auf das unterschiedliche Versuchsdesign zurückzuführen und auf die Tatsache, dass bei der eigenen Studie zunächst die „nasse“ und anschließend die trockene Fahrbahn dargeboten wurde. Die trockene Fahrbahn wurde somit relativ zur nassen bewertet. Der Offset zwischen der trockenen und „nassen“ Fahrbahn eignet sich als Indikator für die Zunahme der psychologischen Blendung.

Die Lichtfarbe bzw. das Spektrum der Scheinwerfer wurde bei der beschriebenen Studie nicht berücksichtigt. Hierzu wurde eine separate Studie durchgeführt, die im folgenden Kapitel beschrieben wird.

### 6.3 Lichtfarbe des Abblendlichtes

Das Abblendlicht heutiger Scheinwerfer wird unter Einsatz von Halogenlampen, Xenon-Gasentladungslampen oder LED-Leuchtmitteln realisiert. Aufgrund der unterschiedlichen Spektren der Leuchtmittel, wird die Ausleuchtung der Fahrbahn unterschiedlich hell wahrgenommen. Das Abblendlicht eines LED-Scheinwerfers wird beispielsweise um 20% heller wahrgenommen als das eines Xenon-Scheinwerfers mit vergleichbarer Lichtverteilung ([HL11]; [RL13]). Dies ist auf die spektrale Hellempfindlichkeit des visuellen Systems zurückzuführen, die unter skotopischen Bedingungen hin zu kürzeren Wellenlängen verschoben ist (sog. Purkynie-Effekt). Neben der unterschiedlichen Wahrnehmung der eigenen Ausleuchtung wird häufig der Einfluss des Spektrums der Scheinwerfer auf die Blendung im nächtlichen Straßenverkehr untersucht (u.a. [LIS<sup>+</sup>07]; [SK08b]; [SSHK09]).

Bei den bisherigen Untersuchungen dieser Arbeit blieb der spektrale Einfluss unberücksichtigt. Daher betrachtet die nachfolgende Studie den Effekt der Lichtfarbe des Abblendlichtes auf die Bewertung der Fahrbahnausleuchtung und der psychologischen Blendung im Falle einer spiegel-

den Fahrbahnoberfläche. Ziel der Untersuchung ist, Empfehlungen hinsichtlich der Lichtfarbe für das adaptive blendfreie Abblendlicht bei spiegelnden Fahrbahnoberflächen abzuleiten.

### 6.3.1 Methodik

Der Einfluss der Lichtfarbe des Abblendlichts wurde zweigeteilt untersucht. Im ersten Teil war die Ausleuchtung der Fahrbahn aus Fahrerperspektive zu beurteilen. Im zweiten Teil war die psychologische Blendung aus der Perspektive des Gegenverkehrs zu bewerten. Ähnlich wie in Kapitel 6.2 wurden auch hier getrennte Blendsituationen dargeboten. Die Blendsituation „Direkt“ entspricht dabei dem Scheinwerfer und die Blendsituation „Indirekt“ dem über die Fahrbahn reflektierten Lichtstrom.

Nachfolgend werden die Versuchsparameter angeführt, anschließend der Versuchsaufbau vorgestellt und zuletzt auf die Versuchsdurchführung und die Signifikanzanalyse eingegangen.

#### Versuchsparameter

Dem Versuch lagen die in Tabelle 6.6 aufgeführten Parameter zugrunde. Das Abblendlicht wurde durch einen Prototypen-Scheinwerfer des Leichtbaufahrzeuges InEco realisiert. Als Leuchtmittel kommt in dem Reflexionssystem eine High-Power-LED zum Einsatz (Datenblatt der LED, siehe Abbildung C.3, Anhang C).

Tabelle 6.6: Parameter der beiden Teilversuche (Weitere Daten zu den genutzten Filtern, siehe Abbildung C.4 und Abbildung C.5, Anhang C)

Teil	Unabhängige Variablen	Abhängige Variablen
I	<b>Lichtfarbe des Abblendlichts</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Standard</li> <li>• Neutraldichtefilter</li> <li>• Blaufilter</li> <li>• Gelb-Orange-Filter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bewertung der Fahrbahnausleuchtung ()</li> </ul>
II	<b>Lichtfarbe des Abblendlichts</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Standard</li> <li>• Neutraldichtefilter</li> <li>• Blaufilter</li> <li>• Gelb-Orange-Filter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Psychologische Blendung nach de Boer ()</li> </ul>
	<b>Blendsituation</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• "Direkt"</li> <li>• "Indirekt"</li> </ul>	

Die Lichtfarbe des Abblendlichts wurde mit Hilfe von Farbfiltern variiert, die in der Veranstaltungs- und Lichttechnik Einsatz finden (Filter, siehe Tabelle 6.6). Diese wurden kurz vor dem Scheinwerfer in den Strahlengang gebracht. Der Neutraldichtefilter diente dazu, den ursprünglichen Lichtstrom im gleichen Maße zu reduzieren ( $\approx 75\%$ ) wie die Blau- und Gelb-Orange-Filter, ohne dabei die Lichtfarbe zu verändern. Wird im weiteren Verlauf von dieser Lichtfarbe gesprochen, deren Intensität durch den Neutraldichtefilter reduziert wurde, so wird diese als „weiße-reduzierte“ Lichtfarbe bezeichnet.

Die spiegelnde Fahrbahndeckschicht wurde durch Aufbringen einer transparenten Kunststoffolie realisiert (vgl. Kapitel 6.2). Dabei wurde die Kunststoffolie primär auf den Bereich aufgebracht,

in dem sich die Reflexlinie auf der Fahrbahn ausbildet. Anders als bei einer nassen Fahrbahn und deren Abtrocknungsverhalten, gewährleistet die Kunststoffolie bei jedem Probanden gleiche Bedingungen.

Um sicherzustellen, dass neben der Lichtfarbe alle anderen Einflussgrößen konstant blieben, wurde während der Studie die vertikale Beleuchtungsstärke  $E_v(lx)$  direkt neben der Beobachterposition auf Augenhöhe ( $z = 1,2\text{ m}$ ) gemessen. Zusätzlich wurde mit der LMK aus Beobachterposition die mittlere Leuchtdichte der Fahrbahn bzw. der Blendkeule ermittelt.

Tabelle 6.7 und Tabelle 6.8 belegen, dass durch den Einsatz der Farb- und des Neutraldichtefilters hinsichtlich Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte konstante Bedingungen gewährleistet wurden. Folglich waren die möglichen Einflussgrößen auf ein Minimum reduziert und es wurde nur der Effekt der Lichtfarbe analysiert. Der eingesetzte Neutraldichtefilter erzielt den gewünschten Effekt und reduziert die Blendbeleuchtungsstärke annähernd auf den selben Wert wie die Farbfilter.

Tabelle 6.8 zeigt, dass die mittlere Leuchtdichte im Bereich der Reflexlinie annähernd unabhängig vom gewählten Farbfilter ist. Es wurden zwei Leuchtdichteschwellen ( $50\text{ cd/m}^2$ ;  $100\text{ cd/m}^2$ ) analysiert, welche die Reflexlinien vom Umfeld abgrenzten. Die mittleren Leuchtdichten unterscheiden sich dabei maximal um  $42,3\text{ cd/m}^2$  für die  $50\text{ cd/m}^2$ -Schwelle und maximal um  $60\text{ cd/m}^2$  für die  $100\text{ cd/m}^2$ -Schwelle. Da innerhalb des Bereichs Leuchtdichten  $> 15000\text{ cd/m}^2$  gemessen wurden, sind diese Abweichungen vernachlässigbar.

Tabelle 6.7: Mittlere vertikale Beleuchtungsstärke (inklusive Standardabweichung;  $n = 10$ ) in Abhängigkeit der Lichtfarbe und der dargebotenen Blendsituation (vgl. [Schz13])

Lichtfarben Scheinwerfer	Blendsituation "Direkt"		Blendsituation "Indirekt"	
	Mittlere vertikale Blendbeleuchtungsstärke $E_v / (lx)$	empirische Standardabweichung $\sigma / (lx)$	Mittlere vertikale Blendbeleuchtungsstärke $E_v / (lx)$	empirische Standardabweichung $\sigma / (lx)$
"weiß-reduziert"	0,5	0,04	0,38	0,03
gelb	0,48	0,07	0,4	0,03
blau	0,53	0,04	0,38	0,04
weiß 1	1,97	0,07	1,56	0,15
weiß 2	1,9	0,12	1,51	0,09

Tabelle 6.8: Mittlere Leuchtdichte der „Blendkeulen“ bei spiegelnder Fahrbahn in Abhängigkeit der Lichtfarbe des Abblendlichtes (vgl. [Schz13])

Lichtfarbe	Mittlere Leuchtdichte ( $\text{cd/m}^2$ ) der „Blendkeule“	
	Schwelle $50\text{ cd/m}^2$	Schwelle $100\text{ cd/m}^2$
"weiß-reduziert"	625,4	921,0
gelb	595,5	876,8
blau	583,1	861,7
weiß ohne Filter	1123	1672



### Versuchsaufbau

Der schematische Versuchsaufbau inklusive aller relevanten Abmaße ist in Abbildung 6.21 dargestellt. Der laterale Versatz zwischen Beobachter und Scheinwerfer betrug 2,13 m. Dieser Versatz resultiert aus einer angenommenen einfachen Scheinwerferanbaubreite von 0,6 m und der höchsten Wahrscheinlichkeit eines entgegenkommenden Augenpaares gemäß CIE188:2010 [CIE10]. Beobachterhöhe, Scheinwerferanbauhöhe und Blendentfernung waren identisch zu dem Versuch aus Kapitel 6.2 (S. 96). Anders als bei dem Versuchsaufbau aus Kapitel 6.2 wurde zur Darbietung der Blendsituationen das Gesichtsfeld durch eine Blendenkonstruktion geteilt, die direkt vor dem Beobachter aufgestellt gewesen ist (siehe Abbildung 6.21).

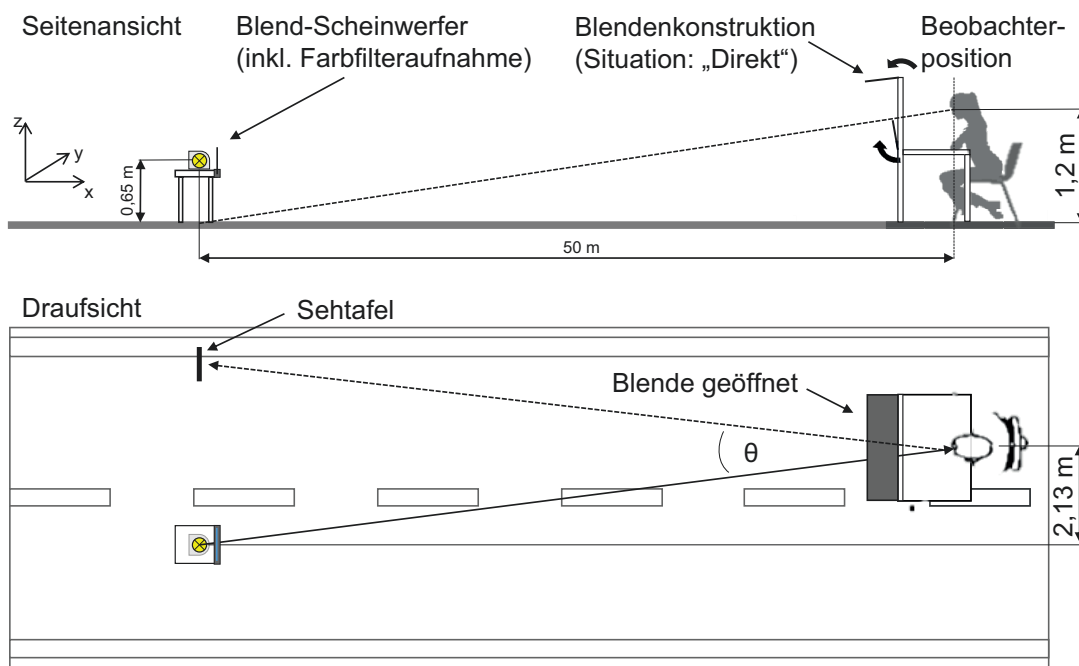


Abbildung 6.21: Schematischer Versuchsaufbau zur Bewertung des Einflusses der Lichtfarbe des Abblendlichtes (Dargestellte Blendsituation: „Direkt“, vgl. [Schz13])

### Versuchspersonen

Insgesamt nahmen zehn Probanden (9 x männlich, 1 x weiblich) freiwillig an der Studie teil. Der Altersdurchschnitt betrug 29,8 Jahre, wobei die jüngste Person 23 Jahre und die älteste 46 Jahre alt gewesen ist. Die Zuteilung von Identifikationsnummern gewährleistete eine Anonymisierung und lässt nachträglich keine Rückschlüsse auf die Person zu.

### Versuchsablauf

Vorab erhielten die Probanden ein Informationsschreiben, das sowohl über das Ziel des Versuchs, als auch über die benötigten Voruntersuchungen und den Ablauf der Studie informierte. Diesem Schreiben lag ein Fragebogen bei, der bis zum Versuch auszufüllen war (Fragebogen, siehe



Abbildung C.6, Anhang C). Hierbei waren allgemeine Fragen zum Alter, Geschlecht und zur subjektiven Licht- und Blendempfindlichkeit und weiteren Sehproblemen zu beantworten. Um Missverständnisse auszuschließen, wurde der Fragebogen gemeinsam mit dem Proband vor Versuchsbeginn einzeln besprochen und die restlichen Voruntersuchungen durchgeführt. Dies waren ein Visustest (SZB-LCS-Test)<sup>2</sup>, ein Farbsehtest (Ishihara-Tafeln) und ein Test auf Pupillenlichtreaktion. Die Ergebnisse wurden im Anamnesebogen vermerkt. Das Informationsschreiben und der Fragebogen dienten dazu, am Tag des Versuchs möglichst zeitig starten zu können und die Probanden nicht länger als 60 Minuten in Anspruch zu nehmen.

Der Versuch selbst fand in der Nacht vom 06.09. zum 07.09.2013 zwischen der astronomischen Abend- und Morgendämmerung statt, nachdem alle Voruntersuchungen abgeschlossen und die Eignung der Probanden geprüft war. Zunächst war die Ausleuchtung der Fahrbahn aus Fahrerperspektive zu bewerten. Anschließend nahm der Proband hinter der Blendenkonstruktion Platz und musste zu jeder dargebotenen Blendsituation die psychologische Blendung bewerten. Die angewandte Methodik wird nachfolgend für jede Beobachterposition separat beschrieben.

#### ***Bewertung der Fahrbahnausleuchtung aus Fahrerperspektive***

Der Einfluss der Lichtfarbe auf die Fahrbahnausleuchtung war anhand einer neun-stufigen Skala (1 = schlecht; 9 = gut) zu bewerten. Während der Bewertung wurden die Probanden aufgefordert, geradeaus zu blicken, um bei allen Probanden gleiche Bedingungen sicherzustellen.

Als Ankerreiz wurde zunächst jedem Probanden das ursprüngliche Abblendlicht präsentiert. Dieses wurde als „ideale“ Lichtverteilung bezeichnet, die als Referenz zur Bewertung der anderen Lichtfarben diente. Die drei Lichtfarben wurden anschließend randomisiert dargeboten. Die Bewertung gab der Proband nach jeder dargebotenen Lichtfarbe mündlich ab. Einer der Versuchsleiter dokumentierte die Bewertungen.

Die abgegebenen Bewertungen wurden anschließend auf den Einfluss des reduzierten Lichtstroms und den Einfluss der Lichtfarbe analysiert.

#### ***Bewertung der psychologischen Blendung aus der Perspektive des Gegenverkehrs***

Der Einfluss der Lichtfarbe auf die psychologische Blendung war anhand einer neun-stufigen Skala (1 = unmerklich, 9 = unerträglich) zu bewerten. Die Bezeichnungen der Stufen wurden in Anlehnung an eine invertierte de Boer Skala [Deb67] gewählt.

Die Probanden saßen zunächst hinter einem Vorhang, der die Sicht zum Scheinwerfer verdeckte, und adaptierten dort für rund zehn Minuten auf die mesopischen Umgebungsbedingungen. Anschließend nahmen sie hinter der in Abbildung 6.21 dargestellten Blendenkonstruktion Platz und bewerteten dort, aus der Perspektive des Gegenverkehrs, die beiden Blendsituationen. Anhand einer Kopfstütze wurde für jeden Probanden sichergestellt, dass in Abhängigkeit der dargebotenen Blendsituation das Gesichtsfeld mit Hilfe der Blendenkonstruktion so geteilt wurde, dass

---

<sup>2</sup>LCS = Low Contrast Sensitivity Test des Schweizerischen Zentralvereins für das Blindenwesen (SZB) zur Ermittlung des Fernvisus.

entweder nur der Scheinwerfer oder nur das über die Fahrbahn reflektierte Licht zu sehen war. Bei der Bewertung sollten die Probanden je nach dargebotener Blendsituation und geöffneter Blende entweder knapp unter, bzw. über der Blendenöffnung zum rechten Fahrbahnrand und der dort aufgestellten Sehtafel blicken. Dies entsprach einer Fixationsentfernung von 50 m und einem Blendwinkel von  $\Theta = 5^\circ$ .

Als Ankerreiz wurde zunächst das ursprüngliche Abblendlicht in beiden Blendsituationen präsentiert. Anschließend wurden die Lichtfarben randomisiert dargeboten. Die Abfolge der Blendsituationen blieb dabei konstant. Zwischen den Lichtfarben wurde erneut der Ankerreiz in beiden Blendsituationen dargeboten. Die Bewertung erfolgte mündlich durch Nennung der Blendempfindung (1 = unmerklich, 9 = unterträglich) und wurde von einem der Versuchsleiter dokumentiert. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass die Probanden ihre Blickrichtung möglichst wenig ändern.

Die abgegebenen Bewertungen wurden anschließend auf den Einfluss des reduzierten Lichtstroms und den Einfluss der Lichtfarbe analysiert. Zudem wurde geprüft, ob die Lichtfarbe im Vergleich zur reinen Reduzierung des Lichtstroms eine signifikante Reduzierung der psychologischen Blendung ermöglicht. Ebenso wurde untersucht, ob eine der beiden dargebotenen Blendsituationen signifikant stärker blendend bewertet wird.

### **Signifikanzanalyse**

Die erhobenen Daten wurden einer Signifikanzanalyse unterzogen, um zu verifizieren, ob die Bewertungen statistisch signifikante Unterschiede aufweisen. Die Stichproben ( $n = 10$ ) wurden zunächst auf Normalverteilung überprüft. Der angewandte Shapiro-Wilk-Test für Stichproben  $n < 50$  weist für keine der getesteten Stichproben eine signifikante Abweichung von der Normalverteilung nach ( $\alpha = 0,05$ ). Der paarweise Vergleich der abhängigen Stichproben wurde anhand der in Kapitel 6.2 aufgestellten allgemeingültigen Hypothesen mittels gepaartem t-Test durchgeführt.

### **6.3.2 Ergebnisse**

Die erzielten Ergebnisse werden zweigeteilt angeführt. Zunächst werden die Ergebnisse der Fahrbahnausleuchtung und anschließend die der psychologischen Blendung dargestellt.

#### **Bewertung der Fahrbahnausleuchtung aus Fahrerperspektive**

Abbildung 6.22 zeigt die Bewertungen der Fahrbahnausleuchtung in Abhängigkeit der Lichtfarbe. Die Ausleuchtung durch das ursprüngliche Abblendlicht wird durchschnittlich um 3,3 Stufen besser bewertet als die in ihrer Intensität reduzierten Lichtverteilungen. Diese Bewertung liegt in dem wesentlich höheren Lichtstrom begründet.

Abbildung 6.22 verdeutlicht zudem die Unterschiede zwischen den Bewertungen in Abhängigkeit der Lichtfarbe. Die gelbe Lichtfarbe erhält die niedrigste Bewertung. Die blaue Lichtfarbe wird

---

am besten bewertet, unterscheidet sich allerdings nur geringfügig von der "weißen-reduzierten" Lichtfarbe. Insgesamt wird die Fahrbahnausleuchtung tendenziell besser bewertet, wenn die Lichtfarbe einen erhöhten Anteil im kurzwelligen Spektralbereich aufweist.

Tabelle 6.9 bestätigt, dass die Fahrbahnausleuchtung in Abhängigkeit der Lichtfarbe signifikant unterschiedlich bewertet wird. Der deutliche Unterschied zwischen den Bewertungen der gelben und blauen Lichtfarbe ist signifikant. Im Vergleich zur "weißen-reduzierten" Lichtfarbe wird die gelbe signifikant schlechter bewertet. Die tendenziell bessere Bewertung der blauen Lichtfarbe ist hingegen nicht signifikant.

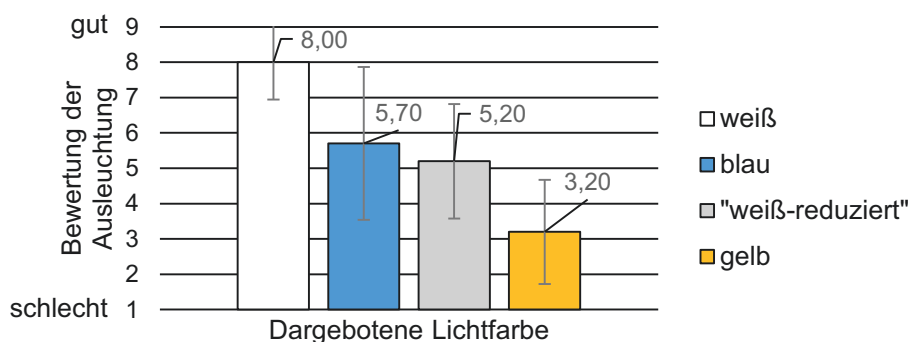


Abbildung 6.22: Bewertung der Fahrbahnausleuchtung aus Fahrerperspektive in Abhängigkeit der Lichtfarbe des Abblendlichtes +/- Standardabweichung

Tabelle 6.9: Signifikanzanalyse - Unterschiede in den Bewertungen der Fahrbahnausleuchtung (Gepaarter t-Test mit Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ )

Paarvergleich – Fahrbahnausleuchtung in Abhängigkeit der Lichtfarbe			
	"weiß-reduziert" – gelb	"weiß-reduziert" – blau	blau – gelb
p-Wert ( $\alpha = 0,05$ )	0,006	0,244	0,004

### Bewertung der psychologische Blendung aus der Perspektive des Gegenverkehrs

Abbildung 6.23 zeigt die Bewertungen der psychologischen Blendung in Abhängigkeit der Lichtfarbe. Die Ergebnisse lassen erkennen, dass tendenziell eine stärkere Blendung empfunden wird, wenn die Lichtfarbe einen erhöhten Anteil im kurzwelligen Spektralbereich aufweist. Die Ergebnisse der beiden untersuchten Blendsituationen werden im folgenden getrennt beschrieben.

Abbildung 6.23 (links) veranschaulicht die Ergebnisse der Blendsituation „Direkt“. Die gelbe Lichtfarbe wird am wenigsten blendend empfunden. Die blaue Lichtfarbe wird um 1,1 Stufen stärker blendend empfunden als die gelbe. Die "weiße-reduzierte" Lichtfarbe erhält im Mittel eine identische Bewertung wie die blaue. Die „gerade zulässige“ Blendung (= 5) wird allerdings bei keiner der Lichtfarben überschritten.

Abbildung 6.23 (rechts) veranschaulicht die Ergebnisse der Blendsituation „Indirekt“. Die Rangfolge der Bewertungen ist nahezu identisch zur Rangfolge der Bewertungen der Blendsituation „Direkt“. Die gelbe Lichtfarbe wird am wenigsten blendend empfunden. Geringfügig stärker blendend wird die blaue Lichtfarbe bewertet. Die „weiße-reduzierte“ Lichtfarbe wird bei dieser Blendsituation im Mittel nochmals um 0,5 Stufen stärker blendend empfunden. Alle Bewertungen liegen zwischen 4,2 und 5,1 und entsprechen bis auf die „weiße-reduzierte“ Lichtfarbe einer „gerade zulässigen“ (= 5) Blendung.

Beide in Abbildung 6.23 dargestellten Diagramme lassen erkennen, dass der dargebotene Ankerreiz (ursprüngliches Abblendlicht) grundsätzlich Bewertungen von mindestens 5 erhält und somit deutlich stärker blendend bewertet wird. Gemäß de Boer entspricht dies einer nicht mehr zulässigen Blendung. Die Reduzierung des Lichtstroms durch den Einsatz der Filter erzielt einen positiven Effekt und verringert die psychologische Blendung durchschnittlich um 1,2 Stufen im Fall der „Direkten“ und 1,3 Stufen im Fall der „Indirekten“ Blendsituation, bezogen auf den ersten der beiden Ankerreize. Dies ist auf die reduzierte Leuchtdichte im Bereich der Reflexlinie (siehe Tabelle 6.7) und die dadurch reduzierte Blendbeleuchtungsstärke (siehe Tabelle 6.8) zurückzuführen.

Zudem ist zu vermerken, dass jeweils der als zweites dargebotene Ankerreiz (weiß 2) stärker blendend bewertet wird als der erste (vgl. Abbildung 6.23). Da alle Farbfilter randomisiert dargeboten wurden, ist auszuschließen, dass der erkennbare Trend auf die Reihenfolge zurückzuführen ist.

Der direkte Vergleich der beiden in Abbildung 6.23 dargestellten Diagramme macht deutlich, dass die Blendsituation „Indirekt“ trotz geringerer Blendbeleuchtungsstärken (vgl. Tabelle 6.8) tendenziell als stärker blendend empfunden wird. Die Unterschiede in den Bewertungen sind dennoch statistisch nicht signifikant, wie Tabelle 6.10 belegt.

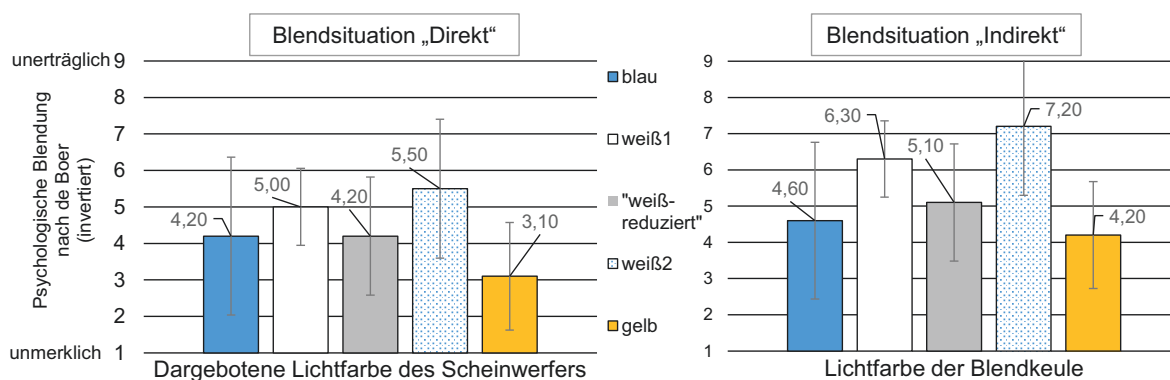


Abbildung 6.23: Psychologische Blendung in Abhängigkeit der Lichtfarbe und der dargebotenen Blendsituation +/- Standardabweichung

Tabelle 6.11 zeigt, dass zwischen den Bewertungen der psychologischen Blendung in Abhängigkeit der Lichtfarbe teilweise signifikante Unterschiede vorliegen. Insbesondere die Bewertungen der „weißen-reduzierten“ und gelben Lichtfarbe weisen für beide dargebotenen Blendsituationen

Tabelle 6.10: Signifikanzanalyse - Unterschiede in den Bewertungen der Blendsituationen (Gepaarter t-Test mit Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ )

Paarvergleich – Psychologische Blendung in Abhängigkeit der Blendsituation „Direkt“ ↔ „Indirekt“			
	„weiß-reduziert“	gelb	blau
p-Wert ( $\alpha = 0,05$ )	0,134	0,111	0,555

signifikante Unterschiede auf. Ebenso zeigt der Vergleich der blauen und gelben Lichtfarbe für die Blendsituation „Direkt“ signifikante Unterschiede. Dies verdeutlicht, dass durch die Lichtfarbe eine weitere Reduzierung der psychologischen Blendung möglich wäre.

Tabelle 6.11: Signifikanzanalyse - Unterschiede in den Bewertungen der psychologischen Blendung (Gepaarter t-Test mit Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ )

Paarvergleich – Psychologische Blendung in Abhängigkeit der Lichtfarbe						
	„weiß-reduziert“ – gelb		„weiß-reduziert“ – blau		blau – gelb	
Blendsituation	Direkt	Indirekt	Direkt	Indirekt	Direkt	Indirekt
p-Wert ( $\alpha = 0,05$ )	0,048	0,041	1,000	0,244	0,048	0,522

### 6.3.3 Fazit

Die beschriebene Studie hatte zum Ziel, den Effekt unterschiedlicher Lichtfarben des Abblendlichtes auf die Bewertung der Fahrbahnausleuchtung und auf die Bewertung der psychologischen Blendung zu analysieren. Bis auf die Lichtfarbe wurden alle anderen Einflussgrößen konstant gehalten (siehe Tabelle 6.7 und Tabelle 6.8). Die eingesetzte Kunststoffolie gewährleistete, anders als eine nasse Fahrbahn und deren Abtrocknungsverhalten, konstante Reflexionseigenschaften während der Studie. Das spektrale Reflexionsverhalten der Folie wurde im Rahmen der Studie nicht näher analysiert und wäre in weiterführenden Studien zu untersuchen.

Die Ergebnisse der Fahrbahnausleuchtung (siehe Abbildung 6.22 und Tabelle 6.9) beweisen, dass Licht kürzerer Wellenlänge zu einer signifikant besseren Bewertung der Ausleuchtung führt. Die blaue Lichtfarbe wird im Vergleich zur gelben signifikant besser bewertet. Das ursprüngliche Abblendlicht, das mit Hilfe des Neutraldichtefilters in seiner Intensität an die der beiden Lichtfarben angepasst wurde, wird ebenfalls signifikant besser bewertet. Die blaue Lichtfarbe wird allerdings im Vergleich zum ursprünglichen, in der Intensität reduzierten, Abblendlicht nicht signifikant besser bewertet. Somit empfiehlt sich aus Sicht des Fahrers der Einsatz eines Leuchtmittels, das einen höheren Anteil aus dem kurzwelligen Spektralbereich aufweist. Im Vergleich zum ursprünglichen Abblendlicht wird jedoch keine signifikante Verbesserung erzielt. Dem gegenüber ist allerdings zu berücksichtigen, wie sich eine solche Lichtfarbe auf die psychologische Blendung auswirkt.

Die Ergebnisse der psychologischen Blendung (siehe Abbildung 6.23 und Tabelle 6.11) belegen, dass Licht kürzerer Wellenlänge zu einer signifikant stärkeren Blendung führt. Allerdings zeigt sich dies nur für den Vergleich der Bewertungen zwischen der “weißen-reduzierten“ und der gelben Lichtfarbe und zwischen der blauen und der gelben Lichtfarbe. Der Unterschied zwischen den Bewertungen der blauen und “weißen-reduzierten“ Lichtfarbe ist hingegen nicht signifikant. Folglich ist die Anpassung der Lichtfarbe hin zu kurzwelligem Licht hinsichtlich der psychologischen Blendung nicht negativ zu bewerten. In weiterführenden Studien wäre zu prüfen, ob dies auch im dynamischen Passiervorgang zutreffend ist.

Zusammenfassend ist festzuhalten: Eine blaue Lichtfarbe verursacht weder bei der Bewertung der Fahrbahnausleuchtung noch bei der Bewertung der psychologischen Blendung signifikante Unterschiede zur ursprünglichen Lichtfarbe (“weiß-reduziert“). Eine gelbe Lichtfarbe ermöglicht zwar in beiden Blendsituationen eine signifikante Reduzierung der psychologischen Blendung, führt aber gleichzeitig zu einer signifikant schlechteren Fahrbahnausleuchtung. Mit dem Hinweis, dass die gewählte Lichtfarbe im Weißbereich gemäß ECE R48 [ECE48] liegen muss, um unter anderem eine Farberkennung im Straßenverkehr zu gewährleisten, ist eine blaue Lichtfarbe zu bevorzugen. Die erzielten Ergebnisse werden anschließend bei den Anforderungen an das adaptive blendfreie Abblendlicht für spiegelnde Fahrbahnoberflächen berücksichtigt.

Die Ergebnisse bestätigen zudem, dass es zielführend ist, das Abblendlicht künftig mit LED-Leuchtmitteln zu realisieren. Zu diesem Schluss kommt ebenfalls VÖLKER [Völ07a] bei mesopischen Untersuchungen zur peripheren Wahrnehmung. Speziell für den Fahrer bietet dies einen Komfortgewinn, da er im nächtlichen Straßenverkehr mesopisch adaptiert ist und somit vom Purknie-Effekt profitiert. Für andere Verkehrsteilnehmer bedeutet es hingegen keinen Nachteil.

---

## 7 Abgeleitete Bewertungsmethoden

In den vorangegangenen Kapiteln werden die bisherigen Forschungsergebnisse und die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen angeführt. Das nachfolgende Kapitel fasst die daraus abgeleiteten Bewertungsmethoden zusammen.

### 7.1 Geometriemodelle für eine definierte Messumgebung

Ein adaptives blendfreies Abblendlicht soll sowohl die physio- als auch psychologische Blendung im Passiervorgang auf ein Minimum reduzieren. Um sowohl die Effektivität als auch den Entwicklungsfortschritt eines solchen Abblendlichtes validieren zu können, sind entsprechende Bewertungsmethoden erforderlich. Da Feldmessungen von mehreren Einflussgrößen abhängig sind, galt es Methoden zu entwickeln, die wiederholbare Messungen unter konstanten Bedingungen gewährleisten. Die entwickelten Methoden werden nachfolgend beschrieben.

#### Bewertung der Reflexblendung - statisch

Zur Bewertung der Reflexblendung wurde das in Abbildung 7.1 dargestellte Geometriemodell entwickelt. Dieses ermöglicht die Bestimmung der geometrischen Lage des Reflexbereichs, der aufgrund einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche in das Blendfenster der CIE 188:2010 [CIE10] reflektiert wird (vgl. Ergebnisse Kapitel 5.2). Die Bewertung der Reflexblendung erfolgt anschließend über die am Messschirm aufgenommene Leuchtdichteverteilung (detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 5.2).

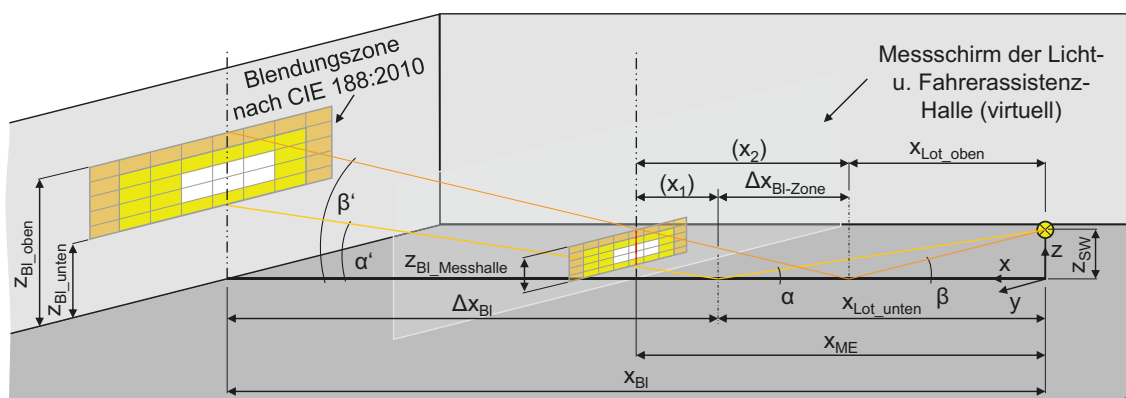


Abbildung 7.1: Geometriemodell zur Ermittlung der Reflexbereiche einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche (siehe auch [BMK12])



Der Einsatz des in Abbildung 7.1 gezeigten Geometriemodells gestaltet sich wie folgt: Die beiden Höhenangaben  $z_{Bl\_unten}$  und  $z_{Bl\_oben}$  und die Entfernung  $x_{Bl}$  sind Parameter, die sich aus der CIE 188:2010 [CIE10] ableiten.

Im ersten Schritt ist die Anbauhöhe des Scheinwerfers  $z_{SW}$  festzulegen. Anschließend werden unter Annahme des Reflexionsgesetzes sowohl Einfalls- ( $\alpha, \beta$ ) als auch Ausfallswinkel ( $\alpha', \beta'$ ) und die Entfernungen ( $x_{Lot\_unten}$ ,  $x_{Lot\_oben}$ ,  $\Delta x_{Bl}$  und  $\Delta x_{Bl\_Zone}$ ) berechnet. Insbesondere ist hier die Größe  $\Delta x_{Bl\_Zone}$  von Bedeutung. Diese stellt die Länge des Reflexbereichs in x-Richtung dar. Die erzielten Ergebnisse aus Kapitel 5.2 belegen, dass der im Bereich  $\Delta x_{Bl\_Zone}$  auftreffende Lichtstrom bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche gerichtet reflektiert wird und maßgeblich zur Blendung in der Blendungszone beiträgt. Dies wird durch die Ergebnisse von FISCHER [Fis15] bestätigt, die zeigen, dass eine Maskierung des Reflexbereichs eine Reduzierung der Blendbeleuchtungsstärke ermöglicht, die nahezu der bei trockener Fahrbahn entspricht. Dementsprechend ist  $\Delta x_{Bl\_Zone}$  vorrangig bei der Auslegung eines adaptiven blendfreien Abblendlichts bei spiegelnder Fahrbahnoberfläche zu berücksichtigen.

Im zweiten Schritt ist die Messentfernung  $x_{ME}$  zwischen Scheinwerfer und Messschirm anzugeben, um die Höhe  $z_{Bl\_Messhalle}$  zu ermitteln. Zusätzlich werden die z-Koordinaten der unteren und oberen Grenze von  $z_{Bl\_Messhalle}$  berechnet. Anhand dieser Grenzen kann eine Aussage getroffen werden, in welchem Bereich die Reflexblendung auf den Messschirm trifft.

Das entwickelte Geometriemodell beschränkt sich bei der Bewertung der Reflexblendung auf die relevanten Größen in x-Richtung. Dies liegt darin begründet, dass sich der Bereich, der die Reflexblendung verursacht, mit zunehmendem Nässegrad der Fahrbahn regelrecht "zusammenschnürt" (vgl. Abbildung 3.2, S. 29). Dementsprechend nimmt der Leuchtdichtekoeffizient in y-Richtung stark ab (vgl. [Köh11]). Folglich ist bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche primär die Reflexlinie zwischen Scheinwerfer und Beobachter zu berücksichtigen, die sich auf der Fahrbahn ausbildet (Reflexlinie, siehe Abbildung 5.18, S. 77).

Die Funktionalität des Geometriemodells wurde anhand der erzielten Ergebnisse aus Kapitel 5.2 nachgewiesen. Mit Hilfe des Geometriemodells war es möglich, die geometrische Lage des Reflexbereichs zu ermitteln und dadurch den Einfluss der Reflexblendung aufzuzeigen. Die Licht- und Fahrerassistenz-Halle von IAV eignet sich dabei als Messumgebung, da die Halle konstante Bedingungen für wiederholbare Messergebnisse gewährleistet [MKH<sup>+</sup>14]. Der Einsatz der vorgestellten Methode ist daher bei der Entwicklung und Validierung eines adaptiven blendfreien Abblendlichtes empfehlenswert.

### **Bewertung der Reflexblendung - im Passiervorgang**

Zur Bewertung der im Passiervorgang auftretenden Reflexblendung wurde ein Geometriemodell entwickelt, das in Kapitel 5.4 vorgestellt wurde (siehe Abbildung 5.17, S. 77). Die dabei eingesetzte Methode eignet sich, um die Reflexlinien, die sich bei Nässe auf der Fahrbahn ausbilden (Reflexlinien, siehe Abbildung 5.18, S. 77), unter wiederholbaren Messbedingungen zu analy-

sieren und beschränkt sich dabei auf eine in der Länge begrenzte Messumgebung. Nachfolgend werden die einzelnen Schritte des Messablaufs aufgeführt:

1. Scheinwerfer waagrecht in Anbauhöhe auf dem Drehteller montieren und Ausrichtung visuell anhand der HDG überprüfen.
2. Optische Achse des Objektivs der LMK in eine Ebene mit der optischen Achse des Scheinwerfers bringen (entspricht  $\delta = 0^\circ$  bzw.  $180^\circ$ , abhängig von der Beobachterposition).
3. Optische Achse der LMK auf den mathematischen Reflexpunkt ausrichten (Markierungen am Hallenboden).
4. Ortsaufgelöstes Leuchtdichtebild aufnehmen (Winkelbereich ist vom ausgewählten Objektiv abhängig).
5. Scheinwerfer um z-Achse rotieren und gewünschten Blendwinkel  $\Theta$  einstellen.
6. LMK entsprechend dem eingestellten Blendwinkel  $\Theta$  in der Höhe ( $z_{LMK,i}$ ) anpassen (mit zunehmendem Blendwinkel ist die LMK höher anzubringen und umgekehrt).
7. Optische Achse der LMK auf mathematischen Reflexpunkt ausrichten (Markierungen am Hallenboden).
8. Ortsaufgelöstes Leuchtdichtebild aufnehmen.

Die Schritte fünf bis acht wiederholen sich iterativ für jeden zu untersuchenden Blendwinkel  $\Theta$ . Eine detaillierte Beschreibung der Methodik ist Kapitel 5.4.1 zu entnehmen.

Die in Kapitel 5.4 erzielten Ergebnisse beweisen die Funktionalität des entwickelten Geometriemodells. Trotz der begrenzten Länge der Halle ist es mit Hilfe des Geometriemodells möglich, die geometrischen Bedingungen des Straßenverkehrs nachzubilden und größere Entfernungen zu untersuchen. Die verkürzte Messgeometrie ist für die Leuchtdichtemessungen von Vorteil. Größere Entfernungen, die mit einem flachen Beobachtungswinkel verbunden sind, werden unter Einsatz der beschriebenen Bewertungsmethode aus wesentlich kürzeren Entfernungen analysiert. Somit ist speziell für größere Entfernungen gewährleistet, dass mehrere Bildpunkte der ortsaufgelösten Leuchtdichtemessung den relevanten Reflexbereich erfassen. Dies veranschaulicht Abbildung 7.2.

Zusammenfassend bietet das Geometriemodell in Verbindung mit dem beschriebenen Messablauf eine geeignete Bewertungsmethode, um die Reflexlinien, die im Passiervorgang die Reflexblendung verursachen, unter konstanten Bedingungen wiederholbar zu analysieren. Vorteilhaft ist dabei die Möglichkeit, die Reflexionseigenschaften des Hallenbodens innerhalb kürzester Zeit zu verändern (siehe Kapitel 5.4). Der Hallenboden gewährleistet zudem, anders als eine nasse Fahrbahn und deren Abtrocknungsverhalten, konstante und wiederholbare Reflexionseigenschaften. Folglich eignet sich die vorgestellte Bewertungsmethode zur Validierung eines adaptiven blendfreien Abblendlichts, dessen Lichtverteilung an unterschiedliche Reflexionseigenschaften der Fahrbahndeckschicht angepasst wird.

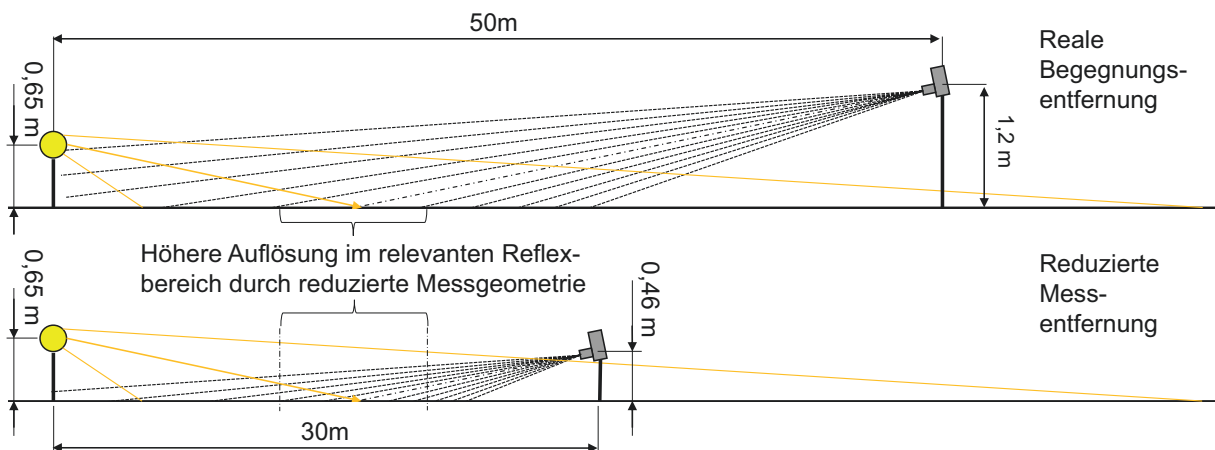


Abbildung 7.2: Vorteil der reduzierten Messgeometrie auf die Messauflösung im relevanten Reflexbereich

## 7.2 Parametrische 3D-Umgebung

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit bestätigen, dass sowohl die Scheinwerferanbauposition als auch die Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche einen starken Einfluss auf die Blendbeleuchtungsstärke haben. Aktuell werden beide Größen bei der Blendungsbewertung im Entwicklungsprozess automobiler Scheinwerfer noch nicht berücksichtigt.

Mit dem Ziel, den Einfluss der Scheinwerferanbauposition und der Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche bereits frühzeitig im Entwicklungsprozess bewerten zu können, war die Entwicklung einer parametrischen 3D-Umgebung verbunden. An diese wurden mehrere Anforderungen gestellt. Zum einen sollte sie an die Bewertungsmethode der CIE 188:2010 anknüpfen und davon insbesondere die Blendungszone (vgl. Abbildung 7.1) übernehmen. Zum anderen sollte sie die relevanten Fahrbahnbereiche aufzeigen (vgl. Kapitel 5.2 und Kapitel 7.1), die bei einer spiegelnden Fahrbahn zu einer Erhöhung der Blendbeleuchtungsstärke in der Blendungszone beitragen. Zudem musste für den Einsatz im Entwicklungsprozess die Kompatibilität mit der Lichtsimulations-Software LucidShape sichergestellt werden.

Nachfolgend wird die, für die parametrische 3D-Umgebung entwickelte, virtuelle Straßenszene vorgestellt. Des Weiteren wird auf die Funktionen und Parameter der Umgebung eingegangen. Abschließend werden die wichtigsten Punkte der parametrischen 3D-Umgebung zusammengefasst.

### Virtuelle Straßenszene

Abbildung 7.3 zeigt die in CATIA entwickelte virtuelle Straßenszene der parametrischen 3D-Umgebung. Grundlage dafür war das in Kapitel 4.2 vorgestellte Geometriemodell.

Die in Abbildung 7.3 gezeigte Blendungszone wurde der CIE 188:2010 entnommen. In diesem Bereich ist in 50 m Entfernung mit einem entgegenkommenden Augenpaar zu rechnen. Zudem

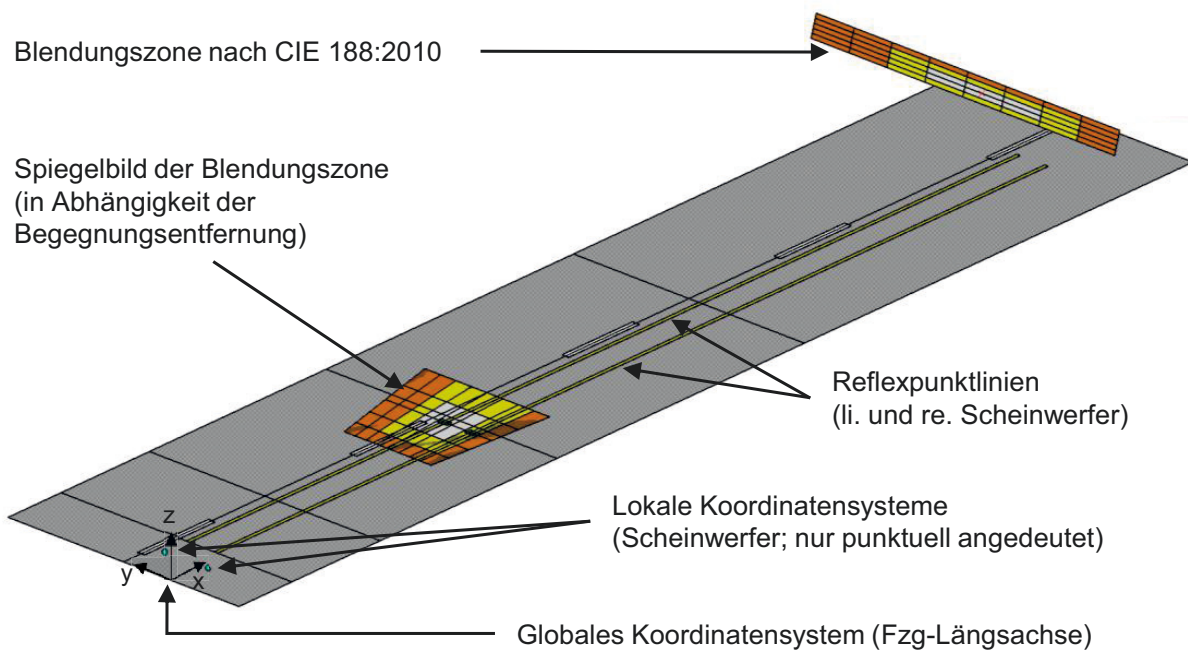


Abbildung 7.3: Virtuelle Straßenszene der parametrischen 3D-Umgebung zur Bewertung der Blendung im Straßenverkehr

ist in Abbildung 7.3 das Spiegelbild der Blendungszone zu sehen. Dieses variiert in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung und Scheinwerferanbauhöhe hinsichtlich seiner Größe und der Entfernung vom Scheinwerfer. In diesem Bereich trifft die Lichtstärke auf, die unter Berücksichtigung des Reflexionsgesetzes in die Blendungszone reflektiert wird und dort zur Erhöhung der Blendbeleuchtungsstärke beiträgt. Daher ist dieser Bereich bei der Entwicklung eines adaptiven blendfreien Abblendlichts für spiegelnde Fahrbahnoberflächen vorrangig zu berücksichtigen.

Des weiteren sind in Abbildung 7.3 die relevanten Koordinatensysteme abgebildet. Das globale Koordinatensystem liegt auf der Fahrzeuglängsachse. Der Ursprung des Koordinatensystems befindet sich fahrbahnmittig auf der rechten Fahrbahnseite ( $y = 0$ ) und auf Höhe der Fahrbahnoberfläche ( $z = 0$ ). Die lokalen Koordinatensysteme der Scheinwerfer liegen in der  $y$ - $z$ -Ebene des globalen Koordinatensystems ( $x = 0$ ). Diese dienen später in LucidShape als Referenz-Koordinatensysteme für die zu analysierenden Scheinwerfer.

Zusätzlich sind in Abbildung 7.3 die Reflexpunktlinien des linken und rechten Scheinwerfers eingezeichnet. Entlang dieser Linien treten in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung die mathematischen Reflexpunkte ( $\epsilon_i = \epsilon_o$ ) auf, die zu einer Blendung am Punkt der höchsten Wahrscheinlichkeit eines entgegenkommenden Augenpaares in der Blendungszone führen. Diese Linien dienen lediglich zur Veranschaulichung und besitzen keine weitere Funktion. Die wesentlichen Funktionen der parametrischen 3D-Umgebung werden nachfolgend beschrieben.

## Funktionen

Die parametrische 3D-Umgebung erfüllt im wesentlichen drei Funktionen:

1. Berücksichtigung der Scheinwerferanbauposition (Anbauhöhe, -breite)
2. Berücksichtigung der Interaktion der Lichtverteilung mit der Fahrbahnoberfläche
3. Aufzeigen der relevanten Fahrbahnbereiche, in denen bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche die Reflexblendung auftritt (Spiegelbild der Blendungszone, siehe Abbildung 7.3).

Die Scheinwerferanbauposition wird mit Hilfe von hinterlegten Parametern geändert (Beschreibung, siehe Abschnitt *Parameter*). Die Interaktion der Lichtverteilung mit der Fahrbahnoberfläche wird in der parametrischen 3D-Umgebung nur aufbereitet. Die eigentliche Berücksichtigung der Interaktion findet erst in der Lichtsimulations-Software LucidShape statt. Dort werden den relevanten Bereichen, wie zum Beispiel dem Spiegelbild der Blendungszone, das in Abbildung 7.3 dargestellt ist, die entsprechenden Reflexionseigenschaften zugewiesen. Mittels Ray-Tracing<sup>1</sup> wird anschließend aufgezeigt, welche Beleuchtungsstärke in der Blendungszone aufgrund der Reflexblendung zu erwarten ist. Der relevante Fahrbahnbereich, in dem die Reflexblendung aufgrund der spiegelnden Fahrbahnoberfläche stattfindet, wird mit Hilfe der parametrischen 3D-Umgebung ermittelt und dort gleichzeitig visualisiert (vgl. Abbildung 7.3). Um die Funktionen gewährleisten zu können, wurden der 3D-Umgebung Parameter zugrunde gelegt. Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen.

## Parameter

Zur Realisierung der zuvor genannten Funktionen wurden der parametrischen 3D-Umgebung die Parameter „Fahrzeugtyp“, „Straßentyp“ und „Reflexzonen“ hinterlegt. Die Parameter wurden in Form von Design Tables angelegt. Anhand dieser können beliebige Konfigurationen abgespeichert werden.

Bei dem Parameter „Fahrzeugtyp“ sind alle relevanten Daten der Scheinwerferanbauposition (u.a. Scheinwerferanbauhöhe und -breite) hinterlegt. Wird folglich der Fahrzeugtyp geändert, werden alle hinterlegten Parameter automatisch angepasst. Dies ermöglicht eine schnelle Aufbereitung der virtuellen Straßenszene für anschließende Tests mit LucidShape.

Ähnlich gestaltet es sich für den Parameter „Straßentyp“. Hier ist die Straßenbreite anzugeben. Diese hat einen Einfluss auf den lateralen Versatz zwischen Blendquelle und Beobachter. Zunächst wurde eine Auswahl verschiedener einspuriger Straßen angelegt. Aufgrund der genutzten Design Tables sind diese beliebig erweiterbar.

Der Parameter „Reflexzone“ ermöglicht die Visualisierung von Zonen, wie beispielsweise der in Abbildung 7.3 dargestellten Reflexpunktlinien oder dem Spiegelbild der Blendungszone. Aufgrund der parametrischen Abhängigkeit passen sich die Zonen/Flächen an die zu untersu-

---

<sup>1</sup>dt. Lichtstrahlverfolgung

chende Scheinwerferanbauposition und Begegnungsentfernung an. Anschließend können die Zonen/Flächen in LucidShape übernommen werden, wo ihnen die entsprechenden Reflexionseigenschaften zuzuweisen sind.

Zusätzlich wurden der parametrischen 3D-Umgebung Parameter für die Blendungszone nach CIE 188:2010 und für den ECE-Messschirm hinterlegt. Diese werden hier nicht näher beschrieben, da sich die geometrischen Bedingungen aus den entsprechenden Gesetzmäßigkeiten ableiten [CIE10], [ECE123].

## Fazit

Die parametrische 3D-Umgebung basiert auf dem, in Kapitel 4.2 vorgestellten Geometriemodell. Die Funktionalität des Geometriemodells wurde anhand der in Kapitel 5.2 durchgeführten Messungen zur Reflexblendung bestätigt. Daher empfiehlt es sich, die parametrische 3D-Umgebung künftig unterstützend im Entwicklungsprozess einzusetzen. Dies ermöglicht bereits in der Konzeptphase eine Bewertung der Reflexblendung<sup>2</sup>, was bis zum Zeitpunkt der Arbeit erst mit Vorliegen eines Prototypen möglich war. Zudem waren für solche Bewertungen zeit- und kostenaufwändige Freifeldmessungen erforderlich. Etwaige Änderungen am Scheinwerfer waren mit erneuten Entwicklungskosten verbunden. Insbesondere eignet sich die parametrische 3D-Umgebung zur Entwicklung von Anforderungen für ein adaptives blendfreies Abblendlicht für spiegelnde Fahrbahnoberflächen.

## 7.3 Maßzahl GIR

Die Ergebnisse aus Kapitel 6.1 und Kapitel 6.2 belegen, dass das Verhältnis aus indirekter zu direkter Blendbeleuchtungsstärke stark variiert. Maßgeblich verantwortlich dafür sind die Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche. Im Falle einer trockenen Fahrbahnoberfläche ist die indirekte Blendbeleuchtungsstärke mit zunehmender Begegnungsentfernung vernachlässigbar. Anders verhält es sich bei einer nassen, bzw. spiegelnden Fahrbahnoberfläche. Mit über 90% dominiert hier die indirekte Blendbeleuchtungsstärke. Die erzielten Ergebnisse werden von den bisherigen Forschungsergebnissen bestätigt [Leh01a], [SCS01].

Aus dem zuvor genannten Grund entstand die Maßzahl GIR<sup>3</sup> (*Glare Illuminance Ratio*). Anhand der dimensionslosen Maßzahl kann das Verhältnis der Blendbeleuchtungsstärke bewertet werden.

Formel 7.1 veranschaulicht die Herleitung der Maßzahl. Die Maßzahl GIR setzt die gesamte Blendbeleuchtungsstärke mit der ausschließlich systemabhängigen direkten Blendbeleuchtungsstärke ins Verhältnis. Aufgrund der systemabhängigen direkten Blendbeleuchtungsstärke

---

<sup>2</sup>Zur Bewertung wird eine große Anzahl an Strahlen benötigt, die wiederum eine hohe Rechenleistung der eingesetzten Hardware voraussetzt.

<sup>3</sup>Die Maßzahl GIR wurde bereits 2013 in einem Tagungsbeitrag zum International Symposium on Automotive Lighting eingeführt [KSM<sup>+</sup>13a].

ist grundsätzlich mit einer Blendung anderer Verkehrsteilnehmer zu rechnen, die unabhängig von den Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche ist. Die Maßzahl GIR beträgt daher mindestens den Wert 1. Werte  $> 1$  verdeutlichen, dass die gesamte Blendbeleuchtungsstärke zusätzlich durch die variable indirekte Blendbeleuchtungsstärke verursacht wird. Die Maßzahl GIR berechnet sich entsprechend nach Formel 7.2.

$$GIR = \frac{E_{gesamt}}{E_{direkt}} \quad (7.1)$$

$$\text{mit } E_{gesamt} = (E_{direkt} + E_{indirekt})$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow GIR &= \frac{E_{direkt} + E_{indirekt}}{E_{direkt}} = \frac{E_{direkt}}{E_{direkt}} + \frac{E_{indirekt}}{E_{direkt}} \\ \Rightarrow GIR &= 1 + \frac{E_{indirekt}}{E_{direkt}} \end{aligned} \quad (7.2)$$

In Tabelle 7.1 sind die vier Kategorien beschrieben, in die sich GIR einteilen lässt. Anhand der Kategorien lässt sich ableiten, welche Blendbeleuchtungsstärke dominiert.

Tabelle 7.1: Kategorien der dimensionslosen Maßzahl GIR (siehe auch [KSM<sup>+</sup>13a])

Kategorie	Bedeutung
GIR = 1	Der Anteil der indirekten Blendbeleuchtungsstärke = 0, was in der Realität allerdings nicht vorkommt.
$1 < GIR < 2$	Die Blendbeleuchtungsstärke setzt sich sowohl aus einer direkten als auch indirekten Blendbeleuchtungsstärke zusammen. Die direkte Blendbeleuchtungsstärke überwiegt allerdings.
GIR = 2	Der Anteil der direkten Blendbeleuchtungsstärke ist identisch mit dem der indirekten Blendbeleuchtungsstärke.
GIR > 2	Die gesamte Blendbeleuchtungsstärke wird maßgeblich durch den Anteil der indirekten Blendbeleuchtungsstärke bestimmt.

Zusammenfassend ermöglicht GIR die Bewertung des Verhältnisses der Blendbeleuchtungsstärke und unterscheidet dabei zwischen vier Kategorien. Somit ist ein direkter Rückschluss auf den relevanten Blendanteil möglich. Die Ergebnisse aus Kapitel 6.1 belegen, dass bei einer nassen Fahrbahn entfernungsunabhängig Werte  $\gg 2$  für GIR ermittelt werden. Dies verdeutlicht den Handlungsbedarf, die indirekte Blendbeleuchtungsstärke bei nasser, bzw. spiegelnder Fahrbahn zu reduzieren.



## 7.4 Simulationssoftware CAGE

Die in Kapitel 6.1 und Kapitel 6.2 erzielten Ergebnisse verdeutlichen, dass trotz der Gesetzeskonformität die Abblendlichtverteilungen verschiedener Scheinwerfersysteme zu unterschiedlichen Blendbeleuchtungsstärken im Passiervorgang führen. Insbesondere zeigt sich dies bei einer nasen-, bzw. spiegelnden Fahrbahnoberfläche. Um diese Unterschiede aufzeigen zu können, waren zeit- und kostenaufwändige Messungen im Freien erforderlich.

Die gesetzlich vorgeschriebene Blendungsbewertung hätte keinen Rückschluss auf diese starken Unterschiede der Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang ermöglicht. In Verbindung mit der Tatsache, dass neben dem Maximum der Blendbeleuchtungsstärke auch das Expositionsprofil<sup>4</sup> entscheidend ist (vgl. [Ros00], [MTG<sup>+</sup>12]), ist eine Bewertung der Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang erforderlich. Daher wird eine Bewertungsmethode benötigt, um Scheinwerfersysteme künftig noch „blendungs-ärmer“ auslegen zu können.

Zum Zeitpunkt der vorliegenden Arbeit war keine Methode bekannt, die eine Analyse der Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang ermöglicht. Daher sollte eine Methode entwickelt und dabei die in Tabelle 7.2 aufgeführten Ziele verfolgt werden.

Tabelle 7.2: Projektziele bei der Entwicklung von CAGE (Zielart: f = fest, W = Wunsch)

Ziel	Zielart	Beschreibung
1	f	Die Methode muss bereits in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses einsetzbar sein.
2	f	Die Methode muss eine computerbasierte Ermittlung der Blendbeleuchtungsstärke ermöglichen.
3	f	Es muss die Möglichkeit bestehen, den Einfluss des Zustands der Fahrbahnoberfläche zu berücksichtigen
4	f	Es muss die Möglichkeit bestehen, den Einfluss der Scheinwerferanbauposition zu berücksichtigen
5	f	Die Ermittlung der direkten und indirekten Blendbeleuchtungsstärke muss getrennt und in Kombination möglich sein.
6	W	Eine zusätzliche Ermittlung der resultierenden physiologischen Blendung in Form der äquivalenten Schleierleuchtdichte $L_{veq}$ gemäß CIE 146:2002 wäre wünschenswert.

Das Ergebnis ist die Simulationssoftware CAGE (*C*omputer *A*ided *G*lare *E*valuation). In den folgenden Abschnitten wird erläutert, was CAGE ist, wie es entwickelt wurde, wozu es sich eignet und welche weiteren Entwicklungsschritte empfehlenswert sind. Abschließend werden die wichtigsten Eigenschaften von CAGE zusammengefasst und ein Ausblick auf die Weiterentwicklung gegeben.

<sup>4</sup>Das Expositionsprofil entspricht der Blendbeleuchtungsstärke über die Zeit des Passiervorgangs.

## Was ist CAGE?

CAGE ist eine mit VBA<sup>5</sup> programmierte Software zur Bewertung der Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang. Dabei wird insbesondere die indirekte Blendbeleuchtungsstärke berücksichtigt, die bei der Blendungsbewertung bisher nicht mit einbezogen wurde.

Abbildung 7.4 zeigt die Bedienoberfläche der Software. Bei der Entwicklung wurde besonders auf eine benutzerfreundliche und intuitive Bedienoberfläche geachtet. Alle zur Bewertung notwendigen Parameter sind links in die Eingabemaske einzutragen. Die darüber befindlichen Reiter informieren den Bediener über den Fortschritt. Rechts ist die Referenz-Straßenszene zu sehen. Diese enthält weitere Informationen über die geometrischen Bedingungen.

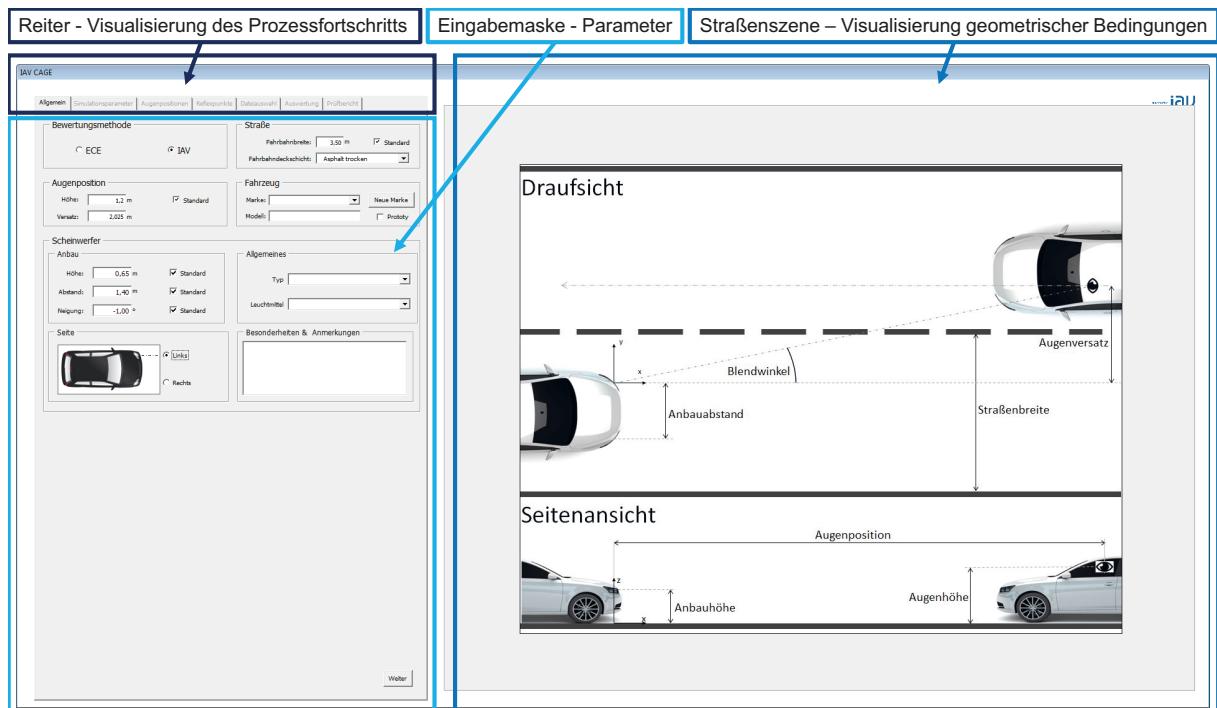


Abbildung 7.4: Bedienoberfläche der entwickelten Software CAGE (siehe auch [KWB<sup>+</sup>15])

In Tabelle 7.3 sind alle Parameter zusammengefasst, die in der Eingabemaske (vgl. Abbildung 7.4, links) einzutragen sind. Zur besseren Übersicht sind die Parameter in Bereiche untergliedert. Die Parameter ermöglichen die Bewertung des Einflusses des Zustandes der Fahrbahnoberfläche, als auch der Scheinwerferanbauposition auf die Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang.

Die in Abbildung 7.4 links gezeigte Eingabemaske enthält zusätzlich die Bereiche „Bewertungsmethode“, „Fahrzeug“, „Allgemeines“ und „Besonderheiten & Anmerkungen“. Anhand der „Bewertungsmethode“ ist auszuwählen, ob nur die direkte Blendbeleuchtungsstärke (Auswahl: ECE) oder sowohl die direkte als auch indirekte Blendbeleuchtungsstärke (Auswahl: IAV) bewertet werden soll. Unter den anderen drei Bereichen können weitere Angaben zum Fahrzeug, zum

<sup>5</sup>Visual Basic for Applications

Tabelle 7.3: Parameter der Simulationssoftware CAGE

<b>Straße</b>	
Fahrbahnbreite:	Eingabe der zu untersuchenden Fahrbahnbreite einer Fahrspur. Standardmäßig: 3,50 m. Die Position des Fahrzeugs wird mittig auf der eigenen Fahrspur angenommen.
Fahrbahndeckschicht:	Auswahl verschiedener Fahrbahndeckschichten, bzw. deren Zustand (z.B. trocken, „nass“).
<b>Augenposition</b>	
Höhe:	Höhe der Beobachterposition. Standardmäßig: 1,20 m.
Versatz:	Lateraler y-Abstand zwischen Scheinwerfer und Auge des Beobachters. Standardmäßig: 2,025 m.
<b>Scheinwerfer</b>	
Höhe:	Anbauhöhe des Scheinwerfers, referenziert auf die optische Achse des Abblendlichts. Standardmäßig: 0,65 m.
Abstand:	Anbauabstand des linken und rechten Scheinwerfers, referenziert auf die optische Achse des Abblendlichts. Standardmäßig: 1,40 m.
Neigung:	Neigung des Scheinwerfers. Diese geht nicht mit in die Berechnung ein, sondern wird im Prüfbericht vermerkt. Standardmäßig: $-1,0\%$ .

Scheinwerfertyp und dem eingesetzten Leuchtmittel, als auch zu der Untersuchung selbst, gemacht werden. Diese Informationen finden sich anschließend im Prüfbericht wieder.

Die Ergebnisse werden in Form eines Prüfberichts zusammengefasst (siehe Abbildung D.1, Anhang D). Am Ende der Bewertung ist anzugeben, welche Angaben in den Prüfbericht übernommen werden sollen. Grundsätzlich werden die allgemeinen Angaben, sowie die Koordinaten und die ermittelten Messwerte der Beleuchtungsstärke übernommen. Neben der ermittelten Beleuchtungsstärke wird gleichzeitig die berechnete Schleierleuchtdichte  $L_{veq}$  angeführt. Alle Daten können zusätzlich in Form von Diagrammen dargestellt werden.

Um aufzuzeigen, wie die Beleuchtungsstärken ermittelt werden, wird im folgenden auf den Entwicklungsprozess der Software eingegangen.

### Wie wurde CAGE entwickelt?

CAGE wurde basierend auf den in Kapitel 6.1 erzielten Ergebnissen entwickelt. Zielsetzung dabei war sowohl die direkte als auch die indirekte Blendbeleuchtungsstärke und beide kombiniert ermitteln zu können (vgl. Tabelle 7.2). Dazu wurde das in Kapitel 4.2 gezeigte Geometriemodell in die Software implementiert. Zudem wurden zur Vereinfachung drei Annahmen getroffen. Diese beruhen unter anderem auf den aus Kapitel 5.2 gewonnenen Erkenntnissen.

Die erste Annahme liegt in dem genutzten Geometriemodell begründet. Dieses basiert auf dem Reflexionsgesetz, weshalb davon ausgegangen wird, dass  $\alpha = \alpha'$ , bzw.  $\beta = \beta'$  ist (vgl. Abbildung 7.1). Die Ergebnisse aus Kapitel 5.2 zeigen, dass dies bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche zutreffend ist.

Die zweite Annahme ist die Totalreflexion am mathematisch bestimmten Reflexpunkt. Gemäß Energieerhaltung ( $\rho + \alpha + \tau = 1$ ) wird von einer ideal gerichteten Reflexion ( $\rho = 1$ ) ausgegangen. Sowohl Transmission ( $\tau$ ) als auch Absorption ( $\alpha$ ) bleiben unberücksichtigt. Sofern nur dieser Punkt zur Blendung beitragen würde, wäre dies der Worst Case.

Die dritte Annahme stellt eine starke Vereinfachung der Realität dar. Entgegen bisheriger Forschungsergebnisse und auch der eigenen Ergebnisse wurde die Annahme getroffen, dass einzig der Reflexpunkt die indirekte Blendbeleuchtungsstärke beeinflusst. Dementsprechend bleiben alle anderen Bereiche entlang der Reflexlinie unberücksichtigt.

Anhand der am Reflexpunkt reflektierten Lichtstärke wird auf die indirekte Blendbeleuchtungsstärke an der Beobachterposition geschlossen. Aufgrund der angenommenen Totalreflexion ( $\rho = 1$ ) und der Vernachlässigbarkeit der Absorption ( $\alpha = 0$ ) wegen des hochtransparenten Mediums Wasser, gilt gemäß Energieerhaltungssatz und Gleichung 7.3, dass die Lichtstärke am Reflexpunkt ( $I_{RP}$ ) gleich der an der Beobachterposition ( $I_A$ ) ist. Die indirekte Blendbeleuchtungsstärke ( $E_{indirekt}$ ) lässt sich dementsprechend mit Hilfe des photometrischen Entfernungsgesetzes nach Formel 7.4 berechnen.

$$I_{RP} = I_A \quad (7.3)$$

$$E_{indirekt} = E_{RP} * \frac{r_{RP}^2}{(r_{RP}^2 + r_{RP-Auge}^2)} \quad (7.4)$$

mit  $E_{RP}$ : Beleuchtungsstärke am Reflexpunkt in Richtung Scheinwerfer

$r_{RP}$ : Entfernung zwischen Scheinwerfer und Reflexpunkt

$r_{RP-Auge}$ : Entfernung zwischen Reflexpunkt und Beobachter

Die nach Formel 7.4 berechnete indirekte Blendbeleuchtungsstärke übersteigt allerdings den tatsächlichen Messwert an der Beobachterposition, da der reelle Reflexionsgrad der Fahrbahnoberfläche  $< 1$  ist. Zudem wird die indirekte Beleuchtungsstärke entgegen der getroffenen Annahme durch die gesamte Reflexlinie und nicht nur den einzigen Reflexpunkt verursacht. Daher wurden weitere Ausgleichsfunktionen in die Software integriert, die dieser Tatsache Rechnung tragen. Somit ist eine Prognose der indirekten und gesamten Blendbeleuchtungsstärke im Passivvorgang möglich. Die mit CAGE ermittelte direkte Blendbeleuchtungsstärke entspricht der tatsächlichen, da hier keine Interaktion mit der Umgebung zu berücksichtigen ist.

Zur Verifizierung der Funktionalität wurden die im Freien vermessenen Lichtverteilungen (siehe Kapitel 6.1, Teilversuch III) ebenfalls mit CAGE computerbasiert analysiert. Die Simulationsergebnisse wurden anschließend mit den Messwerten abgeglichen. Der Abgleich ist in Abbildung 7.5 dargestellt.

Für Begegnungsentfernungen  $< 20$  m werden zwischen Messung und Simulation noch deutliche Abweichungen ermittelt (vgl. Abbildung 7.5). Diese sind auf die photometrische Grenzentfernung und die optische Auslegung der untersuchten Scheinwerfersysteme zurückzuführen. Bei

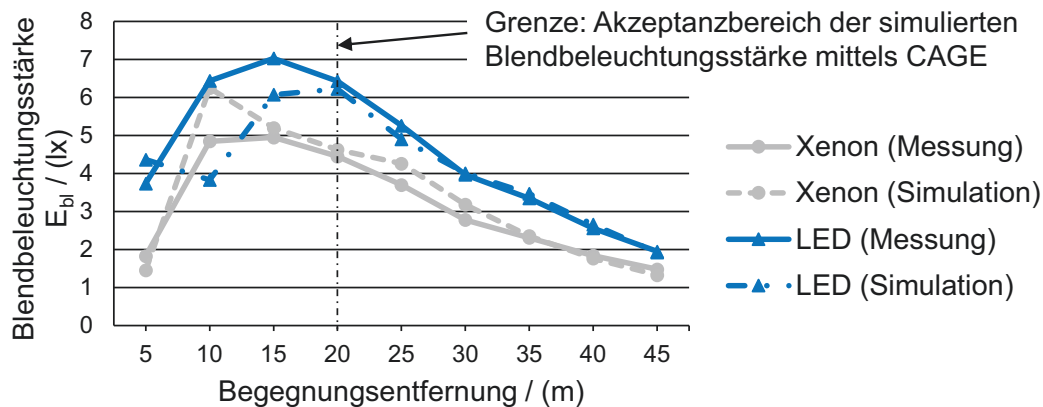


Abbildung 7.5: Verifizierung der Funktionalität von CAGE, am Beispiel eines Xenon- und LED-Scheinwerfers bei spiegelnder Fahrbahnoberfläche (Abweichung  $\leq 15,2\%$  ab Entfernungen  $> 20$  m)

dem Xenon-System handelt es sich um ein Projektionssystem, wohingegen das LED-System ein Multi-Projektionssystem ist. Dieses Wissen ist in der Software hinterlegt. Werden Entfernungen außerhalb des Akzeptanzbereichs ( $< 20$  m) gewählt, erscheint ein Hinweisfenster, dass erhöhte Abweichungen auftreten können.

Für Begegnungsentfernungen  $> 20$  m entsprechen die simulierten Werte nahezu der messtechnisch erfassten Blendbeleuchtungsstärke (vgl. Abbildung 7.5). Die maximale Abweichung wurde für das Xenon-System ermittelt und beträgt in 25 m Entfernung 15,2%. Für eine qualitative Bewertung wird dies als hinreichend genau erachtet.

### Wozu eignet sich CAGE?

CAGE eignet sich vorrangig zur Bewertung der im Passiervorgang erzeugten Blendbeleuchtungsstärke. Die unabhängigen Parameter sind dabei die Anbaugeometrie der Scheinwerfer, die geometrischen Bedingungen im Passiervorgang sowie die Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche. Der wesentliche Vorteil von CAGE ist der frühzeitige Einsatz im Entwicklungsprozess. Bereits die erste simulierte Lichtverteilung eines Scheinwerfers kann mit CAGE analysiert werden. Dabei bietet CAGE folgende Funktionen:

- Ermittlung geometrisch relevanter Maße zur Blendungsbewertung
  - Koordinaten des mathematischen Reflexpunktes  $(x_i, y_i)$
  - Entfernungsabhängiger Blendwinkel  $\Theta_i$
- Visualisierung der Ergebnisse anhand standardisierter Diagramme
- Automatische Generierung eines Prüfberichtes zu Dokumentationszwecken, speziell im Entwicklungsprozess

Neben den zuvor genannten Funktionen bietet CAGE folgende Besonderheiten:

- Benchmark verschiedener Lichtverteilungen
- Ermittlung der direkten, indirekten und gesamten Blendbeleuchtungsstärke
- Ermittlung der resultierenden physiologischen Blendung nach CIE 146:2002 [CIE02]

Da CAGE zunächst eine qualitative Bewertung ermöglicht, stellen die beiden letzten Punkte zum Zeitpunkt der Arbeit die erste Entwicklungsstufe dar. Eine Weiterentwicklung wird als sinnvoll erachtet, gerade mit Blick auf künftig hochaufgelöste Scheinwerfersysteme mit adaptiven Lichtverteilungen. Mögliche Entwicklungsstufen werden im nächsten Abschnitt aufgezeigt.

### **Welche weiteren Entwicklungsschritte sind empfehlenswert?**

Zunächst empfiehlt sich eine Testphase der Software. Im Rahmen der Testphase sind weitere Messungen mit anderen Scheinwerfern durchzuführen. Die Messergebnisse sind anschließend mit den Simulationsergebnissen abzugleichen. Der Abgleich soll aufzeigen, ob die Funktionalität von CAGE allgemein für alle Scheinwerfer und deren Lichtverteilungen gewährleistet wird.

Die aus der Testphase erzielten Erkenntnisse hinsichtlich Bedienung, vor allem aber Genauigkeit, sind bei den weiteren Entwicklungsschritten zu berücksichtigen. Von den Ergebnissen ist abhängig, ob es zielführend ist, die punktuelle Bewertung beizubehalten. Um künftig auch quantitative Aussagen treffen zu können, wird eine Bewertung entlang der gesamten Reflexlinie als zielführender erachtet, wenngleich diese mit mehr Rechenaufwand verbunden ist. Die Ergebnisse aus Kapitel 6.2 lassen erkennen, dass ein solcher Ansatz insbesondere zur Bewertung der psychologischen Blendung zwingend erforderlich wäre. Zudem ist dieser Ansatz erforderlich, um den Effekt eines adaptiven blendfreien Abblendlichts bewerten zu können.

Zudem wäre empfehlenswert, die ermittelten Bewertungsfunktionen, die aus Messungen im Freien resultieren, auf eine Referenzumgebung zu übertragen. Aufgrund von Umwelteinflüssen sind Feldmessungen nur bedingt geeignet. Dementsprechend treffen die Bewertungsfunktionen nur für die Umgebungsbedingungen zu, die bei dem in Kapitel 6.1 beschriebenen Versuch vorgelegen hatten. Eine Referenzumgebung, die wiederholbare Bedingungen liefert, wäre daher zweckmäßig.

Mit der Zielsetzung einer quantitativen Bewertung der Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang erachtet der Autor die Bewertung entlang der gesamten Reflexlinie und die Überführung der Messungen in eine Referenzumgebung am wichtigsten.

### **Fazit**

Im vorliegenden Kapitel wurde beschrieben, worum es sich bei CAGE handelt und wie es entwickelt wurde. Die Genauigkeit wurde anhand von zwei Beispielen aufgezeigt. Zusätzlich wurden

---

---

weitere Entwicklungsschritte angeführt, die erforderlich wären, um künftig nicht nur eine qualitative, sondern auch genaue quantitative Aussage über die Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang treffen zu können. Zur allgemeingültigen Verifizierung der Funktionalität von CAGE wären weiterführende Messungen mit weiteren Scheinwerfern erforderlich.

Zusammenfassend stellt CAGE eine neuartige Bewertungsmethode dar, mit deren Hilfe die Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang zunächst halbquantitativ ermittelt werden kann.





## 8 Abgeleitete Anforderungen

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erhöhung der Verkehrssicherheit<sup>1</sup> im nächtlichen Straßenverkehr bei regennasser Fahrbahn. Dies soll künftig durch ein adaptives blendfreies Abblendlicht für spiegelnde Fahrbahnoberflächen gewährleistet werden. Daher wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Anforderungen an ein solches System entwickelt. Diese werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

Zunächst wird auf die sogenannte **A**nti **G**lare **F**unktion (AGF) eingegangen. Diese beschreibt die Anpassung der Abblendlichtverteilung an geänderte Reflexionseigenschaften der Fahrbahn. (→ Kapitel 8.1)

Des Weiteren werden photometrische Anforderungen angeführt. Eine Visualisierung erfolgt anhand des ECE-Messschirms. (→ Kapitel 8.2)

Zuletzt werden wahrnehmungsbasierte Anforderungen vorgestellt. Diese sind mit dem menschlichen Blendempfinden verknüpft und geben Hinweise, die bei der Systemauslegung des adaptiven blendfreien Abblendlichts zu berücksichtigen sind. (→ Kapitel 8.3)

### 8.1 Anti-Glare-Funktion für spiegelnde Fahrbahnoberflächen

Das in Kapitel 6.2 getestete blendfreie Abblendlicht für spiegelnde Fahrbahnoberflächen reduziert sowohl die physiologische als auch psychologische Blendung auf das Maß einer trockenen Fahrbahnoberfläche. Realisiert wurde das Abblendlicht durch eine im Strahlengang befindliche Blende. Die Lichtstärke in diesem Bereich wird dadurch vollständig reduziert. Dies kann aus Fahrerperspektive zu einer inhomogenen Lichtverteilung führen. Daher kann sich eine solche Lichtverteilung negativ auf den Fahrkomfort auswirken.

FISCHER [Fis15] testete ein vergleichbares System und erzielte hinsichtlich physio- und psychologischer Blendung ebenfalls einen sehr positiven Effekt. Zusätzlich ließ er den Fahrkomfort bewerten. Aufgrund der vollständigen Reduzierung der Lichtstärke wurde die eigene Ausleuchtung tendenziell geringfügig schlechter bewertet.

Ziel der Anti-Glare-Funktion (AGF) ist, trotz Reduzierung der Lichtstärke keine schlechtere Bewertung des Fahrkomforts zu erhalten. Die physio- und psychologische Blendung sollen dennoch bestmöglich reduziert werden.

---

<sup>1</sup>Bedeutet eine Reduzierung der physiologischen und psychologischen Blendung.

---

Zur Realisierung der AGF ist der Leuchtdichtekoeffizient der Fahrbahn der maßgebliche Parameter. Die Herleitung ist in den Formeln 8.1 bis 8.4 beschrieben.

$$q_i(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o) = \frac{L_i(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o)}{E_{SW}(\Theta, \epsilon_i)}; \text{ in } (cd * m^{-2} * lx^{-1}) \quad (8.1)$$

mit  $L$  : Leuchtdichte auf der Fahrbahn aus der Perspektive  
des Entgegenkommenden ( $cd/m^2$ )

Index  $i$  : Fahrbahnzustand ( $n = \text{nass}$ ;  $t = \text{trocken}$ )

$E_{SW}$  : Radiale Beleuchtungsstärke aus Richtung des Scheinwerfers  
am Messpunkt auf der Fahrbahn ( $lx$ )

$\Theta$  : Horizontaler Blendwinkel in ( $^\circ$ )

$\epsilon_i, \epsilon_o$  : Lichteinfallswinkel ( $i$ ) und Lichtausfallswinkel ( $o$ ) in ( $^\circ$ )

$$q_t(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o) = \frac{L_t(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o)}{E_{SW}(\Theta, \epsilon_i)} \quad (8.2)$$

$$q_n(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o) = q_t(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o) * f_{AGF}(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o) \quad (8.3)$$

$$\begin{aligned} \rightarrow f_{AGF}(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o) &= \frac{q_n(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o)}{q_t(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o)} \\ &= \frac{L_n(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o)}{E_{SW}(\Theta, \epsilon_i)} * \frac{E_{SW}(\Theta, \epsilon_i)}{L_t(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o)} = \frac{L_n(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o)}{L_t(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o)} \end{aligned} \quad (8.4)$$

Um folglich bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche ähnliche Bedingungen wie bei einer trockenen Fahrbahnoberfläche zu gewährleisten, ist die Beleuchtungsstärke  $E_{SW}$  durch  $f_{AGF}$  zu dividieren (siehe Formel 8.5). Die reduzierte Beleuchtungsstärke  $E_{APB}$  ermöglicht theoretisch eine Reduzierung der physio- und psychologischen Blendung auf das Maß einer trockenen Fahrbahn. Dies wäre im nächsten Schritt anhand von Probandenstudien zu validieren. Mit Blick auf die angeführten Ergebnisse von FISCHER [Fis15] ist davon auszugehen, dass die Bewertung besser ausfallen wird.

$$E_{APB}(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o) = \frac{E_{SW}}{f_{AGF}} \quad (8.5)$$

mit  $E_{APB}$  : Beleuchtungsstärke ( $lx$ ) des  
adaptiven blendfreien Abblendlichts

Zusammenfassend stellt die AGF eine Anforderung dar, die eine optimale Blendungsminimierung verspricht. Besonders vielversprechend ist die AGF aufgrund der Anpassung an die Leuchtdichtekoeffizienten unterschiedlicher Fahrbahndeckschichten. Für die in Kapitel 5.4 getesteten Bedingungen variiert  $f_{AGF}$  in Abhängigkeit der Entfernung zwischen 30 und 130 (vgl. Abbildung 5.24, S. 81). Anhand einer Datenbank könnten dem Scheinwerfersystem die dort hinterlegten Leuchtdichtekoeffizienten bzw. erforderlichen AGF für die jeweilige Fahrbahndeckschicht zur Verfügung gestellt werden. Alternativ könnte eine kamerabasierte Auswertung der Fahrbahn in

Betracht gezogen werden. Diese müsste die erforderliche AGF berechnen und dem Scheinwerfer in Echtzeit zur Verfügung stellen. Ferner wäre eine Art Fahrkomfort-optimierte AGF denkbar, die durch den Fahrer eingestellt wird. Durch Aufschalten eines variablen Parameters wäre eine individuelle Einstellung der Intensität denkbar. Die eigentliche AGF bliebe davon unberührt.

Alle zuvor beschriebenen Strategien sind nur realisierbar, wenn der Scheinwerfer gewisse Systemvoraussetzungen erfüllt. Diese werden im nachfolgenden Kapitel näher beschrieben.

## 8.2 Photometrische Anforderungen

Anhand der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse wurde eine Segmentierung der Lichtverteilung in verschiedene Zonen vorgenommen. Den Zonen wurden entsprechende photometrische Anforderungen zugrunde gelegt. Diese werden im folgenden beschrieben. Des weiteren wird auf die Besonderheit des adaptiven blendfreien Abblendlichts eingegangen. Durch eine dynamische Anpassung der Lichtverteilung soll die indirekte Blendung im Passiervorgang bestmöglich reduziert werden.

### Segmentierung der Lichtverteilung

Abbildung 8.1 zeigt die vier Zonen der Lichtverteilung des adaptiven blendfreien Abblendlichts. Die zugehörigen photometrischen Anforderungen sind Tabelle 8.1 zu entnehmen.

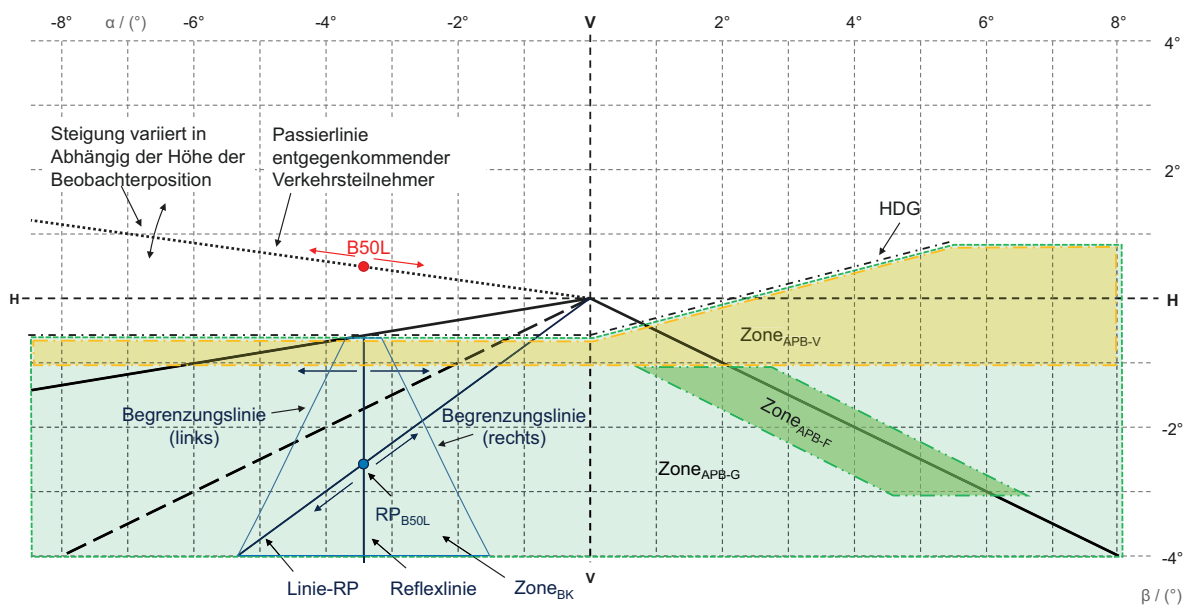


Abbildung 8.1: Vorschlag für die Lichtverteilung eines adaptiven blendfreien Abblendlichts für spiegelnde Fahrbahnoberflächen

Die  $Zone_{APB-G}$  (siehe Abbildung 8.1) entspricht der gesamten Abblendlichtverteilung. Folglich sind die photometrischen Anforderungen der jeweiligen ECE-Regelung zu entnehmen ([ECE98],

Tabelle 8.1: Vorschlag für die photometrischen Anforderungen des adaptiven blendfreien Abblendlichtes für spiegelnde Fahrbahnoberflächen

Bereich	vertikal / (°)	horizontal / (°)	Lichtstärke I/ (cd)
$Zone_{APB-G}$	Anforderungen nach ECE ([ECE98], [ECE112], [ECE123])		
$Zone_{BK}$	< - 0,57	siehe Formel 8.8	$I_{ECE} * f_{AGF}(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o)^{-1}$
$RP_{B50L}$	entlang der Linie-RP		$I_{ECE} * f_{AGF}(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o)^{-1}$
$Zone_{APB-V}$	> -1,0	Winkelbereich des Abblendlichts	> 12.675
$Zone_{APB-F}$	-3,0 ... -1,0	0,5 ... 6,5	$I_{ECE} * f_{AGF}(\Theta, \epsilon_i, \epsilon_o)$

[ECE112], [ECE123]). Die Besonderheit der Zone ist die adaptive  $Zone_{BK}$ . Zur Realisierung der  $Zone_{BK}$  muss die gesamte  $Zone_{APB-G}$  weitere Anforderungen hinsichtlich Auflösung und Dimmbarkeit erfüllen. Diese werden unter *Auflösung im Nah- und Fernfeld* und *Dimmbarkeit der Lichtstärke* angeführt.

Die  $Zone_{BK}$  (siehe Abbildung 8.1) ist der Bereich, der im Falle einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche maßgeblich zur Reflexblendung beiträgt. Ausgangspunkt für die Auslegung der  $Zone_{BK}$  ist der Punkt B50L (siehe Abbildung 8.1). Dieser stellt die Position der Augen eines entgegenkommenden Verkehrsteilnehmers dar und bewegt sich im Passiervorgang entlang der dargestellten *Passierlinie*. Dieser Bewegung muss die  $Zone_{BK}$  um den horizontalen Winkel folgen, um die indirekte Blendung im Passiervorgang kontinuierlich zu eliminieren. In Abhängigkeit der Begegnungsentfernung sind sowohl die Lichtstärke als auch das geometrische Abmaß der  $Zone_{BK}$  anzupassen. Die Lichtstärke ist mit Hilfe der AGF anzupassen (siehe Kapitel 8.1). Auf das geometrische Abmaß der  $Zone_{BK}$  wird nachfolgend unter *Breite der Zone<sub>BK</sub>* und *Gradient der Zone<sub>BK</sub>* eingegangen.

Der Punkt  $RP_{B50L}$  stellt den mathematischen Reflexpunkt dar. In Abhängigkeit der Begegnungsentfernung wandert der Punkt parallel zur Fahrbahn-Mittellinie entlang der Linie-RP (siehe Abbildung 8.1). Im Falle einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche wird Licht von dort an den Punkt B50L reflektiert. Dies belegen die Ergebnisse aus Kapitel 5.1. Da nur im Extremfall eine ideal spiegelnde Fahrbahnoberfläche vorliegt, befindet sich das Maximum in der Realität meist hinter oder vor dem theoretischen Reflexpunkt. Dieses Verhalten wurde bei den Messungen aus Kapitel 5.4 beobachtet und wird durch bisherige Forschungsergebnisse bestätigt (u.a. [Ros00], [Köh11]). Die Abweichungen vom theoretischen Punkt sind allerdings vernachlässigbar, da die Lichtstärke innerhalb der gesamten adaptiven  $Zone_{BK}$  in Abhängigkeit der AGF reguliert wird.

Die  $Zone_{APB-V}$  (siehe Abbildung 8.1) trägt bei spiegelnder Fahrbahnoberfläche zur Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung bei. Aus Kapitel 6.2 geht hervor, dass speziell die Lichtverteilung des Xenonsystems im Bereich der  $Zone_{APB-V}$  höhere Lichtstärken aufweist. Dies führt bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche in größeren Entfernungen zu einer starken Steigerung des

Objektkontrastes (vgl. Abbildung 6.14, S. 102). Aus diesem Grund empfiehlt sich eine Erhöhung der Lichtstärke, die mindestens der Lichtstärke des Xenonsystems entspricht (siehe Tabelle 8.1). Diese Erhöhung ist als unkritisch zu erachten, da der Bereich nicht maßgeblich zur Blendung beiträgt. Der Teilbereich, der zur Blendung beitragen würde, wird durch die adaptive  $Zone_{BK}$  berücksichtigt.

Die  $Zone_{APB-F}$  dient zur Ausleuchtung des Bereichs, in den der Fahrer primär blickt [SCS01]. Der Vorschlag für diese Zone resultiert zum einen aus den Ergebnissen der Umfrage (siehe Kapitel 4.3, Ergebnisse der offenen Fragen, S. 54). Zum anderen basiert er auf den gewonnenen Erkenntnissen aus dem Teilversuch I des Kapitels 6.2. Aufgrund der verkürzten Fixationsentfernung (46 m  $\rightarrow$  31 m) entsprach die bei spiegelnder Fahrbahnoberfläche ermittelte Adaptationsleuchtdichte ungefähr der Adaptationsleuchtdichte bei trockener Fahrbahn (siehe Abbildung 6.12, S. 101). Ziel wäre, die Verkürzung der Fixationsentfernung zu verhindern, indem die Lichtstärke in der  $Zone_{APB-F}$  erhöht wird, um die Adaptationsleuchtdichte trotz spiegelnder Fahrbahnoberfläche aus Fahrerperspektive aufrecht zu erhalten. Einen ähnlichen Vorschlag machte DAMASKY [Dam95], um bei nasser Fahrbahn ein Art „Führungsfunktion“ zu gewährleisten (vgl. Abbildung 3.6, S. 33). Zusätzlich begünstigt  $Zone_{APB-F}$ , ähnlich wie  $Zone_{APB-V}$ , eine Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung, ohne dabei entgegenkommende Verkehrsteilnehmer zu blenden.

### Breite der $Zone_{BK}$

Bei der Untersuchung aus Kapitel 5.4 wurde beobachtet, dass die Reflexblendung bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche maßgeblich durch einen Streifen konstanter Breite verursacht wird, der sich auf der Fahrbahn ausbildet (siehe Abbildung 5.18, S. 77). Dieses Verhalten wird durch die bisherigen Forschungsergebnisse bestätigt (siehe Abbildung 3.2, S. 29). Daher soll  $Zone_{BK}$  genau diesen Bereich auf der Fahrbahn aus der Lichtverteilung schneiden.

Der am Messschirm resultierende Winkelbereich ( $^\circ$ ) für die in Abbildung 8.1 dargestellte  $Zone_{BK}$  kann mit Formel 8.8 berechnet werden. Die Herleitung erfolgt über die beiden Formeln 8.6 und 8.7.

$$\tan(\alpha) = \frac{y_{1/2Zone_{BK}}}{x} \quad (8.6)$$

$$\tan(\beta) = \frac{z_{SW}}{x} \quad (8.7)$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \tan(\alpha) &= \frac{y_{1/2Zone_{BK}}}{z_{SW}} * \tan(\beta) \\ \rightarrow \alpha &= \arctan\left(\frac{y_{1/2Zone_{BK}}}{z_{SW}} * \tan(\beta)\right) \end{aligned} \quad (8.8)$$

mit  $y_{1/2Zone_{BK}}$  : Halbe Breite der  $Zone_{KB}$  in (m)

$x$  : Entfernung ausgehend vom Scheinwerfer in (m)

$z_{SW}$  : Scheinwerferanbauhöhe in (m)

$\alpha, \beta$  : Horizontal – und Vertikalwinkel in ( $^\circ$ )

Der ermittelte Horizontalwinkel  $\alpha$  in ( $^\circ$ ) (siehe Formel 8.8) entspricht dem halben Winkelbereich der  $Zone_{BK}$ . Bei  $y_{1/2Zone_{BK}}$  und  $z_{SW}$  handelt es sich um Parameter, die vorab festzulegen sind. Der Wert für  $y_{1/2Zone_{BK}}$  entspricht der halben Breite der  $Zone_{BK}$  auf der Fahrbahnoberfläche. Die Breite ist unter Berücksichtigung der Scheinwerferanbauhöhe und der Auslegung des Scheinwerfersystems zu wählen. Den Beobachtungen aus Kapitel 5.4 zu folge eignet sich ungefähr das Eineinhalbfache der Breite des Abblendlichtreflektors.

Abbildung 8.1 veranschaulicht die zur  $Zone_{BK}$  gehörigen Begrenzungslinien. Diese sind symmetrisch um die Reflexlinie angeordnet. Mit Hilfe von Formel 8.8 wird zunächst nur eine Begrenzungslinie ermittelt. Diese ist anschließend an der Reflexlinie zu spiegeln.

Die Ergebnisse aus Kapitel 6.2 bestätigen, dass durch den Einsatz einer Blende, die den Bereich der  $Zone_{BK}$  abschattet, eine deutliche Reduzierung der physio- und psychologischen Blendung möglich ist. Das Auftreten einer Reflexblendung ist dadurch allerdings nicht vollständig ausgeschlossen. Dies war sowohl bei eigenen Untersuchungen zu beobachten als auch bei dynamischen Tests von *Fischer* [Fis15]. Bei einer im Strahlengang befindlichen Blende gelangt vermutlich noch immer Streulicht in diesen Bereich, wodurch ein Halbschatten entsteht. Dieser Effekt ist in weiterführenden Studien zu untersuchen.

Bisherige Konzepte maskieren in Abhängigkeit des Vertikalwinkels  $\beta$  lediglich einen konstanten Horizontalwinkel  $\alpha$  [BSA<sup>+</sup>08], [Fis15]. Insbesondere der Bereich im Vorfeld wird dadurch nicht vollständig maskiert. Im Vergleich dazu ermöglicht die vorgestellte  $Zone_{BK}$  eine optimierte Maskierung der Reflexblendung.

### Gradient der $Zone_{BK}$

Welcher Lichtstärke-Gradient sich für den Übergang der  $Zone_{BK}$  zur normalen Lichtverteilung als geeignet erweist, wurde nicht untersucht. An dieser Stelle wird auf die umfangreichen Studien verwiesen, die im Zusammenhang mit dem blendfreien Fernlicht durchgeführt wurden (u.a. [AVD<sup>+</sup>14], [Mic15]). Abgesehen von der  $Zone_{BK}$ , die primär für das adaptive blendfreie Abblendlicht relevant ist, sind auch die Übergänge der anderen Zonen ( $Zone_V$ ,  $Zone_F$ ) in zusätzlichen Studien zu testen.

### Auflösung im Nah- und Fernfeld

Im Nahfeld mit kleiner werdendem Vertikalwinkel  $\beta$  (negativ) kann die Auflösung in horizontaler Richtung ( $\alpha$ ) gering ausgelegt werden (vgl.  $Zone_{BK}$  aus Abbildung 8.1). Die Reflexlinien liegen in diesem Bereich nahe beieinander (vgl. Abbildung 5.16, S. 75). Daher empfiehlt sich in diesem Bereich eine dauerhafte Reduzierung der Lichtstärke, wie es in der ECE-Regelung 123 für die Klasse W definiert ist [ECE123].

Im Fernfeld nahe der HDG ist eine horizontale Auflösung ( $\alpha$ ) von ungefähr  $0,5^\circ$  geeignet (siehe Abbildung 8.1). Dieser Winkel basiert auf einer angenommenen Breite von  $y_{1/2Zone_{BK}} = 0,3$  m auf der Fahrbahn für die  $Zone_{BK}$  und einer Scheinwerferanbauhöhe von  $0,65$  m.



Abgesehen von der zuvor genannten Auflösung sollte die Möglichkeit bestehen, die  $Zone_{APB-V}$  (siehe Abbildung 8.1) unabhängig von der  $Zone_{BK}$  regeln zu können. Zudem empfiehlt sich, die Auflösung in Kombination mit der Überlagerungsstrategie der einzelnen  $Zonen_{BK}$  zu definieren. Wie bei den blendfreien Fernlichtsystemen stellt die Wahl der optimalen Auflösung auch bei dem adaptiven blendfreien Abblendlicht eine besondere Herausforderung dar. Diese wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet. Daher sind die gemachten Angaben zunächst als Richtwerte zu sehen.

### Dimmbarkeit der Lichtstärke

Die Dimmbarkeit des Systems ist zwingend erforderlich. Ohne diese verliert die AGF ihre Wirksamkeit. Die Lichtstärke so viel wie möglich, aber nur so viel wie nötig zu dimmen, ist die Besonderheit der AGF. Dies soll eine maximale Blendungsreduzierung bei minimalem Fahrkomfortverlust ermöglichen.

Ferner ist die Dimmbarkeit für die  $Zone_{APB-V}$  erforderlich, um den positiven Effekt der erhöhten Vorwärtsreflexion auf die Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung auszunutzen (siehe Ergebnisse, Kapitel 6.1).

### Variation der Lichtfarbe

Sofern die Reduzierung der psychologischen Blendung im Fokus steht und der Einfluss auf den Fahrkomfort vernachlässigt werden darf, könnte eine Variation der Lichtfarbe bei dem adaptiven blendfreien Abblendlicht unterstützend zum Einsatz kommen. Dies belegen die Ergebnisse aus Kapitel 6.3. Da diese in einem statischen Versuch ermittelt wurden, bleibt zu prüfen, ob die Variation der Lichtfarbe sich auch im dynamischen Fahrversuch als geeignet erweist.

Nachfolgend werden Anforderungen aufgeführt, die aufgrund der subjektiven Wahrnehmung bei der Entwicklung eines adaptiven blendfreien Abblendlichts zu berücksichtigen sind.

## 8.3 Wahrnehmungsbasierte Anforderungen

Die wahrnehmungsbasierten Anforderungen beziehen sich auf die Hell- und Kontrastempfindung im nächtlichen Straßenverkehr. Die Hellempfindung ist dabei unabhängig von der Kontrastempfindung (siehe auch [Völ06]). Beide werden allerdings durch die Reflexblendung und die geänderten Bedingungen bei regennasser Fahrbahn beeinflusst, wie die Ergebnisse aus Kapitel 6.2 belegen. Daher hat ein adaptives blendfreies Abblendlicht folgende wahrnehmungsbasierte Anforderungen zu erfüllen:

Die Lichtstärke ist im Bereich der Reflexblendung (siehe  $Zone_{BK}$ , Abbildung 8.1) mindestens soweit zu reduzieren, dass der Leuchtdichteunterschied zum Umfeld aus der Perspektive des Gegenverkehrs  $< 100 : 1$  ist. Größere Leuchtdichteunterschiede sind zu vermeiden, da sie stark blendend wahrgenommen werden [WWB<sup>+</sup>07].

Aus Fahrerperspektive ist darauf zu achten, dass die Lichtstärke im Bereich der Reflexblendung (siehe Zone<sub>BK</sub>, Abbildung 8.1) nur soweit reduziert wird, dass keine wahrnehmbaren Inhomogenitäten entstehen. Diese führen zu ungewollten Adaptationszuständen [Völ06].

Die erhöhte Vorwärtsreflexion einer nassen Fahrbahn kommt der zuvor genannten Anforderung aus Fahrerperspektive zugute. Es ist davon auszugehen, dass der Leuchtdichteunterschied, der aus einer Reduzierung der Lichtstärke im Bereich der Zone<sub>BK</sub> resultiert, bei einer nassen Fahrbahn nicht so störend empfunden wird, wie bei einer trockenen Fahrbahn. Diese Hypothese wäre in weiteren Probandenstudien zu untersuchen. Sofern dies zutrifft, wäre dieser Effekt wiederum vorteilhaft zur Realisierung der AGF, da hierfür die Lichtstärke bzw. die entfernungsabhängige Beleuchtungsstärke teilweise vollständig reduziert werden muss. Vorausgesetzt beide zuvor genannten Anforderungen werden erfüllt, würde dies das optimale adaptive blendfreie Abblendlicht darstellen.

Zu Realisierung der wahrnehmungsbasierten Anforderungen werden weitere Anforderungen an das gesamte Scheinwerfersystem gestellt. Das System muss die Möglichkeit bieten, den Nässegrad der Fahrbahn zu detektieren. Hierzu eignen sich Kamerasysteme oder andere Sensoren ([RL10], [FK14]). Zudem muss die Umfeldhelligkeit ermittelt werden. Hier kann auf heute verfügbare Lichtsensoren zurückgegriffen werden. Diese sind meist standardmäßig oder in Verbindung mit entsprechenden Licht-Paketen bereits im Fahrzeug verbaut.

Zum Testen der genannten Anforderungen eignen sich Systeme wie Propix (siehe Kapitel 2.1, S. 10). Mit dem Forschungsscheinwerfer können Probandenstudien durchgeführt werden, um die Effektivität der Anforderungen zu validieren. Aufgrund der Auslegung des Systems ist die Bewertung allerdings nur aus Fahrerperspektive sinnvoll. Die Anforderungen aus der Perspektive des Gegenverkehrs können dennoch messtechnisch abgeprüft werden. Dies ermöglicht eine Optimierung der Anforderungen hinsichtlich Verkehrssicherheit und Fahrkomfort.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die zuvor genannten Anforderungen einen wesentlichen Beitrag zur Verkehrssicherheit erwarten lassen. Sie minimieren nicht nur die Blendung der Verkehrsteilnehmer, sondern auch die heutiger kamerabasierter Scheinwerfersysteme.

---

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden lichttechnische, physio- und psychologische Untersuchungen durchgeführt. Diese hatten zum Ziel, Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht zu entwickeln. Das adaptive blendfreie Abblendlicht soll bei spiegelnder Fahrbahnoberfläche die Verkehrssicherheit erhöhen, ohne den Fahrkomfort bemerkbar einzuschränken. Aus diesem Grund wurde speziell der Einfluss der indirekten Blendung im Passiervorgang analysiert.

Einleitend wurden die wesentlichen Grundlagen angeführt. Aus der Recherche der bisherigen Forschungsergebnisse ergaben sich offene Fragen. Diese stellen die Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit dar, die jeweils am Ende der Kapitel zusammengetragen wurden (siehe Kapitel 3.1 ff.).

Vor den Untersuchungen wurde der Parameterraum eingegrenzt. Zudem wurde ein Geometriemodell entwickelt, das allen Untersuchungen zugrunde gelegt wurde. Eine Umfrage verdeutlichte die Relevanz eines adaptiven blendfreien Abblendlichts aus der Sicht der Verkehrsteilnehmer. Die Teilnehmer gaben an, dass die indirekte Blendung bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche mindestens genauso stark blendend empfunden wird wie die direkte. Auch bestätigte sich der negative Effekt einer gezielten Information über die indirekte Blendung. Zusätzlich lieferte die Umfrage wichtige Erkenntnisse bezüglich geometrischer Aspekte, die zu berücksichtigen sind. Die relevante Entfernung für die psychologische Blendung stimmt nicht mit der für die physiologische überein. Um daher im Passiervorgang eine kontinuierliche Reduzierung der physio- und psychologischen Blendung zu gewährleisten, ist ein adaptives blendfreies Abblendlicht erforderlich.

Die wichtigsten Ergebnisse der unter Laborbedingungen und im Freien durchgeführten Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Licht- und Fahrerassistenzhalle von IAV bietet eine geeignete Referenzumgebung zur Blendungsbewertung von Kfz-Scheinwerfern. Insbesondere ist die Umgebung geeignet, um den Einfluss der indirekten Blendung zu analysieren. Das Reflexionsverhalten für Rückwärtsreflexion der Bodenfliesen ist ähnlich dem einer nassen Fahrbahn (vgl. Abbildung 5.5, S. 62). Zusätzlich wurden Umrechnungsfaktoren ermittelt, die einen Rückschluss auf andere Fahrbahnoberflächen zulassen (Faktoren, siehe Tabelle B.3, Anhang B). Durch Aufbringen eines flächendeckenden Wasserfilms wurde der starke Effekt der Reflexblendung aufgezeigt (vgl. Abbildung 5.9, S. 67). Die erzielten Ergebnisse bestätigen die Funktionalität des eingesetzten Geometriemodells, das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde (vgl. Abbildung 7.1, S. 119).
-

2. Die Analyse des Einflusses der Scheinwerferanbauhöhe belegt, dass die gesamte Blendbeleuchtungsstärke mit steigender Anbauhöhe stärker steigt als die direkte Blendbeleuchtungsstärke (vgl. Abbildung 5.15, S. 73). Dies verdeutlicht den stärkeren Effekt der Reflexblendung auf die physiologische Blendung. Zudem sind in Abhängigkeit der Anbauhöhe unterschiedliche Fahrbahnbereiche maßgeblich für die indirekte Blendung verantwortlich. Mit zunehmender Anbauhöhe liegen die Fahrbahnbereiche in größeren Entfernungen vom Scheinwerfer (vgl. Abbildung 5.14, S. 72). Zur Vorhersage dieser Bereiche eignet sich das entwickelte Geometriemodell (siehe Kapitel 7.1).
  3. Erstmals wurde innerhalb einer Referenzumgebung unter wiederholbaren Bedingungen die Reflexblendung im Passiervorgang untersucht. Dazu wurden die „Blendkeulen“ analysiert, die in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung die Reflexblendung verursachen (vgl. Abbildung B.7 und Abbildung B.8, Anhang B). Bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche tragen diese „Blendkeulen“, die sich entlang der Reflexlinie zwischen Scheinwerfer und Beobachter auf der Fahrbahn ausbilden, maßgeblich zur physio- und psychologischen Blendung bei. Dies bestätigen die im Freien durchgeführten Studien (vgl. Abbildung 6.17 bis Abbildung 6.19, S. 103 ff.). Bei trockener Fahrbahn werden die physio- und psychologische Blendung primär durch die direkte Blendung bestimmt. Die Ergebnisse wurden anhand der getrennten Darbietung der direkten und indirekten Blendsituation ermittelt.
  4. Im Passiervorgang werden Verkehrsteilnehmer in Abhängigkeit der Lichtverteilung unterschiedlichen Blendbeleuchtungsstärken ausgesetzt (vgl. Abbildung 6.6 bis Abbildung 6.8, S. 90ff.). Dabei haben sowohl die Scheinwerferanbauposition als auch die Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche einen starken Einfluss. Hier zeigt sich erneut der Einfluss der „Blendkeulen“, die zur Reflexblendung beitragen. Lichtverteilungen mit hohen Intensitäten im Vorfeld verursachen speziell in kurzen Begegnungsdistanzen hohe Blendbeleuchtungsstärken. Lichtverteilungen mit einer gleichmäßigen Beleuchtungsstärkeverteilung auf Höhe der Fahrbahn wirken sich besonders negativ auf die Blendbeleuchtungsstärke in größeren Begegnungsdistanzen aus. Das Erfüllen der gesetzlichen Anforderungen liefert daher keine Aussage über die zu erwartende Blendung im Passiervorgang bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche. Unabhängig von den Lichtverteilungen wurde sowohl für die linke, als auch die rechte Scheinwerferanbauposition eine Funktion in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung ermittelt, die eine qualitative Bewertung der Erhöhung der Blendbeleuchtungsstärke aufgrund einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche ermöglicht (Funktionen, siehe Abbildung 6.9, S. 92).
  5. Zusätzlich wurde die Auswirkung einer Variation der Lichtfarbe untersucht. Eine gelbe Lichtfarbe reduziert zwar die psychologische Blendung, gleichzeitig führt sie allerdings zu einer signifikant schlechteren Bewertung der Fahrbahnausleuchtung aus Fahrerperspektive. Eine blaue Lichtfarbe hat dagegen einen positiven Effekt auf die Bewertung der Fahrbahnausleuchtung, ohne die psychologische Blendung signifikant zu erhöhen. Unter
-

---

Berücksichtigung beider Perspektiven (Fahrer und Gegenverkehr) ist die blaue Lichtfarbe zu präferieren.

Die zuvor beschriebenen Ergebnisse verdeutlichen, dass eine spiegelnde Fahrbahnoberfläche und das über die Fahrbahn reflektierte Licht der jeweiligen Abblendlichtverteilung maßgeblich die physio- und psychologische Blendung beeinflussen. Ein adaptives blendfreies Abblendlicht ist daher vielversprechend. Dafür wurden folgende Anforderungen entwickelt:

- **Anti-Glare-Funktion (AGF)**

Die AGF ermöglicht die Leuchtdichte der „Blendkeule“ bei spiegelnder Fahrbahnoberfläche auf diejenige einer trockenen Fahrbahn zu reduzieren (AGF, siehe Kapitel 8.1). Dementsprechend werden auch die physio- und psychologische Blendung reduziert. Da maximal so viel Licht wie nötig weggenommen wird, ist von einem maximal möglichen Fahrkomfort für den Fahrer auszugehen. Die Effektivität wäre durch Probandenstudien zu validieren.

- **Photometrische Anforderungen**

In Verbindung mit der AGF wurde eine adaptive Zone definiert (siehe Abbildung 8.1, S. 137). Diese Zone stellt den Bereich auf der Fahrbahn dar, der zu einer indirekten Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer führt. Besonderheit dieser Zone ist, dass unabhängig von der Entfernung vom Scheinwerfer ein Streifen konstanter Breite aus der Lichtverteilung auf der Fahrbahn „geschnitten“ wird. Dies gewährleistet, dass speziell der Bereich im Vorfeld der Lichtverteilung maskiert wird, was aktuelle Konzepte nicht realisieren. Zusätzlich wurden Zonen inklusive der erforderlichen Lichtstärken definiert, die primär zum Fahrkomfort beitragen sollen.

- **Wahrnehmungsbasierte Anforderungen**

Die Anforderungen berücksichtigen die Hell- und Kontrastempfindung des visuellen Systems. Dementsprechend wird empfohlen, das adaptive blendfreie Abblendlicht in Abhängigkeit der Umfeldhelligkeit und des Nässegrads der Fahrbahn zu regeln. Die Beleuchtungsstärke im Bereich der „Blendkeulen“ ist um den Faktor  $1/f_{AGF}$  zu reduzieren (siehe Formel (8.5), S. 136). Der resultierende Leuchtdichteunterschied zum Umfeld sollte aus der Perspektive des Gegenverkehrs  $< 100 : 1$  sein, da größere Unterschiede als stark blendend wahrgenommen werden [WWB<sup>+</sup>07]. Aus der Fahrerperspektive ist allerdings darauf zu achten, dass kein zu großer Leuchtdichteunterschied resultiert, da dieser wiederum den Fahrkomfort reduzieren würde. Das Optimum wäre mittels Probandenstudien zu ermitteln. Zudem ist bei der lichttechnischen Auslegung des Systems speziell auf angenehme Übergänge in der Lichtverteilung zu achten, da Inhomogenitäten zu ungewollten Adaptionszuständen führen [Völ06]. Um die zuvor genannten Anforderungen auch realisieren zu können, muss das Gesamtsystem eine Erfassung der Umfeldhelligkeit und des Nässegrades der Fahrbahn gewährleisten.

Zur Validierung der zuvor beschriebenen Anforderungen wurden neuartige Bewertungsmethoden entwickelt. Diese gliedern sich in computerbasierte (\*) und messtechnische (\*\*) Methoden.

---

- **Parametrische 3D-Umgebung\***

Die Umgebung dient zur Bewertung der indirekten Blendung. Die dafür erzeugte virtuelle Straßenszene basiert auf der CIE 188:2010 und ist parametrisch aufgebaut. Die lichttechnische Analyse findet anschließend unter Einsatz der Licht-Simulationssoftware LucidShape statt. Zusätzlich ist die Umgebung zur Spezifikation von Anforderungen geeignet.

- **Simulationssoftware CAGE\***

Die Software bietet erstmals die Möglichkeit, bereits im Entwicklungsprozess eines Kfz-Scheinwerfers dessen direktes und indirektes Blendpotential im Passiervorgang vorherzusagen. Besonderheit der Software ist die Berücksichtigung geometrischer Bedingungen im Straßenverkehr. Sowohl die Scheinwerferanbauposition als auch die Eigenschaft der Fahrbahnbedeckung (trocken/nass) sind variabel.

- **Maßzahl GIR**

Hierbei handelt es sich um eine dimensionslose Maßzahl zur Bewertung des Verhältnisses der Blendbeleuchtungsstärke. Anhand von vier Kategorien kann eine Aussage getroffen werden, ob die direkte oder indirekte Blendbeleuchtungsstärke dominiert.

- **Geometriemodell: Reflexblendung - statisch\*\***

Bewertungsmethode zur Analyse der Reflexblendung innerhalb einer Referenzumgebung unter wiederholbaren Messbedingungen. Die Methode ist zudem geeignet, um die Bereiche auf der Fahrbahn vorherzusagen, die bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche maßgeblich die indirekte Blendung beeinflussen.

- **Geometriemodell: Reflexblendung - im Passiervorgang\*\***

Neuartige Bewertungsmethode zur Analyse der Reflexblendung im Passiervorgang in Abhängigkeit der Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche. Dabei wird in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung die Reflexlinie untersucht, die sich auf der Fahrbahn zwischen Scheinwerfer und Beobachter ausbildet. Die Methode ist insbesondere zur Validierung eines adaptiven blendfreien Abblendlichts geeignet.

Zusammenfassend wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit umfangreiche Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht erarbeitet.

Im nächsten Schritt wäre ein Prototypen-Scheinwerfer zu entwickeln, in dem die aufgestellten Anforderungen umgesetzt werden. Ein solcher Scheinwerfer wäre erforderlich, um das vorgeschlagene adaptive blendfreie Abblendlicht systematisch zu erproben und weiter zu optimieren. Erst Probandenstudien werden eine Antwort auf die Frage liefern, wie eine weitere Modifikation des Abblendlichts kundenseitig akzeptiert wird.

Die abgeleiteten Bewertungsmethoden eignen sich zur Validierung der aufgestellten Anforderungen. Insbesondere die neuen computerbasierten Methoden sind dabei vielversprechend. Sie ermöglichen erstmals - bereits im Entwicklungsprozess - eine qualitative Bewertung der im Passiervorgang zu erwartenden gesamten Blendbeleuchtungsstärke. Aus diesem Grund ist speziell

die Weiterentwicklung der Simulationssoftware CAGE anzustreben. In künftigen Entwicklungsschritten wären weitere Aspekte zu implementieren, um zeitnah eine quantitative Bewertung zu ermöglichen.

Der Einzug eines adaptiven blendfreien Abblendlichts in die Kfz-Scheinwerfer von morgen würde einen wesentlichen Beitrag zur Verkehrssicherheit erwarten lassen. Getreu dem Motto "So viel Licht wie nötig, so wenig Blendung wie möglich" wären morgen die störenden "Blendkeulen" von heute bereits Geschichte.

---





## Thesen

1. Die stärkste psychologische Blendung ist in einer kürzeren Begegnungsentfernung zu erwarten als die stärkste physiologische Blendung. Dies liegt in der höheren Lichtstärke der indirekten Blendquelle und des quadratischen Einflusses des Blendwinkels begründet.
  2. Die Reflexionseigenschaften des Hallenbodens als Referenzuntergrund können durch einen Umrechnungsfaktor auf den nassen Zustand anderer Proben angepasst werden, da die Bodenfliese vergleichbare Reflexionseigenschaften wie eine nasse Fahrbahn aufweist.
  3. Es besteht die Möglichkeit, den geometrisch relevanten Bereich, in dem es aufgrund einer nassen Oberfläche zu einer Reflexblendung kommt, vorab mathematisch zu bestimmen und somit bei der Auslegung von Kfz-Scheinwerfern zu berücksichtigen.
  4. In Abhängigkeit der Scheinwerferanbauhöhe sind unterschiedliche Zonen des Abblendlichtes zu maskieren, da sich der Reflexpunkt aufgrund der geometrischen Bedingungen in longitudinaler Richtung verschiebt.
  5. In Abhängigkeit der Begegnungsentfernung verursachen heutige Serienscheinwerfer unterschiedliche "Blendkeulen", die auf die jeweilige systembedingte Lichtverteilung zurückzuführen sind.
  6. Die Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang wird bei einer trockenen Fahrbahn vorrangig durch den direkten Blendanteil verursacht, der mit zunehmender Begegnungsentfernung ansteigt. Dies liegt in der Charakteristik der Abblendlichtverteilung begründet, die oberhalb der HDG mit zunehmendem Vertikalwinkel weniger Lichtstrom abstrahlt.
  7. Der dem Fahrbahnrand nähere, rechte Scheinwerfer verursacht im Passiervorgang eine geringere Blendbeleuchtungsstärke als der der Fahrbahnmitte nähere, linke Scheinwerfer. Dies ist auf den vergrößerten lateralen Abstand zwischen Scheinwerfer und Beobachter zurückzuführen.
  8. Im Passiervorgang, insbesondere bei einer spiegelnden Fahrbahn, ist mit stark unterschiedlichen Blendbeleuchtungsstärken zu rechnen. Verursacht werden diese durch die Wechselwirkung aus systembedingter Abblendlichtverteilung und dem Zustand der Fahrbahnoberfläche.
  9. Anhand einer Bewertungsfunktion in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung kann von der Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang bei trockener Fahrbahn auf die bei nasser
-

Fahrbahn geschlossen werden, da für die Erhöhung die geänderten Reflexionseigenschaften der Fahrbahn verantwortlich sind.

10. In Abhängigkeit der Abblendlichtverteilung variiert die Erkennbarkeitsentfernung bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche aufgrund von unterschiedlichen Vorfeldleuchtdichten und Objektkontrasten zum Umfeld.
11. In Abhängigkeit der Abblendlichtverteilung wird bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche die psychologische Blendung unterschiedlich bewertet. Dies ist auf die Lichtverteilung entlang der Reflexlinie und die dadurch verursachte Blendbeleuchtungsstärke zurückzuführen.
12. Die indirekte Blendung bei einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche wird störender als die direkte Blendung bei trockener Fahrbahn empfunden. Die Ursache ist der höhere Blendanteil, der durch die "Blendkeulen" verursacht wird.

Groß Schwülper, den 25.04.2016

Benedikt Kleinert

---

## Literaturverzeichnis

- [ADC<sup>+</sup>03] AKASHI, P.; DEE, P.; CHEN J.; VAN DERLOFSKE, J.; BULLOUGH, J.D.: „Interaction Between Fixed Roadway Lighting and Vehicle Forward Lighting“ In: *Progress in Automobile Lighting - PAL '03 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Schmidt-Clausen, H.-J. Darmstädter Lichttechnik, 2003, S. 11–22.
- [Adr69] ADRIAN, W.: „Die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges und die Möglichkeit ihrer Berechnung“ In: *Lichttechnik* Bd. 21, 1961.
- [Adr89] ADRIAN, W.: „Visibility of Targets: Model for Calculation“ In: *Lighting Research and Technology*, 1989.
- [ADR13] AUSTERSCHULTE, A.; DREIER, B.; ROSENHAHN, E.-O.: „Analysis of Safety Aspects for LED Matrix High Beam Function“ In: *10th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2013 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2013.
- [ADR14] AUSTERSCHULTE, A.; DREIER, B. ; ROSENHAHN, E.-O.: „Analyse von Sicherheitsaspekten adaptiver Matrix-Fernlicht Funktionen der nächsten Generation“ In: *VDI-Berichte 2221 - Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*, Hrsg. von VDI Wissensforum GmbH, 2014.
- [AFP10] AMSEL, Ch.; FLORISSEN, G.; PIETZONKA, S.: „Die nächste Generation lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme“ In: *ATZ* 112. Jahrgang (2010), Nr. 10/2010, S. 758–763.
- [AVD<sup>+</sup>14] AUSTERSCHULTE, A.; VOGT, H.; DREIER, B.; ROSENHAHN, E.-O.: „Driver perception aspects of LED-Matrix High Beams“ In: *VISION Conference*, Versailles, 2014.
- [BB11] BLANCKENHAGEN, B. v.; BÖBEL, D.: „Headlight Performance Analysis: Experience according to the CIE TC4-45 method“ In: *9th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2011 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2011.
- [Ber43] BEREK, M.: „Zum physiologischen Grundgesetz der Wahrnehmung von Lichtreizen“ In: *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 63/9, 1943.
- [BJ03] BULLOUGH, J. D.; VAN DERLOFSKE, J.; DEE, P.; CHEN, J.; AKASHI, Y.: „Impact of Headlight Glare on Peripheral Visibility“ In: *Progress in Automobile Lighting - PAL '03 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Schmidt-Clausen, H.-J. Darmstädter Lichttechnik, 2003, S. 166–180.
- [BKL09] BÖHM, M.; KREMS, J.; LOCHER, J.: „Efficacy of Adaptive Front-Lighting Systems - A Field Study Under Further Consideration of Drivers' Customary High Beam Usage Behaviour“ In: *8th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL*
-

- 2009 - *Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2009, S. 238–242.
- [BKV11] BÖHM, M.; KÖTH, K.; VÖLKER, S.: „Effects of Daytime Running Lights on Vulnerable Road Users“ In: *9th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2011 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2011, S. 177–188.
- [Bla46] BLACKWELL, H. R.: „Contrast Thresholds of the human eye“ In: *Journal of the optical society of America*. Bd. 36, 1946.
- [BMK12] BOGDANOW, S.; MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.: „Fast assessment-method for dynamic headlighting systems considering indirect glaring effects“, Poster, In: *VISION Conference*, 2012.
- [BMK<sup>+</sup>13] BOGDANOW, S.; MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; SCHULZE, K.: „Testen am gesamten Lichtsystem“ In: *ATZ* 115. Jahrgang (2013), Nr. 11/2013, S. 882–886.
- [BMVI12] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (BMVI): „Prozentuale Verteilung der verwendeten Materialien (Asphalt bzw. Beton fuer Straßendeckschichten im Jahr 2010“, private Mitteilung, November 2012.
- [Böb09] BÖBEL, D.: „The Universal Customer Requirement does not exist – Perceived Variations from near field to far range interests“ In: *8th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2009 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2009, S. 347–353.
- [Bos23] BOSSU, P.: „Comment nos voitures devront dorénavant êtres éclairées“ In: *Revue Omnia* (1923), Nr. 42, nouvelle serie.
- [BSA<sup>+</sup>08] BULLOUGH, J. D.; SKINNER, N. P.; AKASHI, Y.; VAN DERLOFSKE, J.: *Investigation of Safety-Based Advanced Forward-Lighting Concepts to Reduce Glare*, Report No. DOT HS 811 033, Hrsg. von NHTSA, 2008.
- [Bul14] BULLOUGH, J. D.: „Vehicle Forward Lighting: A New Look at Intelligent Adaptive Headlamps, Safety and Performance“ In: *VISION Conference*, 2014.
- [CIE92] CIE: *Technical Report 095:1992: Contrast and Visibility*, 1. ed., Wien, 1992
- [CIE01] CIE: *Technical Report 144:2001: Road Surface and Road Marking Reflection Characteristics*, Wien, 2001
- [CIE02] CIE: *Technical Report 146:2002: CIE Equations for Disability Glare*, Wien, 2002.
- [CIE10] CIE: *Technical Report 188:2010: Performance Assessment Method for Vehicle Headlighting Systems*, Wien, 2010.
- [CIE11] CIE: *ILV - International Lighting Vocabulary*, 2011.
- [CLC07] CHEN, W.; LIN, Y.; CHEN, D.: „Effect of Low-beam Pattern on Peripheral Visibility under Nighttime Driving Condition in China“ In: *7th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2007 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2007.
-

- [Dah01] DAHLEM, T: *Methoden zur Bewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2001.
- [Dai14] DAIMLER: *Mehr Licht in allen Situationen: Die Nacht wird zum Tag*. <http://media.daimler.com/dcmedia/0-921-656547-49-1761294-1-0-1-0-0-0-0-0-0-1-0-0-0-0-0.html>. (aufgerufen am 24.09.2015).
- [Dam95] DAMASKY, J.: *Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeug-Scheinwerfer*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1995.
- [Deb67] DE BOER, J.B.: „Visual perception in road traffic and the field of vision of the motorist“ In: *Public Lighting*, 1967, S. 11–96.
- [ECE48] ECE: *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices*, Regelung R48, Genf, 2013.
- [ECE98] ECE: *Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps equipped with gas-discharge light sources*, Regelung R98, Genf, 2012.
- [ECE112] ECE: *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*, Regelung R112, Genf, 2013.
- [ECE123] ECE: *Uniform provisions concerning the approval of adaptive front-lighting systems (AFS) for motor vehicles*, Regelung R123, Genf, 2013.
- [Eck93] ECKERT, M.: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*, 1. Auflage., Verlag Technik GmbH Berlin, 1993.
- [Fib99] FISCHBACH, I.: „Bewertung von Sichtverhältnissen im Straßenverkehr mit Leuchtdichteanalysatoren (bildauflösender Leuchtdichtemesstechnik)“ In: *Lux junior 1999*, Dörnfeld, 1999
- [Fis14] FISCHER, J: „Adaptive Schlechtwetterlichtverteilung zur Reduzierung der indirekten Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer auf nassen Fahrbahnen“ In: *LICHT 2014*, Den Haag, 2014
- [Fis15] FISCHER, J: *Entwicklung eines adaptiven Schlechtwetterlichtsystems zur Reduzierung der indirekten Blendung bei nassen Fahrbahnen*, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2015.
- [FK14] FISCHER, J.; KORDT, D.: „Dynamische Messung der Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn zur Realisierung adaptiver Lichtfunktionen“ In: *VDI-Berichte 2221 - Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*, Hrsg. von VDI Wissensforum GmbH, 2014.
- [Fla99] FLANNAGAN, M. J.: *Subjective and objective aspects of headlamp glare: Effects of size and spectral power distribution*, Report No. UMTRI-99-36, Michigan, 1999.
- [Fla01] FLANNAGAN, M. J.: „Feasibility of Developing a Headlighting Rating System“ In: *Progress in Automobile Lighting - PAL '01 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Schmidt-Clausen, H.-J. Darmstädter Lichttechnik, 2001, S. 275–282.
-

- [Fla03] FLANNAGAN, M. J.: „Development of a Headlighting Rating System“ In: *Progress in Automobile Lighting - PAL '03 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Schmidt-Clausen, H.-J. Darmstädter Lichttechnik, 2003.
- [FSB<sup>+</sup>93] FLANNAGAN, M. J. ; SIVAK, M.; BATTLE, D. S.; SATO, T.; TRAUBE, E. C.: *Discomfort glare from high-intensity discharge headlamps*, Report No. UMTRI-93-10, Michigan, 1993.
- [FSB<sup>+</sup>94] FLANNAGAN, M. J.; SIVAK, M.; BATTLE, D. S.; SATO, T.; TRAUBE, E. C.: *Discomfort glare and brightness as functions of wavelength*, Report No. UMTRI-94-29, Michigan, 1994.
- [FSG<sup>+</sup>92] FLANNAGAN, M. J.; SIVAK, M.; GELLATLY, A. W.; LUOMA, J.: *A field study of discomfort glare from high-intensity discharge headlamps*, Report No. UMTRI-92-16, Michigan, 1992.
- [Gär15] GÄRTNER, A.: *Pilotstudie zur Bewertung der durch verschiedene Kfz-Scheinwerfer verursachten Blendung*, Bachelorarbeit, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 2015.
- [Goe96] GOERSCH, H.: *Wörterbuch der Optometrie*, Enke Ferdinand Verlag, Stuttgart, 1996.
- [GS09a] GÜNTHER, A.; SCHADE, S.: „Benötigte Lichtstärken für aktive Scheinwerfer“ In: *Lux junior 2009*, Dörfeld, 2009
- [GS09b] GÜNTHER, A.; SCHADE, S.: „Required luminous intensities for headlamps with glare free high beam“ In: *8th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2009 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2009, S. 527–531.
- [GW90] GELLATLY, A. W.; WEINTRAUB, D. J.: *User Reconfigurations of the deBoer Rating Scale for discomfort glare*, Report No. UMTRI-90-20, Michigan, 1990.
- [Ham01] HAMM, M.: „System Strategies for Adaptive Lighting Systems“ In: *Progress in Automobile Lighting - PAL '01 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Schmidt-Clausen, H.-J. Darmstädter Lichttechnik, 2001, S. 368–380.
- [Ham11] HAMM, M.: „Innovative Lichtquellen für Fahrzeuge“ In: *ATZ 113. Jahrgang (2011)*, Nr. 01/2011, S. 8–14.
- [Hen02] HENTSCHEL, H.-J. (Hrsg.): *Licht und Beleuchtung: Grundlagen und Anwendungen der Lichttechnik*, 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Hüthig Verlag, Heidelberg, 2002.
- [HG03] HOFFMANN, A. v.; GALL, D.: „Criteria for the Development of Adaptive Light Distributions Considering Dry and Wet Road Surfaces“ In: *Progress in Automobile Lighting - PAL '03 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Schmidt-Clausen, H.-J. Darmstädter Lichttechnik, 2003, S. 1169–1179.
- [Hil08] HILLER, M.: *Der Einfluss der Scheinwerferanbauhöhe auf die Erkennbarkeitsentfernung des Fahrers*, Diplomarbeit, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 2008.
-



- [HL11] HAMM, M.; LAMPEN, M.: „Reality Check: How different is the perception of LED-light vs. Halogen-light on the road?“ In: *9th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2011 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2011, S. 39–50.
- [Hof03] HOFFMANN, A. v.: *Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen*, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2003.
- [Hoff06] HOFFMEISTER, L.: „Einführung in den Dunkelheitsunfall“ In: *VRR - Verkehrsrechtreport*, Bd. 3/2006, 2006, S. 94–99.
- [Hug07] HUGEMANN, W. (Hrsg.): *Unfallrekonstruktion*, autorenteam GbR, Münster, 2007.
- [Huh99] HUHN, W.: *Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen der ECE-Regelungen*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1999.
- [JKL09] JEBAS, Ch.; KLEIN, D.; LEMMER, U.: „Analyse der Beleuchtungsstärken auf Sehoobjekten im Fernfeld in Abhängigkeit der Vorfeld- und Seitenausleuchtung automobiler Scheinwerfer“ In: *Lux junior 2009*, Dörnfeld, 2009
- [Kal01] KALZE, J.: „Situation Adapted Light Distributions for AFS-Headlamps“ In: *Progress in Automobile Lighting - PAL '01 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Schmidt-Clausen, H.-J. Darmstädter Lichttechnik, 2001, S. 474–484.
- [KB81] KREBS, H. G.; BÖLLINGER, G.: *Beurteilung und Erfassung von Nässezuständen auf Fahrbahnen*, Schlussbericht FA 4075 G 79 G, Institut für Straßenbau und Eisenbahnwesen, Universität Karlsruhe, 1981.
- [KG00] KOKOSCHKA, S.; GALL, D.: *Entwicklung und Validierung eines Sichtweitenmodells zur Bestimmung der Fahrersichtweite*, FASIVAL-Abschlussbericht, 2000.
- [Kha12] KHANH, T. Q.: „Fahrzeugbeleuchtung“ In: *LiTG Festschrift 1912-2012*, Hrsg. von Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V., 2012, S. 32–33.
- [Kha14] KHANH, T. Q.: *Wovor fürchten Sie sich, wenn Sie nachts im Dunkeln Auto fahren?* Umfrage (2008), private Mitteilung, 07.08.2014.
- [Kir11] KIRSCHBAUM (Hrsg.): *Lichttechnische Einrichtungen an Kraftfahrzeugen und deren Anhängern*, 3., völlig neu bearbeitete Auflage, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2011.
- [KKM<sup>+</sup>07] KLINGER, K.; KOOSS, D.; MANZ, K.; LEMMER, U.: „Development of criteria for the rating of vehicle lighting with respect to an NCAP for active safety“ In: *7th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2007 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2007.
- [KKP09] KUBENA, V.; KRATOCHVIL, J.; POPELEK, J.: „Headlamp light performance: Can the color temperature beat the collected luminous flux?“ In: *8th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2009 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2009.
-

- [Kle03] KLEINKES, M.: *Objektivierte Bewertung des Gütemerkmals Homogenität für Scheinwerfer-Lichtverteilungen*, Dissertation, Universität Bielefeld, Shaker Verlag Aachen, 2003.
- [Kle13] KLEINKES, M.: „New Automotive Lighting Technology: Benefit or Mayfly?“ In: *10th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2013 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2013.
- [Kle14] KLEINKES, M.: „LED-Matrix Systems – Revolution and Evolution“ In: *VISION Conference*, Versailles, 2014.
- [Klein08] KLEIN, D.: *Messtechnische Erfassung der Lichtverteilung eines LED-Forschungsscheinwerfers und Bestimmung der Eigenschaften der von ihm auf der Fahrbahnoberfläche erzeugten Reflexionen*, Diplomarbeit, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 2008.
- [KMV<sup>+</sup>09] KIEL, H.; MENSCH, D.; VOGLER, S.; KLEIMEYER, M.: „New Methods of Development Process of Automotive Lighting Systems“ In: *8th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2009 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2009, S. 192–204.
- [Köh11] KÖHLER, S.: *Messtechnische Bestimmung von Leuchtdichtkoeffizienten für Fahrbahndeckschichten unter flachen Anstrahlwinkeln*, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2011.
- [Kok97] KOKOSCHKA, S.: „Das V( $\lambda$ ) - Dilemma in der Photometrie“ In: *Lux junior 1997*, Dörfeld, 1997, S. 34–42.
- [KS07] KALZE, J.; SCHMIDT, Ch.: „Dynamic Cut-Off-Line geometry as the next step in forward lighting beyond AFS“ In: *7th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2007 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2007.
- [KSK12] KLEINKES, M.; SCHMIDT, Ch.; KALZE, J.: „Nächste Schritte in der Entwicklung von Voll-LED Scheinwerfern“ In: *ATZ 114. Jahrgang (2012)*, Nr. 11/2012, S. 862–867.
- [KSM<sup>+</sup>13a] KLEINERT, B.; SEER, M.; MARUTZKY, M.; BOGDANOW, S.; SCHIERZ, Ch.: „The glare ratio - an evaluation under repeatable conditions for different dry and wet road surfaces“ In: *10th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2013 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2013, S. 597–607.
- [KSM<sup>+</sup>13b] KLEINERT, B.; SEER, M.; MARUTZKY, M.; BOGDANOW, S.; SCHIERZ, Ch.: „Blendungsbewertung von Kfz-Scheinwerfern - Was wird messtechnisch erfasst und was nicht?“ In: *Lux junior 2013*, Dörfeld, 2013.
- [KTK<sup>+</sup>09] KOETHER, G.; THAMM, M.; KIEL, H.; HÄRING, S.; FALZ, F.: „Das Lichtsystem: Neue Designsprache, mehr Varianten, effiziente Auslegung“ In: *ATZ extra (2009)*, Nr. 05/2009, S. 50–53.
- [KV03] KLEINKES, M.; VÖLKER, S.: „Luminance-Based Homogeneity Rating for Headlamp Light Distributions“ In: *Progress in Automobile Lighting - PAL '03 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Schmidt-Clausen, H.-J. Darmstädter Lichttechnik, 2003.
-

- [KV05] KLIBISCH, D.; VÖLKER, S.: „Examinations of the Recognition Distance of Headlamps“ In: *6th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2005 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2005, S. 1113–1123.
- [KWB<sup>+</sup>15] KLEINERT, B.; WERNER, Ch.; BOGDANOW, S.; MARUTZKY, M.; SCHIERZ, Ch.: „CAGE - Computer Aided Glare Evaluation of Automotive Headlamps“ In: *11th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2015 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2015.
- [Lan92] LANGE, H.: *Handbuch für Beleuchtung*, 5., völlig neu bearbeitete Auflage (Sonderausgabe), ecomed, Landsberg, 1992.
- [Lans09] LANSMANN, S.: *Einfluss von Umfeldgrößen auf Leuchtdichtekamera-basierte Scheinwerferbewertung*, Masterarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, 2009.
- [Lar03] LAARHOVEN, W. v.: „Comparison of ECE and FMVSS108 Procedures“ In: *Progress in Automobile Lighting - PAL '03 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Schmidt-Clausen, H.-J. Darmstädter Lichttechnik, 2003, S. 1144–1147.
- [Lar07] LAARHOVEN, W. v.: „An Overview of Recent and Future Changes to the ECE Automotive Lighting Regulations“ In: *7th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2007 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2007.
- [Lar09] LAARHOVEN, W. v.: „Regulatory changes on automotive lighting A global overview“ In: *8th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2009 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2009, S. 318–328.
- [LEE15] LEE FILTERS: <http://www.leefilters.com/index.php>, (aufgerufen am: 20.09.2015).
- [Leh01a] LEHNERT, P.: *Auswirkungen der Fahrzeugdynamik auf die Lichtverteilung von Scheinwerfern*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2001.
- [Leh01b] LEHNERT, P.: „Disability and Discomfort Glare under dynamic Conditions - The Effect of Glare Stimuli on the Human Vision“ In: *Progress in Automobile Lighting - PAL '01 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Schmidt-Clausen, H.-J. Darmstädter Lichttechnik, 2001.
- [LIS<sup>+</sup>07] LOCHER, J.; ISENBORT, A.; SCHMIDT, S.; KLEY, F.: „Disability glare of Halogen, Xenon and LED headlamp systems“ In: *7th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2007 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2007.
- [LK09] LOCHER, J.; KLEY, F.: „Disability and Discomfort Glare of Headlamps“ In: *8th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2009 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2009.
- [Mat10] MATSCHKE, J.: *Nächtliche Blendsituationen auf der Landstraße*, Bachelorarbeit, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 2010.
-

- [MGV<sup>+</sup>13] MEYER, B.; GRUNERT, C.; VOLLRATH, M.; MAGNOR, M.: „Simulating the re-adaptation of the human visual system after short-time glares in traffic scenarios“ In: *ACM Transactions on Applied Perception* Vol. 1, No. 1, Article 1, 2013.
- [Mic15] MICHENFELDER, S.: *Konzeption, Realisierung und Verifikation eines automobilen Forschungsscheinwerfers auf Basis von Digitalprojektoren: Dissertation*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologien (KIT), 2015.
- [MKB11] MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; BOGDANOW, S.: „The Trabant nT and innovative vehicle lighting performance tests“ In: *9th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2011 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2011, S. 921–933.
- [MKH<sup>+</sup>14] MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; HEINRICHS, A.; SCHWANZ, B.; BOGDANOW, S.: „Accuracy, Reproducibility and Repeatability of fast methods for headlamp evaluation“ In: *Proceedings of CIE Expert Symposium on Measurement Uncertainties in Photometry and Radiometry for Industry*, (CIE x040:2014), Wien, 2014.
- [MKK<sup>+</sup>07] MANZ, K.; KLOOSS, D.; KLINGER, K.; SCHELLINGER, S.: *Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugbeleuchtung im Hinblick auf ein NCAP für aktive Fahrzeugsicherheit*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik, Heft F 65, Hrsg. von Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2007.
- [MKS<sup>+</sup>13] MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; SEER, M.; BOGDANOW, S.: „Anwendbarkeit von Kontrast-basierten Erkennbarkeitskriterien auf die Methode der geometrischen Verkürzung“ In: *Lux junior 2013*, Dörnfeld, 2013.
- [MNN13] MICHENFELDER, S.; NEUMEYER, M.; NEUMANN, C.: „Konvertierungsalgorithmus für automobilen Forschungsscheinwerfer“ In: *Lux junior 2013*, Dörnfeld, 2013.
- [MTG<sup>+</sup>12] MEYER, B.; THOMSCHKE, S.; GONTER, M.; MAGNOR, M.: „Integrating Headlight Glares into Driving Simulations Based on Human Contrast Perception“ In: *VISION Conference*, Versailles, 2012.
- [Muz12] MARUTZKY, M.: „A special environment for significant testing and evaluation of vehicle lighting“ In: *IAL - Intelligent Automotive Lighting*, Stuttgart, 2012.
- [Muz14] MARUTZKY, M.: „Perceptions under real like conditions and measurements in a reference ambience.“ In: *IAL - Intelligent Automotive Lighting*, Frankfurt, 2014.
- [Neu08] NEUMANN, R.: „Advanced Lighting Technology: Vision and Strategy between customer perception, Styling Opportunities and safety features“ In: *VISION Conference*, Versailles, 2008.
- [NK14] NEUMANN, R.; KUBENA, V.: „LED Matrix Beam Headlamps - Improvements in Light Performance“ In: *VISION Conference*, Versailles, 2014
- [OF14] OMERBEGOVIC, S.; FUNK, Ch.: „Predictive lighting functions for next generation Matrix LED headlights“ In: *VISION Conference*, Versailles, 2014
- [OKO09] OKAWA, M.; KOBAYASHI, S.; OKAJIMA, K.: „Study on the Effect of Light Source Spectrum on Apparent Road Surface Brightness“ In: *8th International Symposium*
-

- on Automotive Lighting - ISAL 2009 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2009.
- [Pan12] PANKRATZ, P.: *Entwicklung der Hauptlichtfunktionen für die Frontbeleuchtung des Leichtbau-Konzeptfahrzeuges InEco auf LED-Basis*, Masterarbeit, Ostfalia - Hochschule für angewandte Wissenschaften, Standort Wolfenbüttel, 2012.
- [Par10] PARSONS, J. H.: „Glare, its causes and effects“ In: *The Lancet* Nr. 1, 1910, S. 234–236.
- [Pet14] PETERSMANN, Thomas: *Dekompositionierung eines Voll-LED Scheinwerfers und Inbetriebnahme der Einzelfunktionen*, Bachelorarbeit, Leibniz Universität Hannover, 2014.
- [PKS12] PORSCH, T.; KRÜGER, U.; SCHMIDT, F.: „Einsatz von bildgebenden Leuchtdichtmesskameras bei der Bewertung von Blendungssituationen“ In: *LICHT 2012*, Berlin, 2012, S. 196–203.
- [Por07] PORSCH, T.: „Blendungsbewertung mit bildauflösender Lichtmesstechnik in Theorie und Praxis“ In: *Lux junior 2007*, Dörnfeld, 2007.
- [Rei09] REIF, K.: *Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure*, 3., überarbeitete Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2009.
- [Ric12] RICHTER, B.: „Blendung“ In: *Handbuch für Beleuchtung*, Bd. 57, Hrsg. von Lange, H. ecomed Heidelberg, 2012.
- [RL10] ROSER, M.; LENZ, P.: „Camera-Based Bidirectional Reflectance Measurement for Road Surface Reflectivity Classification“ In: *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2010, S. 340–347.
- [RL13] ROSENHAHN, E.-O.; LAMPEN, M.: „Reality Check II: How different is the Perception of LED-Light vs. Halogen-Light on the Road?“ In: *10th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2013 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2013, S. 253–261.
- [Rol05] ROSLAK, J.: *Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums*, Dissertation, Universität Paderborn, 2005.
- [Ros00] ROSENHAHN, E.-O.: *Entwicklung von lichttechnischen Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer für Schlechtwetterbedingungen*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2000.
- [RSW<sup>+</sup>07] RAPHAEL, S.; SEYRING, C.; WERNICKE, A.; VÖLKER, S.: „Luminance as a criterion for the evaluation of discomfort and disability glare of headlamps“ In: *7th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2007 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2007.
- [SBH10] SIEBERTZ, K.; BEBBER, D. v.; HOCHKIRCHEN, T.: *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DOE)*, 1. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [Schi10] SCHIERZ, Ch.: *Physiologische Optik*. Skript zur Vorlesung, Technische Universität Ilmenau, FG Lichttechnik, Ilmenau, 2010.
-



- [Schm92] SCHMEDDING, K.: „Die Bedeutung des Praxisfaktors in der lichttechnischen Analyse: Der Versuch einer Eingrenzung“ In: *VKU - Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, Heft 7/8, 1992, S. 201–203.
- [Schw07] SCHWANENGEL, Ch.: „Fast headlamp measurement using luminance measurement technique“ In: *7th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2007 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2007.
- [Schw10] SCHWANENGEL, Ch.: *Gegenüberstellung von Messtechniken zur Messung von Lichtstärkeverteilungen und Lichtstärkeverteilungsausschnitten*, Manuskript, Ilmenau, 2010.
- [Schz13] SCHWANZ, B.: *Spektrale Untersuchungen zur Blendungsbewertung automobiler Scheinwerfer nach TC4-45*, Masterarbeit, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 2013.
- [SCD+92] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.; DAMASKY, J.; WAMBSGANSS, H.: *Einfluß der Helligkeit von Fahrbahnoberflächen auf die Seh- und Wahrnehmungsbedingungen von Kraftfahrern bei Nacht*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 629, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1992.
- [SCS01] 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, Heft 812, Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Strassenbau, Strassenverkehr, Bonn, 2001.
- [See13] SEER, M.: *Ermittlung der Reflexionseigenschaften von Straßenoberflächen zur späteren Blendungsbewertung (nach TC4-45)*, Bachelorarbeit, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 2013.
- [SF97] SIVAK, M.; FLANNAGAN, M. J.; TRAUBE, E. C.; KOJIMA, S.: *The Influence Of Stimulus Duration On Discomfort Glare For Persons With And Without Visual Correction*, Report No. UMTRI-97-23, Michigan, 1997.
- [Sig07] SIGL, F.: *Erkennbarkeit kontrastarmer Hindernisse bei Abblendlicht unter Berücksichtigung moderner Scheinwerfersysteme*, Diplomarbeit, Fachhochschule Deggendorf, 2007.
- [SK07] SCHILLER, Ch.; KHANH, T. Q.: „First Field Tests of Cars with Completely Built-in LED Headlamps under Realistic Driving Conditions“ In: *7th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2007 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2007.
- [SK08a] SCHILLER, Ch.; KHANH, T. Q.: „Photometrical and Physiological Aspects of Today's LED Car Headlamps“ In: *VISION Conference*, Versailles, 2008
- [SK08b] SCHILLER, Ch.; KHANH, T. Q.: „Psychologische Blendung bei Halogen und Xenon-scheinwerfern“ In: *VKU - Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, 2008, S. 253–259.
- [SKH+08] SPRUTE, J. H.; KHANH, T. Q.; HAFFERKEMPER, N.; REEBER, D.: „Influence of new high beam assistance systems on driver behavior and their potentials“ In: *VISION Conference*, Versailles, 2008
-

- [SKS<sup>+</sup>08] SCHILLER, Ch.; KHANH, T. Q.; SPRUTE, J. H.; HAFERKEMPER, N.: „Über lichttechnische und physiologische Feldtests an den weltweit ersten LED-Frontscheinwerfer-Autos“ In: *LICHT 2008*, Ilmenau.
- [SMK<sup>+</sup>15] SCHWANZ, B.; MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; BOGDANOW, S.: „Messsystemanalyse eines Leuchtdichtekamera-basierten Scheinwerferprüfstands“ In: *Lux junior 2015*, Dörfeld, 2015.
- [SO84] SIVAK, M.; OLSEN, P. L.: „Discomfort glare from automobile headlamps“ In: *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Nr. 13, 1984, S. 296–303.
- [Spr12] SPRUTE, J. H.: *Entwicklung lichttechnischer Kriterien zur Blendungsminimierung von adaptiven Fernlichtsystemen*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2012.
- [SPS<sup>+</sup>09] SCHLAG, B.; PETERMANN, I.; SCHULZE, Ch.; WELLER, G.: *Mehr Licht - mehr Sicht - mehr Sicherheit? Zur Wirkung verbesserter Licht- und Sichtbedingungen auf das Fahrerverhalten*, Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009.
- [SSF03] SIVAK, M.; SCHOETTLE, B.; FLANNAGAN, M. J.: *LED Headlamps: Glare and color rendering*, Report No. UMTRI-2003-39, Michigan, 2003.
- [SSF04a] SIVAK, M.; SCHOETTLE, B.; FLANNAGAN, M. J.: „Glare and color rendering with LED headlamps“ In: *VISION Conference*, Versailles, 2004.
- [SSF04b] SIVAK, M.; SCHOETTLE, B.; FLANNAGAN, M. J.: *Mercury-free HID-headlamps: Glare and color rendering*. Report No. UMTRI-2004-37, Michigan, 2004.
- [SSH<sup>+</sup>09] SPRUTE, J. H.; SÖLLNER, S.; HAFERKEMPER, N.; SCHILLER, Ch.; ZYDEK, B.; KHANH, T. Q.: „Investigations on Glare Impact at Long Distances“ In: *8th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2009 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2009.
- [SSH<sup>+</sup>11] SPRUTE, J. H.; SÖLLNER, S.; HAFERKEMPER, N.; SCHILLER, Ch.; ZYDEK, B.; KHANH, T. Q.: „Dynamic Glare Assessment - Defining Undue Glare in Night-time Driving“ In: *9th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2011 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2011, S. 372–381.
- [SSHK09] SCHILLER, Ch.; SPRUTE, J. H.; HAFERKEMPER, N.; KHANH, T. Q.: „Discomfort Glare – Impact of headlamp optics, spectrum of adaptation and SPD“ In: *8th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2009 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2009, S. 31–37.
- [SSM<sup>+</sup>05] SIVAK, M.; SCHOETTLE, B.; MINODA, T.; FLANNAGAN, M. J.: *Blue content of LED headlamps and discomfort glare*, Report No. UMTRI-2005-2, Michigan, 2005.
- [SSS94] SCHMEDDING, K.; SAAT, D.; SCHAL, S.: „Zur Tragweite von Beleuchtungseinrichtungen im Nebel“ In: *VKU - Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, Heft 12, 1994, S. 341–343.
-



- 
- [StBA14] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Verkehr: Verkehrsunfälle 2013*, (Fachserie 8 Reihe 7), Wiesbaden, 2014.
- [SW14] SCHMIDT, Ch.; WILKS, C.: „High Definition Concepts for Next Generation ADB Module“ In: *VISION Conference*, Versailles, 2014.
- [Tar01] TARGOSINSKI, T.: „Analysis of the Properties of the ECE Requirements concerning Headlights“ In: *Progress in Automobile Lighting - PAL '01 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Schmidt-Clausen, H.-J. Darmstädter Lichttechnik, 2001, S. 958–968.
- [Tar05] TARGOSINSKI, T.: „Integral Method of Frontlighting Illumination Assessment“ In: *6th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2005 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2005, S. 15–25.
- [Tar11] TARGOSINSKI, T.: „Passing beam visibility distance - Technical possibilities, legal requirements and road safety“ In: *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 18, No. 4, (2011).
- [Tar12] TARGOSINSKI, T.: „Headlights type approval requirements and on field requirements - Technical impact on safety“ In: *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 19, No. 4, (2012).
- [Tec05] TECHNOTEAM: *LMK2000 Software: Zusatzmodul Scheinwerfermessung*, Produktbeschreibung, Ilmenau, 2005.
- [TK12] TOTZAUER, A.; KHANH, T. Q.: „Blendungsforschung für die Verkehrslichttechnik Dynamische - Blendung, Schleierleuchtdichte, Blendbeleuchtungsstärke“ In: *LICHT*, Nr. 10//2012, (2012).
- [Töp13] TÖPFER, R.: *Untersuchungen zur Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern nach TC4-45 in einer Referenzumgebung*, Masterarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 2013.
- [Völ05] VÖLKER, Stephan: „New Headlamps - More Safety or Only More Glare“ In: *6th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2005 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2005, S. 222–228.
- [Völ06] VÖLKER, Stephan: *Hell- und Kontrastempfindung - Ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern*, Habilitation, Universität Paderborn, 2006.
- [Völ07a] VÖLKER, S.: „Do light sources with a high part of shorter wavelength promote safety?“ In: *7th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2007 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2007.
- [Völ07b] VÖLKER, S.: „L oder E - eine Einführung in die automobilen Lichttechnik“ In: *Haus der Technik*, Essen, 2007.
- [Völ08] VÖLKER, S.: „Sehen in der Dämmerung - aktuelle Forschungsergebnisse zur Mesopik“ In: *LICHT 2008*, Ilmenau, 2008.
-

- [Völ12] VÖLKER, S.: „Blendung - Ein Rückblick über 100 Jahre Forschung“ In: *LICHT 2012*, Berlin, 2012, S. 476–483.
- [Wes02] WESTERMANN, H.: *History and Scientific Back-up*, AFS Eureka Projekt 1403, Informal Dokument No. 30, 2002.
- [WGS13] WEBER, S.; GÖCKE, T.; SCHREIER, P.: „Evaluation and visualisation of light functions by simulation“ In: *10th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2013 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2013, S. 585–596.
- [Wii14] WITTING, W.: *Licht. Sehen. Gestalten: Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen für Architekten und Lichtdesigner*, Birkhäuser, Basel, 2014.
- [Wil10] WITTLICH, M.: *Blendung - Theoretischer Hintergrund*, Informationen des Instituts für Arbeitsschutz der DGUV, Sankt Augustin, 2010.
- [WKM15] WERNER, Ch.; KLEINERT, B.; MARUTZKY, M.; BOGDANOW, S.; SCHIERZ Ch.: „Blendfreie dynamische Abblendlichtverteilung für Kfz-Scheinwerfer – Anforderungen und Validierung“ Vortrag, In: *Lux junior 2015*, Dörfeld, 2015.
- [WV13] WINTER, J.; VÖLKER, S.: „Typical eye fixation areas of car drivers in inner-city environments at night“ In: *Lux Europa 2013*, Krakau, 2013.
- [WWB<sup>+</sup>07] WÖRDENWEBER, B.; WALLASCHEK, J.; BOYCE, P. HOFFMANN, D.D.: *Automotive Lighting and Human Vision*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [2ask] 2ASK: *Leitfaden für die Erstellung eines Fragebogens*. [http://www.2ask.de/media/1/10/2/3/5/bc958b68e726b401/Leitfaden\\_Fragebogenerstellung.pdf](http://www.2ask.de/media/1/10/2/3/5/bc958b68e726b401/Leitfaden_Fragebogenerstellung.pdf), (aufgerufen am 22.04.2016).
- [ZHK13] ZYDEK, B.; HAFFERKEMPER, N.; KHANH, T. Q.: „Klettwitz leveling Test: Analysis of Photometric Data and Comprehension“ In: *10th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2013 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2013.
- [Zyd14] ZYDEK, B.: *Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern unter dynamischen Bedingungen*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2014.
-



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Methodisches Vorgehen . . . . .	3
2.1	Schematischer Aufbau eines Reflexions- (links) und Projektionssystems (rechts) in Seitenansicht [Pet14] . . . . .	6
2.2	Vergleich der optischen Systeme des Audi A6 (C7) Serienscheinwerfers . . . . .	7
2.3	Beleuchtungsstärkeverteilung $E(lx)$ des jeweiligen Scheinwerfers auf der Fahrbahn inklusive markierter Erkennbarkeitsentfernung (m) anhand der 2-lx-Linie . . . . .	7
2.4	Vergleich der Audi A6 (C7) Serienscheinwerfer hinsichtlich der unterschiedlichen ähnlichsten Farbtemperaturen (Links: Halogen; Mitte: Xenon; Rechts: LED) . . . . .	8
2.5	Projektionsmodul mit Freiformwalze (re.) zur Realisierung adaptiver Lichtverteilungen (li.) [KS07]. . . . .	8
2.6	Explosionsdarstellung des Audi „Matrix LED-Scheinwerfers“ (Quelle: Audi). . . . .	9
2.7	Schematische Darstellung von Propix am Testfahrzeug des KIT [MNN13] . . . . .	10
2.8	Messpunkte/ -bereiche der photometrischen Anforderungen nach [ECE123] . . . . .	12
2.9	Goniophotometer-Messstrecke zur lichttechnischen Vermessung von Kfz-Scheinwerfern (direkte Messmethode) [Schw10] . . . . .	14
2.10	LVK-Messmethode (indirekte Messmethode) [Schw10] . . . . .	15
2.11	Straßenszene in Seitenansicht zur Veranschaulichung der direkten und indirekten Blendung; RP = Reflexpunkt bei dem Einfallswinkel = Ausfallswinkel ist (für weitere geometrische Bezeichnungen siehe Kapitel 4.2). . . . .	16
2.12	Schnittdarstellung des Auges inklusive der Bestandteile, die Streulicht verursachen (nach [Hen02]) . . . . .	17
2.13	SI-Diagramm nach [Hoff06] . . . . .	18
2.14	De Boer-Skala zur Bewertung der psychologischen Blendung [Deb67] . . . . .	19
3.1	Relative Reduzierung der Erkennbarkeitsentfernung von Objekten $v_{rel}$ aufgrund einer Blendung in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung $d(m)$ [Lan92] . . . . .	21
3.2	Erscheinungsbild der „Blendkeulen“, die sich in Abhängigkeit des Nässegrades auf der Fahrbahn ausbilden [KB81] . . . . .	29
3.3	Leuchtdichteschnitte durch die „Blendkeule“ zu unterschiedlichen Zeiten nach Begegnung der Fahrbahn (1 = 40s, 2 = 5min und 3 = 10min) [Ros00] . . . . .	30
3.4	Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung [Ros00] . . . . .	31

3.5	Einfluss geänderter Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche auf die Reflexblendung und die Wahrnehmung der Fahrbahnausleuchtung . . . . .	32
3.6	Vorschlag einer Schlechtwetterlichtverteilung nach DAMASKY [Dam95] (1 = Blend-/Eigenblendbereich, 2 = Vorfeld, 3 = Führung rechts, 4 = Reflexbereich, 5 = Führung links) . . . . .	33
3.7	Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang bei regennasser Fahrbahn mit und ohne Schlechtwetterlichtverteilung nach KALZE (c = ohne, d = mit) und ROSENHAHN (a = ohne, b = mit) (aus [Hof03]) . . . . .	34
3.8	Reduzierung der Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang bei gerader und nasser Fahrbahn in Abhängigkeit der ausgeblendeten Bereiche [Hof03] . . . . .	35
3.9	Versuchsaufbau des SAFS-Scheinwerfers und Fahrbahnausleuchtung aus Fahrerperspektive bei trockener Fahrbahn [BSA <sup>+</sup> 08] . . . . .	35
3.10	Lichtverteilung des partiell „maskierten“ Abblendlichts [Fis15] . . . . .	36
3.11	Blendbeleuchtungsstärke im Passiervorgang mit Abblend- und Schlechtwetterlicht auf nasser Fahrbahn [Fis15] . . . . .	36
3.12	Lichtstärkeverteilung eines Abblendlichts am Messschirm mit zugehörigem LID test table . . . . .	38
3.13	Vergleich zweier Scheinwerfersysteme hinsichtlich der Blendbeleuchtungsstärke $E_B(lx)$ (Schnittebene durch die Lichtverteilungen, 940 mm über der Fahrbahn) [CIE10] . . . . .	39
3.14	Blendungszone aus der CIE 188:2010 [CIE10] . . . . .	40
4.1	Geometriemodell zur Blendungsbewertung bei gerader Straßenführung . . . . .	44
4.2	Visuelle Analogskala der Umfrage zur Bewertung der psychologischen Blendung in Anlehnung an die de Boer-Skala. . . . .	47
4.3	Häufigkeitsverteilung - Altersgruppen von VG und KG . . . . .	48
4.4	Häufigkeitsverteilung - Leuchtmittel der Abblendlichtfunktion des eigenen Pkws von VG und KG . . . . .	48
4.5	Bewertung der Ausleuchtung des Verkehrsraums durch die Kfz-eigene Beleuchtung. . . . .	49
4.6	Blendursache - Das Leuchtmittel eines entgegenkommenden Fahrzeuges. . . . .	50
4.7	Blendursache - Geometrische Bedingungen im Straßenverkehr bei regennasser Fahrbahn (Teil I). . . . .	51
4.8	Blendursache - Geometrische Bedingungen im Straßenverkehr bei regennasser Fahrbahn (Teil II). . . . .	51
4.9	Bewertung des jeweiligen Blendanteils im nächtlichen Straßenverkehr bei regennasser Fahrbahn. . . . .	52
4.10	Angegebene Blendursache von der sich Verkehrsteilnehmer im nächtlichen Straßenverkehr bei regennasser Fahrbahn mehr geblendet fühlen. . . . .	53
4.11	Relevanz einer Minimierung des über die Fahrbahn reflektierten Lichts bei regennasser Fahrbahn - Einfluss einer gezielten Information der VG. . . . .	54

4.12	Korrelationsanalysen: Bewertung der indirekten Blendung verglichen mit der direkten Blendung (links); Relevanz der Blendungsminimierung verglichen mit der Bewertung der indirekten Blendung (rechts) . . . . .	54
5.1	Analysierte Fahrbahndeckschichten (a-d) und Bodenfliese (e) im trockenen (oben) und nassen (unten) Zustand. Bei der Bodenfliese (e) ist zudem die Blendenöffnung zur Anleuchtung der Proben angedeutet. (vgl. [See13], [KSM <sup>+</sup> 13a]) . . . . .	58
5.2	Messaufbau zur Ermittlung des Leuchtdichtekoeffizienten $R_R$ für Rückwärtsreflexion (vgl. [See13]) . . . . .	59
5.3	Messaufbau zur Bewertung der direkten und indirekten Blendbeleuchtungsstärke (vgl. [KSM <sup>+</sup> 13a], [See13]) . . . . .	60
5.4	Verläufe der Leuchtdichtekoeffizienten für Rückwärtsreflexion $R_R$ der analysierten Fahrbahndeckschichten (a - d) und der Bodenfliese in Abhängigkeit des Einfallswinkels $\epsilon_i$ im trockenen und nassen Zustand (Messwerte siehe Tabelle B.1, Anhang B) . . . . .	61
5.5	Vergleich des Leuchtdichtekoeffizienten $R_R$ für Rückwärtsreflexion (li.: nach [SCS01]; re.: Bodenfliese der IAV Licht- und Fahrerassistenzhalle) . . . . .	62
5.6	Faktoren, um welche die Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L(indirekt) aufgrund des, über die mit Wasser besprühte Position RP, reflektierten Lichtstroms verändert wird . . . . .	63
5.7	Effekt des über den Bereich des Reflexpunktes (Position RP) reflektierten Lichtstroms auf die Leuchtdichte am Messschirm aufgrund unterschiedlicher Zustände der Bodenfliese (oben: trocken; unten: flächendeckender Wasserfilm) . . . . .	63
5.8	Messaufbau zur Analyse des Einflusses der Reflexblendung auf die gemessene Leuchtdichte und zur Verifizierung des entwickelten Geometriemodells . . . . .	66
5.9	Modifikation der Reflexionseigenschaften mittels Molton-Streifen . . . . .	67
5.10	Gegenüberstellung der am Messschirm aufgenommenen Leuchtdichten (links: mit Blenden im Strahlengang; Mitte: ohne Blenden; rechts: ohne Blenden, mit nasser Bodenfliese; jeweils beide Scheinwerfer aktiv) . . . . .	68
5.11	Gemessene Blendbeleuchtungsstärke (links) und Leuchtdichte (rechts) entlang der horizontalen Linie-RP <sub>25</sub> in einer Höhe von 0,94 m in 25 m Entfernung (Messwerte, siehe Tabelle B.4, Anhang B). . . . .	68
5.12	Gemessene Leuchtdichte entlang der horizontalen Linie-RP <sub>25</sub> (links) und der horizontalen Linie-RP <sub>50</sub> (rechts) in Abhängigkeit der modifizierten Zone . . . . .	69
5.13	Messaufbau zur Bewertung der Wechselwirkung aus Scheinwerferanbauhöhe $z_{SW}$ und Reflexionseigenschaft des Untergrunds (Zonen) auf die messbare Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L . . . . .	71
5.14	Effekt der Wechselwirkung aus Scheinwerferanbauhöhe und Modifikation der jeweiligen Zone auf die messbare Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L bei unterschiedlichen Anbauhöhen (Messwerte, siehe Tabelle B.6, Anhang B) . . . . .	72

5.15	Effekt der Scheinwerferanbauhöhe auf die direkte und gesamte Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L . . . . .	73
5.16	Straßenszene aus Vogelperspektive (bird's eye view) zur schematischen Darstellung der Reflexlinien, die sich zwischen Scheinwerfer und Beobachter auf der Fahrbahn ausbilden (sog. "Blendkeulen") . . . . .	75
5.17	Messaufbau zur Analyse der Reflexblendung im Passiervorgang bei konstanter Messentfernung $x_{ME}$ . . . . .	77
5.18	Erscheinungsbild der "Blendkeulen" bei geänderten Reflexionseigenschaften der Fahrbahndeckschicht (li. Bodenfliese, re. Molton) (vgl. [BMK <sup>+</sup> 13]) . . . . .	77
5.19	Radiale Beleuchtungsstärke entlang der Reflexlinien auf Höhe der Fahrbahndeckschicht in Abhängigkeit des Blendwinkels für den jeweiligen Scheinwerfer . . . . .	78
5.20	Radiale Beleuchtungsstärken entlang der Reflexlinien bei $\Theta = 6^\circ$ in Abhängigkeit des Scheinwerfersystems . . . . .	79
5.21	Vertikale $E_v$ und radiale Beleuchtungsstärke $E_r$ bei $\Theta = 0^\circ$ am Beispiel des Xenon-Scheinwerfers (Messwerte, siehe Tabelle B.7, Anhang B) . . . . .	79
5.22	Leuchtdichte entlang der Reflexlinie „Scheinwerfer-LMK“ in Abhängigkeit des Blendwinkels $\Theta$ für den jeweiligen Scheinwerfer (Untergrund: Bodenfliese) . . . . .	80
5.23	Leuchtdichte entlang der Reflexlinie „Scheinwerfer-LMK“ in Abhängigkeit des Blendwinkels $\Theta$ für den jeweiligen Scheinwerfer (Untergrund: Molton) . . . . .	80
5.24	Effekt geänderter Reflexionseigenschaften auf die Leuchtdichte entlang der Reflexlinie aus der Perspektive des Gegenverkehrs (Blendwinkel $\Theta = 6^\circ$ ) . . . . .	81
6.1	Versuchsaufbau zur Bewertung der Blendung im Passiervorgang . . . . .	84
6.2	Direkte Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung, verursacht durch die Abblendlichtverteilung des "Trabant nT" Scheinwerfers (Messwerte, siehe Tabelle C.1, Anhang C) . . . . .	87
6.3	Blendbeleuchtungsstärke (links) und äquivalente Schleierleuchtdichte (rechts) in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung bei trockener und spiegelnder Fahrbahnoberfläche, verursacht durch das Abblendlicht des "Trabant nT" Scheinwerfers (Messwerte, siehe Tabelle C.1, Anhang C) . . . . .	88
6.4	Blendanteil (%) der direkten und indirekten Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung bei unterschiedlichen Reflexionseigenschaften der Fahrbahn (Messwerte, siehe Tabelle C.1, Anhang C) . . . . .	88
6.5	Direkte Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung und der Scheinwerferanbauposition (links: der Fahrbahnmitte nähere, linke Scheinwerfer; rechts: der Fahrbahnrand nähere, rechte Scheinwerfer; Messwerte, siehe Tabelle C.2, Anhang C) . . . . .	89
6.6	Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung bei trockener Fahrbahn (links: der Fahrbahnmitte nähere, linke Scheinwerfer; rechts: dem Fahrbahnrand näherer, rechte Scheinwerfer; Messwerte, siehe Tabelle C.3, Anhang C) . . . . .	90



6.7	Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung bei spiegelnder Fahrbahn (links: der Fahrbahnmitte nähere, linke Scheinwerfer; rechts: dem Fahrbahnrand näherer, rechte Scheinwerfer; Messwerte, siehe Tabelle C.3, Anhang C) . . . . .	90
6.8	Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Begegnungsentfernung, verursacht durch die Lichtverteilungen beider Scheinwerfer bei unterschiedlichen Fahrbahnzuständen (Messwerte, siehe Tabelle C.3, Anhang C) . . . . .	91
6.9	Entfernungsabhängige Faktoren, um welche die Blendbeleuchtungsstärke aufgrund einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche, im Vergleich zu einer trockenen Oberfläche erhöht wird (links: linke Scheinwerferanbauposition, rechts: rechte Scheinwerferanbauposition; Messwerte, siehe Tabelle C.3, Anhang C) . . . . .	92
6.10	Versuchsaufbau zur Analyse des Einflusses verschiedener Scheinwerfersysteme und Fahrbahnzustände auf die Sichtbedingungen für den Fahrer und die physio- und psychologische Blendung des Gegenverkehrs . . . . .	95
6.11	Schieberegler in Anlehnung an eine visuelle Analogskala zur Bewertung der psychologischen Blendung auf einem Tablet-PC . . . . .	99
6.12	Adaptationsleuchtdichte bei trockener und „nasser“ Fahrbahn in Abhängigkeit der eigenen Fahrbahnausleuchtung und der Fixationsdistanz (links: 46 m, rechts: 31 m); Angenommener Adaptationsbereich: $2^\circ/10^\circ$ -Ellipse) . . . . .	101
6.13	Adaptationsleuchtdichte bei trockener und „nasser“ Fahrbahn in Abhängigkeit der Scheinwerferpaare eines entgegenkommenden Fahrzeuges und der Fixationsdistanz (links: 46 m, rechts: 31 m); Angenommener Adaptationsbereich: $2^\circ/10^\circ$ -Ellipse) . . . . .	101
6.14	Ermittelte Objektkontraste und Faktoren in Abhängigkeit der Entfernung und des Scheinwerfersystems bei trockener und „nasser“ Fahrbahn. Die Objektkontraste wurden dabei an der zur Fahrbahnmitte gerichteten Kante der Sehtafel ermittelt. (Messwerte, siehe Tabelle C.7, Anhang C) . . . . .	102
6.15	Ausschnitt einer Leuchtdichteaufnahme zur Visualisierung der gewählten Kante der Sehtafel zur Ermittlung des Objektkontrasts . . . . .	102
6.16	Vertikale Blendbeleuchtungsstärke $E_{V\_bl}(lx)$ in Abhängigkeit des Blendscheinwerfers und des Fahrbahnzustandes in einer Begegnungsentfernung von 49,3 m . . . . .	103
6.17	Äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{v\_eq}(cd/m^2)$ in Abhängigkeit der Scheinwerferanbauposition und des Fahrbahnzustandes . . . . .	103
6.18	Bewertung der psychologischen Blendung in Abhängigkeit des getesteten Scheinwerfers und der jeweiligen Blendsituation bei „nasser“ Fahrbahn . . . . .	105
6.19	Bewertung der psychologischen Blendung in Abhängigkeit des getesteten Scheinwerfers und der jeweiligen Blendsituation bei trockener Fahrbahn . . . . .	106
6.20	Veranschaulichung der Ursache für den stetigen Anstieg des Objektkontrastes mit zunehmender Entfernung . . . . .	107

---

6.21	Schematischer Versuchsaufbau zur Bewertung des Einflusses der Lichtfarbe des Abblendlichtes (Dargestellte Blendsituation: „Direkt“, vgl. [Schz13]) . . . . .	112
6.22	Bewertung der Fahrbahnausleuchtung aus Fahrerperspektive in Abhängigkeit der Lichtfarbe des Abblendlichtes +/- Standardabweichung . . . . .	115
6.23	Psychologische Blendung in Abhängigkeit der Lichtfarbe und der dargebotenen Blendsituation +/- Standardabweichung . . . . .	116
7.1	Geometriemodell zur Ermittlung der Reflexbereiche einer spiegelnden Fahrbahnoberfläche (siehe auch [BMK12]) . . . . .	119
7.2	Vorteil der reduzierten Messgeometrie auf die Messauflösung im relevanten Reflexbereich . . . . .	122
7.3	Virtuelle Straßenszene der parametrischen 3D-Umgebung zur Bewertung der Blendung im Straßenverkehr . . . . .	123
7.4	Bedienoberfläche der entwickelten Software CAGE (siehe auch [KWB <sup>+</sup> 15]) . . . . .	128
7.5	Verifizierung der Funktionalität von CAGE, am Beispiel eines Xenon- und LED-Scheinwerfers bei spiegelnder Fahrbahnoberfläche (Abweichung $\leq 15,2\%$ ab Entfernungen $> 20$ m) . . . . .	131
8.1	Vorschlag für die Lichtverteilung eines adaptiven blendfreien Abblendlichts für spiegelnde Fahrbahnoberflächen . . . . .	137
A.1	Titelfolie der Präsentation zur Infoveranstaltung . . . . .	177
A.2	Folie 2 und 3 der Präsentation zur Infoveranstaltung . . . . .	178
A.3	Folie 4 und 5 der Präsentation zur Infoveranstaltung . . . . .	179
A.4	Fragebogen „Blendung im nächtlichen Straßenverkehr“ . . . . .	183
B.1	Leuchtdichtekoeffizienten für Rückreflexion $R_R$ in Abhängigkeit des Einfallswinkels $\epsilon_i$ (vgl. [See13]) . . . . .	185
B.2	Leuchtdichteschnitte bei 0,940 m (oben) und 0,135 m (unten) zur Darstellung des Effekts einer streifenweisen Modifikation der Reflexionseigenschaft der Fahrbahndeckschicht . . . . .	188
B.3	Beleuchtungsstärkeverteilung des Trabant nT Prototypenscheinwerfers in 25 m Messentfernung (Quelle: IAV) . . . . .	189
B.4	Vergleich der mathematisch berechneten mit den messtechnisch erfassten Bereichen, die vorrangig die Blendbeleuchtungsstärke beeinflussen (vgl. [Töp13]) . . . . .	190
B.5	Photometerhalterung inklusive der Messentfernungen bei einer Scheinwerferanbauhöhe von 0,65 m zur Messung der direkten vertikalen Beleuchtungsstärke auf Fahrbahnhöhe . . . . .	191
B.6	Beleuchtungsstärkeverteilung der untersuchten linken Serienscheinwerfer eines Fahrzeugs der oberen Mittelklasse aus bird's eye view (BEV) bei einer angenommenen Anbauhöhe von 0,65 m . . . . .	192

---

B.7	Beleuchtungsstärke entlang der Reflexlinien (Oben: Halogen; Mitte: Xenon; Unten: LED) . . . . .	193
B.8	Leuchtdichte entlang der Reflexlinien bei trockener (li.) und nasser (re.) Fahrbahndeckschicht aus Fahrerperspektive (Oben: Halogen; Mitte: Xenon; Unten: LED) . . . . .	194
C.1	Skizze und Messwerte der vertikalen Blendbeleuchtungsstärke $E_V(lx)$ an den Beobachterpositionen (1-8) in 50 m Entfernung bei spiegelnder Fahrbahnoberfläche .	196
C.2	Skizze der variablen Blende zur Realisierung der unterschiedlichen Blendsituationen (Gesamt; Direkt; Indirekt) in Vorder- und Seitenansicht; Referenzhöhe = optischen Achse des Scheinwerfersystems . . . . .	196
C.3	Datenblatt der High-Power-LED [OSRAM] zur Realisierung der Abblendlichtverteilung im Voll-LED Scheinwerfer des Leichtbau-Konzeptfahrzeuges InEco [Pan12]	200
C.4	Angaben zu den gewählten Farbfiltern: Bezeichnung, Transmissiongrad und spektrale Verteilung ([LEE15] aus [Schz13]) . . . . .	201
C.5	Farbort in Abhängigkeit des eingesetzten Farbfilters (Messregion: Innerhalb der analysierten „Blendkeule“; vgl. [Schz13]) . . . . .	201
C.6	Fragebogen: Probandenstudie zur Analyse des Einflusses der Lichtfarbe auf den Fahrkomfort und die psychologische Blendung (vgl. [Schz13]) . . . . .	202
D.1	Seite 1 des Prüfberichts aus CAGE . . . . .	203

---



## Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich der Scheinwerfersysteme des Audi A6 hinsichtlich bestimmter Merkmale des Abblendlichts . . . . .	7
4.1	Übersicht relevanter Einflussgrößen . . . . .	43
5.1	Parameter zur simulativen Analyse des Effekts der Scheinwerferanbauhöhe auf die direkte Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L . . . . .	72
5.2	Direkte Blendbeleuchtungsstärken am Punkt B50L in Abhängigkeit der Scheinwerferanbauhöhe der simulativen Analyse . . . . .	73
5.3	Parameter zur Analyse der Reflexlinien im Passiervorgang innerhalb einer Referenzumgebung mit begrenzter Messentfernung (Annahme: Lateraler Versatz zwischen Scheinwerfer und Auge = 2,0 m; konstante Messentfernung = 30 m) . . . .	76
6.1	Versuchsparameter der beiden Teilversuche . . . . .	95
6.2	Vergleich des Weber-Kontrasts an der Sehtafel in 80 m Entfernung bei Anleuchtung durch die Xenon-Scheinwerfer (ohne und mit Blendung durch ein entgegenkommendes LED-Scheinwerferpaar) . . . . .	104
6.3	Signifikanzanalyse - Vergleich der Mittelwerte der psychologischen Blendung von Beobachterposition 1 und 2 bei „nasser“ Fahrbahn . . . . .	104
6.4	Signifikanzanalyse - Vergleich der Mittelwerte der psychologischen Blendung in Abhängigkeit der Abblendlichtverteilung der Scheinwerfer bei „nasser“ Fahrbahn	105
6.5	Signifikanzanalyse - Vergleich der Mittelwerte der psychologischen Blendung in Abhängigkeit des Zustandes der Fahrbahn (trocken, „nass“) . . . . .	106
6.6	Parameter der beiden Teilversuche (Weitere Daten zu den genutzten Filtern, siehe Abbildung C.4 und Abbildung C.5, Anhang C) . . . . .	110
6.7	Mittlere vertikale Beleuchtungsstärke (inklusive Standardabweichung; $n = 10$ ) in Abhängigkeit der Lichtfarbe und der dargebotenen Blendsituation (vgl. [Schz13])	111
6.8	Mittlere Leuchtdichte der „Blendkeulen“ bei spiegelnder Fahrbahn in Abhängigkeit der Lichtfarbe des Abblendlichts (vgl. [Schz13]) . . . . .	111
6.9	Signifikanzanalyse - Unterschiede in den Bewertungen der Fahrbahnausleuchtung (Gepaarter t-Test mit Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ ) . . . . .	115
6.10	Signifikanzanalyse - Unterschiede in den Bewertungen der Blendsituationen (Gepaarter t-Test mit Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ ) . . . . .	117

6.11	Signifikanzanalyse - Unterschiede in den Bewertungen der psychologischen Blendung (Gepaarter t-Test mit Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ ) . . . . .	117
7.1	Kategorien der dimensionslosen Maßzahl GIR (siehe auch [KSM <sup>+</sup> 13a]) . . . . .	126
7.2	Projektziele bei der Entwicklung von CAGE (Zielart: f = fest, W = Wunsch) . . . . .	127
7.3	Parameter der Simulationssoftware CAGE . . . . .	129
8.1	Vorschlag für die photometrischen Anforderungen des adaptiven blendfreien Abblendlichtes für spiegelnde Fahrbahnoberflächen . . . . .	138
B.1	Messwerte für $E_v, E_h, L$ und ermittelte Leuchtdichtekoeffizienten für Rückwärtsreflexion $R_R$ der analysierten Bodenproben und Bodenfliese (vgl. [See13]) . . . . .	186
B.2	Gemessene Leuchtdichte und ermittelte Beleuchtungsstärken am Punkt B50L (indirekt) zur Bewertung des Effekts des über die Bodenproben an Position RP reflektierten Lichtstroms (vgl. [See13]) . . . . .	187
B.3	Umrechnungsfaktoren für den Leuchtdichtekoeffizienten für Rückwärtsreflexion $R_R$ der Bodenfliese auf den der Fahrbahndeckschichten im trockenen und nassen Zustand (vgl. [See13]) . . . . .	187
B.4	Messwerte der Blendbeleuchtungsstärke (lx) entlang der Linie-RP <sub>25</sub> und Angabe der absoluten Erhöhung und des Faktors . . . . .	187
B.5	Prozentuale Reduzierung der messbaren Leuchtdichte in 0,940 m Höhe in Abhängigkeit des modifizierten Bereichs . . . . .	188
B.6	Messwerte der Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L und Effekt (absolut und relativ) der Wechselwirkung aus Scheinwerferanbauhöhe und Modifikation der jeweiligen Zone . . . . .	189
B.7	Messwerte der vertikalen $E_v$ und radialen Beleuchtungsstärke $E_r$ inklusive absoluter und relativer Abweichung . . . . .	191
C.1	Messwerte - Analyse der Abblendlichtverteilung des Trabant nT Scheinwerfers . . . . .	195
C.2	Messwerte - Vergleich verschiedener Abblendlichtverteilungen . . . . .	195
C.3	Messwerte - Vergleich verschiedener Abblendlichtverteilungen eines Referenz-Fahrzeugs . . . . .	197
C.4	Vertikale Blendbeleuchtungsstärke (Messposition: mittig zwischen den Probanden in einer Höhe von 1,2 m, Messwiederholung: bei jedem Probanden-Team) . . . . .	198
C.5	Randomisierter Versuchsablauf bei nasser und trockener Fahrbahndeckschicht . . . . .	198
C.6	Messwerte der Goniophotometermessungen zu jedem Scheinwerfer (Messinstitut: IPeG, Leibniz Universität Hannover) . . . . .	199
C.7	Ermittelte Objektkontraste an der Kante des Sehobjekts in Abhängigkeit des Scheinwerfersystems und des Fahrbahnzustandes . . . . .	199

## Abkürzungsverzeichnis

ADB	.....	<u>A</u> daptive <u>D</u> riving <u>B</u> eam
AFS	.....	<u>A</u> daptive <u>F</u> rontlighting <u>S</u> ystem
AGF	.....	<u>A</u> nti <u>G</u> lare <u>F</u> unction
BEV	.....	<u>B</u> ird's <u>E</u> ye <u>V</u> iew
BMVBS	.....	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMVI	.....	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CAGE	.....	<u>C</u> omputer <u>A</u> ided <u>G</u> lare <u>E</u> valuation
CIE	.....	<u>C</u> ommission <u>I</u> nternationale de l' <u>E</u> clairage
DLA	.....	<u>D</u> ynamic <u>L</u> ight <u>A</u> ssist
ECE	.....	<u>E</u> conomic <u>C</u> ommission for <u>E</u> urope
Fzg	.....	Fahrzeug
GRE	.....	Working Party on Lighting and Light-Signalling der UNECE
GTB	.....	<u>G</u> roupe de <u>T</u> ravail 'Bruxelles 1952'
HDG	.....	<u>H</u> ell- <u>D</u> unkel <u>G</u> renze
IAV	.....	<u>I</u> ngenieurgesellschaft <u>A</u> uto und <u>V</u> erkehr
IPeG	.....	<u>I</u> nstitut für <u>P</u> roduktentwicklung und <u>G</u> erätebau
Kfz	.....	Kraftfahrzeug
LMK	.....	<u>L</u> euchtdichte <u>M</u> ess <u>K</u> amera
LVK	.....	<u>L</u> ichtstärkeverteilungskörper
OEM	.....	<u>O</u> riginal <u>E</u> quipment <u>M</u> anufacturer
OES	.....	<u>O</u> riginal <u>E</u> quipment <u>S</u> upplier
SAE	.....	<u>S</u> ociety of <u>A</u> utomotive <u>E</u> ngineers
SUV	.....	<u>S</u> ports <u>U</u> tility <u>V</u> ehicle
VBA	.....	<u>V</u> isual <u>B</u> asic for <u>A</u> pplications

---





## A Anhang zu Kapitel 4



Abbildung A.1: Titelfolie der Präsentation zur Infoveranstaltung

Referenzszene – real

automotive engineering **iauv**



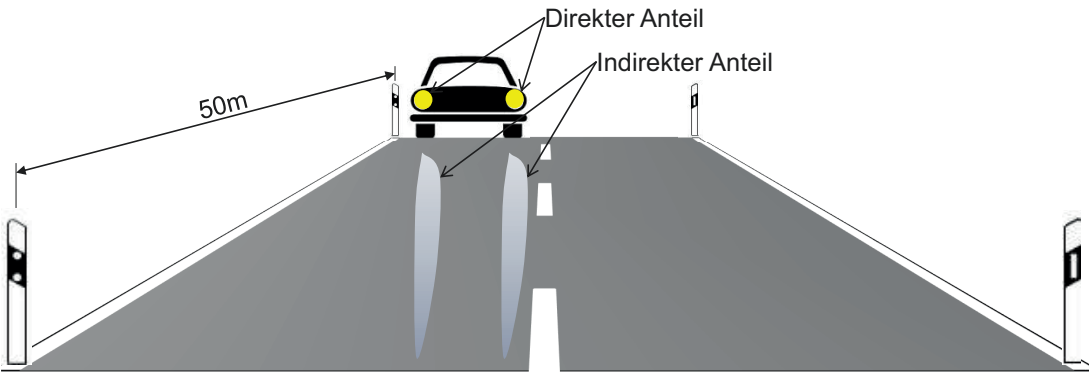
Quelle: [http://www.plainpicture.com/de/search?image\\_id=149486](http://www.plainpicture.com/de/search?image_id=149486), aufgerufen am 31.01.2013

2

Referenzszene – schematisch

automotive engineering **iauv**

Darstellung der Fahrerperspektive – Bewertung der Begegnungssituation



50m

Direkter Anteil

Indirekter Anteil

Quelle: [http://verkehrszeichen.kfz-auskunft.de/verkehrszeichen\\_verkehrseinrichtungen.html](http://verkehrszeichen.kfz-auskunft.de/verkehrszeichen_verkehrseinrichtungen.html); aufgerufen am 31.05.2013

3

Abbildung A.2: Folie 2 und 3 der Präsentation zur Infoveranstaltung

automotive engineering **iauv**

## Referenzszene – schematisch

---

**Draufsicht – Bewertung der Begegnungssituation**

4

automotive engineering **iauv**

## Gewichtung der Blendung

---

**Direkt**

**Indirekt**

**Eure subjektive Empfindung interessiert uns!**

Quelle: <http://www.schulbilder.org/malvorlage-waage-i22854.html>, aufgerufen am 31.05.2013

5

Abbildung A.3: Folie 4 und 5 der Präsentation zur Infoveranstaltung

## Umfrage

### „Blendungserscheinung im nächtlichen Straßenverkehr“



Quelle: [http://www.plainpicture.com/de/search?image\\_id=149486](http://www.plainpicture.com/de/search?image_id=149486), aufgerufen am 31.01.2013

Durchgeführt bei der IAV GmbH in Gifhorn  
Bereich Licht und Sicht / Abteilung VE-E 51

Von:

Benedikt Kleinert  
Roekwellstraße 16  
38518 Gifhorn  
Tel. +49 5371 805 – 1655

Gifhorn, Juni 2013

Liebe Kolleginnen und Kollegen der IAV GmbH,

„wie wichtig ist Euch eine gute Sicht?“

Die Ergebnisse aus dieser Umfrage sollen weitere Kenntnisse über die Wahrnehmung bezüglich der Blendung im nächtlichen Straßenverkehr liefern.

Wir, die Abteilung Licht und Sicht (VE-E5), sind sehr an der Meinung von unterschiedlichen Personengruppen (Laien, Experten) interessiert, um diese bei der Konzeptionierung innovativer Lichtsysteme zu berücksichtigen.

In der Umfrage geht es um die Erhebung von sowohl allgemeinen Informationen, als auch der subjektiven Beurteilung der Blendung im Straßenverkehr bei regenmasser Fahrbahn. Diese Daten werden kombiniert ausgewertet. Dabei wird zwischen der direkten Blendung durch das Scheinwerferlicht und das von der nassen Fahrbahn reflektierte Licht unterschieden.

Anmerkungen zur Teilnahme:

Die Teilnahme ist **freiwillig und anonym**. Der Zeitaufwand beträgt nur ca. **5 Minuten**. Eine Teilnahme ist ab sofort und innerhalb der nächsten 14 Tage möglich. **Ende der Umfrage ist der 17.06.2013 um 13 Uhr**.

Es ist zu beachten, dass Personen, welche einen der folgenden okulären Befunde besitzen, **bitte nicht an der Umfrage teilnehmen**:

- Trübungen der brechenden Medien (z.B. bei grauem Star)
  - Gesichtsfeldeinschränkungen (z.B. bei grünem Star oder Maculadegeneration)
  - Farbsinnstörungen (z.B. Rot-Grün-Störungen)
- Fehlsichtigkeiten (Kurz- und Weitsichtigkeit, Hornhautkrümmung) und Alterssichtigkeit entsprechen einem pathologischen Normalbefund und führen nicht zum Ausschluss von dieser Umfrage.

Über eine große Beteiligung, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, würden wir uns sehr freuen und bedanken uns für die Teilnahme bereits im Voraus.

Mit freundlichen Grüßen,

VE-E51, Benedikt Kleinert

Versuchsgruppe \_\_\_\_\_

Fragebogen \_\_\_\_\_

Die Fragen 1 bis 14 sind aus Sicht des Fahrers bei einer nächtlichen Fahrt auf regennasser Fahrbahn zu bewerten.

Bei Multiple Choice Fragen bitte jeweils immer nur eine zutreffende Antwort markieren.

- Wie viele Stunden nutzen Sie wöchentlich ein Kraftfahrzeug? Bitte um Angabe der wöchentlichen Dauer in Stunden / (h).  
\_\_\_\_\_ (h)
- Mit welchem Leuchtmittel ist die Abblendlichtfunktion der Frontscheinwerfer Ihres eigenen Pkws ausgestattet?  

Halogen	
Xenon	
LED	
- Wie empfinden Sie die Kfz-eigene Ausleuchtung des Verkehrsraumes durch Ihr Fahrzeug?  
 (Bitte markieren Sie das subjektive Empfinden auf der folgenden Skala durch EINEN vertikalen STRICH)  
 schlecht | \_\_\_\_\_ | gut

Seite 3 von 8

Versuchsgruppe \_\_\_\_\_

Fragebogen \_\_\_\_\_

- Werden die Frontscheinwerfer eines entgegenkommenden Fahrzeugs von Ihnen als störend empfunden?  
 (Bitte markieren Sie das subjektive Empfinden auf der folgenden Skala durch EINEN vertikalen STRICH)  
 unmerklich | \_\_\_\_\_ | unerträglich
- Welche Eigenschaft des Frontscheinwerfers stellt für Sie die größte Blendungsursache dar?  

Scheinwerfergröße	
Helligkeit	
Lichtfarbe	

 Sonstiges: \_\_\_\_\_
- Durch welches entgegenkommende Scheinwerferlicht fühlen Sie sich im nächtlichen Straßenverkehr am meisten geblendet?  

Halogen	
Xenon	
LED	
- Von welcher Fahrzeugklasse fühlen Sie sich am meisten geblendet?  

Auto	
Motorrad	
Omnibus / Lkw	

Seite 4 von 8

Fragebogen Versuchsgruppe

8. **Wie blendend finden Sie bei regennasser Fahrbahn speziell das über die Fahrbahn reflektierte Licht?**  
 (Bitte markieren Sie das subjektive Empfinden auf der folgenden Skala durch EINEN vertikalen STRICH)

unmerklich |————| unerträglich

9. **Welchen Fahrbahnzustand empfinden sie als stärker blendend** (Bitte markieren Sie das subjektive Empfinden auf der folgenden Skala durch EINEN vertikalen STRICH)

trocken |————| nass

10. **Wovon fühlen Sie sich im nächtlichen Straßenverkehr bei schlechten Wetterbedingungen (regennasse Fahrbahn) mehr geblendet?**

Direkt durch die Scheinwerfer	
Indirekt durch das über die Straße reflektierte Licht	
Durch beides gleichermaßen	
Weder noch	

Seite 5 von 8

Fragebogen Versuchsgruppe

11. **Durch welchen Bereich vor einem entgegenkommenden Fahrzeug fühlen Sie sich bei regennasser Fahrbahn am meisten geblendet?**  
 (Sie fahren das Ego-Fahrzeug; Bitte kreuzen Sie die zutreffende Zone an.)

Draufsicht

Seitenansicht

12. **In welcher Entfernung fühlen Sie sich von einem entgegenkommenden Fahrzeug bei regennasser Fahrbahn am stärksten geblendet?**  
 (Bitte kreuzen Sie die zutreffende Entfernung an.)

0,5 x	1 x	1,5 x	2 x
-----	-----	-----	-----
90 m	90 m	90 m	90 m
25 m	50 m	75 m	100 m

Seite 6 von 8



Fragebogen	Versuchsgruppe
------------	----------------

**17. Welcher Altersgruppe gehören Sie an?**

Bis einschließlich 24 Jahre	
25 – 34 Jahre	
35 – 44 Jahre	
45 Jahre und älter	

**18. Geschlecht?**

Männlich	
Weiblich	

**19. Wurde Ihrer Meinung nach ein wesentlicher Punkt bzgl. Blendung vernachlässigt? Wenn ja, bitte anführen.**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**20. Welche Anforderungen/Spezifikationen würden Sie an eine intelligente Schlechtwetterlicht-Funktion stellen?**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Vielen Dank!**

Seite 8 von 8

Fragebogen	Versuchsgruppe
------------	----------------

**13. In welcher Verkehrsgebung fühlen Sie sich bei schlechten Wetterbedingungen durch eine regenasse Fahrbahn am meisten geblendet?**  
(Blendung durch entgegenkommende Verkehrsteilnehmer)

Stadsrabe mit orrfester Verkehrsbeleuchtung	
Stadsrabe ohne orrfefefte Verkehrsbeleuchtung	
Landsrabe	
Autobahn	

**14. Welche Straffendeckschicht empfinden Sie bei nächtlichen Fahrten und regenasser Fahrbahn besonders blendend?**

Beton	
Asphalt	
Weder noch	

**15. Wie wichtig erachten Sie nach Beantwortung aller Fragen eine Minimierung der Blendung, die durch das über die Fahrbahn reflektierte Licht hervorgerufen wird?**

+++ (sehr hoch)	
++	
+	
0 (kein Bedarf)	

**16. Tragen Sie nachts beim Autofahren eine Sehkorrektur?**

keine	
Brille	
Kontaktlinse	

Seite 7 von 8

Abbildung A.4: Fragebogen „Blendung im nächtlichen Straßenverkehr“



## B Anhang zu Kapitel 5

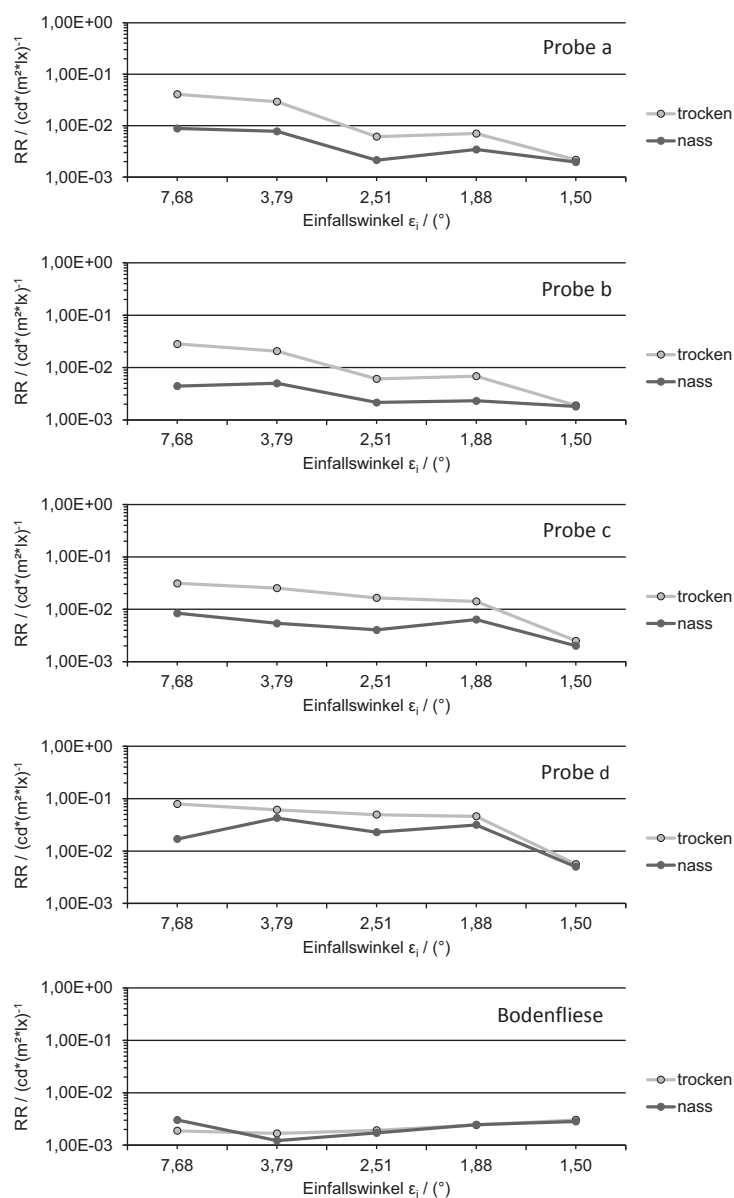


Abbildung B.1: Leuchtdichtekoeffizienten für Rückreflexion  $R_R$  in Abhängigkeit des Einfallswinkels  $\epsilon_i$  (vgl. [See13])

Tabelle B.1: Messwerte für  $E_v, E_h, L$  und ermittelte Leuchtdichtekoeffizienten für Rückwärtsreflexion  $R_R$  der analysierten Bodenproben und Bodenfliese (vgl. [See13])

TROCKEN						NASS					
<b>Probe a:</b>						<b>Probe a:</b>					
$\varepsilon_i / ^\circ$	$E_h / \text{lx}$	$E_v / \text{lx}$	$L / \text{cd/m}^2$	$E_{\perp} / \text{lx}$	$R_R / \text{mcd} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{lx})^{-1}$	$\varepsilon_i / ^\circ$	$E_h / \text{lx}$	$E_v / \text{lx}$	$L / \text{cd/m}^2$	$E_{\perp} / \text{lx}$	$R_R / \text{mcd} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{lx})^{-1}$
7,68	3,670	24,000	0,990	24,279	40,776	7,68	3,670	24,000	0,214	24,279	8,797
3,79	3,870	57,050	1,672	57,181	29,233	3,79	3,870	57,050	0,444	57,181	7,757
2,51	1,330	38,830	0,237	38,853	6,109	2,51	1,330	38,830	0,083	38,853	2,134
1,88	0,300	25,950	0,183	25,952	7,037	1,88	0,300	25,950	0,089	25,952	3,446
1,50	0,130	19,930	0,043	19,930	2,166	1,50	0,130	19,930	0,039	19,930	1,960
<b>Probe b:</b>						<b>Probe b:</b>					
$\varepsilon_i / ^\circ$	$E_h / \text{lx}$	$E_v / \text{lx}$	$L / \text{cd/m}^2$	$E_{\perp} / \text{lx}$	$R_R / \text{mcd} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{lx})^{-1}$	$\varepsilon_i / ^\circ$	$E_h / \text{lx}$	$E_v / \text{lx}$	$L / \text{cd/m}^2$	$E_{\perp} / \text{lx}$	$R_R / \text{mcd} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{lx})^{-1}$
7,68	3,670	24,000	0,685	24,279	28,225	7,68	3,670	24,000	0,108	24,279	4,446
3,79	3,870	57,050	1,182	57,181	20,664	3,79	3,870	57,050	0,287	57,181	5,018
2,51	1,330	38,830	0,237	38,853	6,099	2,51	1,330	38,830	0,084	38,853	2,162
1,88	0,300	25,950	0,178	25,952	6,877	1,88	0,300	25,950	0,061	25,952	2,332
1,50	0,130	19,930	0,038	19,930	1,900	1,50	0,130	19,930	0,036	19,930	1,809
<b>Probe c:</b>						<b>Probe c:</b>					
$\varepsilon_i / ^\circ$	$E_h / \text{lx}$	$E_v / \text{lx}$	$L / \text{cd/m}^2$	$E_{\perp} / \text{lx}$	$R_R / \text{mcd} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{lx})^{-1}$	$\varepsilon_i / ^\circ$	$E_h / \text{lx}$	$E_v / \text{lx}$	$L / \text{cd/m}^2$	$E_{\perp} / \text{lx}$	$R_R / \text{mcd} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{lx})^{-1}$
7,68	3,670	24,000	0,761	24,279	31,346	7,68	3,670	24,000	0,205	24,279	8,435
3,79	3,870	57,050	1,451	57,181	25,367	3,79	3,870	57,050	0,309	57,181	5,405
2,51	1,330	38,830	0,643	38,853	16,540	2,51	1,330	38,830	0,158	38,853	4,057
1,88	0,300	25,950	0,368	25,952	14,178	1,88	0,300	25,950	0,166	25,952	6,382
1,50	0,130	19,930	0,050	19,930	2,504	1,50	0,130	19,930	0,040	19,930	2,021
<b>Probe d:</b>						<b>Probe d:</b>					
$\varepsilon_i / ^\circ$	$E_h / \text{lx}$	$E_v / \text{lx}$	$L / \text{cd/m}^2$	$E_{\perp} / \text{lx}$	$R_R / \text{mcd} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{lx})^{-1}$	$\varepsilon_i / ^\circ$	$E_h / \text{lx}$	$E_v / \text{lx}$	$L / \text{cd/m}^2$	$E_{\perp} / \text{lx}$	$R_R / \text{mcd} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{lx})^{-1}$
7,68	3,670	24,000	1,915	24,279	78,864	7,68	3,670	24,000	0,411	24,279	16,946
3,79	3,870	57,050	3,505	57,181	61,301	3,79	3,870	57,050	2,438	57,181	42,644
2,51	1,330	38,830	1,922	38,853	49,472	2,51	1,330	38,830	0,889	38,853	22,880
1,88	0,300	25,950	1,192	25,952	45,915	1,88	0,300	25,950	0,817	25,952	31,496
1,50	0,130	19,930	0,112	19,930	5,612	1,50	0,130	19,930	0,100	19,930	5,004
<b>Bodenfliese:</b>						<b>Bodenfliese:</b>					
$\varepsilon_i / ^\circ$	$E_h / \text{lx}$	$E_v / \text{lx}$	$L / \text{cd/m}^2$	$E_{\perp} / \text{lx}$	$R_R / \text{mcd} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{lx})^{-1}$	$\varepsilon_i / ^\circ$	$E_h / \text{lx}$	$E_v / \text{lx}$	$L / \text{cd/m}^2$	$E_{\perp} / \text{lx}$	$R_R / \text{mcd} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{lx})^{-1}$
7,68	3,670	24,000	0,046	24,279	1,875	7,68	3,670	24,000	0,073	24,279	3,018
3,79	3,870	57,050	0,096	57,181	1,675	3,79	3,870	57,050	0,070	57,181	1,222
2,51	1,330	38,830	0,074	38,853	1,915	2,51	1,330	38,830	0,066	38,853	1,710
1,88	0,300	25,950	0,063	25,952	2,417	1,88	0,300	25,950	0,064	25,952	2,460
1,50	0,130	19,930	0,060	19,930	3,026	1,50	0,130	19,930	0,056	19,930	2,826

Tabelle B.2: Gemessene Leuchtdichte und ermittelte Beleuchtungsstärken am Punkt B50L(indirekt) zur Bewertung des Effekts des über die Bodenproben an Position RP reflektierten Lichtstroms (vgl. [See13])

	Probenposition	Trocken			Nass			$\Delta E_v$ (lx)	Faktor
		L (cd/m <sup>2</sup> )	$q_v(\text{Messschirm})$ (cd·(m <sup>2</sup> ·lx) <sup>-1</sup> )	$E_v$ (lx) berechnet (E=L/q)	L (cd/m <sup>2</sup> )	$q_v(\text{Messschirm})$ (cd·(m <sup>2</sup> ·lx) <sup>-1</sup> )	$E_v$ (lx) berechnet (E=L/q)		
<b>Messbereich: B50L(indirekt)</b>									
Probe a	0°	0,0040	0,299	0,0134	0,0045	0,299	0,01495	0,0015	1,1119
Probe b	0°	0,0040	0,299	0,0134	0,0054	0,299	0,01807	0,0047	1,3480
Probe c	0°	0,0040	0,299	0,0133	0,0052	0,299	0,01740	0,0041	1,3040
Probe d	0°	0,0040	0,299	0,0135	0,0040	0,299	0,01331	-0,0002	0,9864
Bodenfliese	0°	0,0131	0,299	0,0438	0,0059	0,299	0,01973	-0,0240	0,4508
<b>Zusatz: Flächendeckender Wasserfilm auf der Bodenfliese an Position RP</b>									
		<b>Leuchtdichte im Messbereich B50L(indirekt) / (cd/m<sup>2</sup>)</b>				<b>Faktor (nass/ trocken)</b>			
	<b>Zustand</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>Streuung</b>				
<b>Bodenfliese</b>	trocken	0,0074	0,0183	0,0137	0,0025	67			
	Wasserfilm	0,0075	4,3090	0,9235	1,2570				

Tabelle B.3: Umrechnungsfaktoren für den Leuchtdichtekoeffizienten für Rückwärtsreflexion  $R_R$  der Bodenfliese auf den der Fahrbahndeckschichten im trockenen und nassen Zustand (vgl. [See13])

$\varepsilon_i / ^\circ$	TROCKEN				NASS			
	Probe a	Probe b	Probe c	Probe d	Probe a	Probe b	Probe c	Probe d
<b>7,68</b>	21,75	15,06	16,72	42,07	4,69	2,37	4,5	9,04
<b>3,79</b>	17,45	12,34	15,14	36,59	4,63	3	3,23	25,46
<b>2,51</b>	3,19	3,18	8,64	25,83	1,11	1,13	2,12	11,94
<b>1,88</b>	2,91	2,84	5,86	18,99	1,43	0,96	2,64	13,03
<b>1,5</b>	0,72	0,63	0,83	1,85	0,65	0,6	0,67	1,65

Tabelle B.4: Messwerte der Blendbeleuchtungsstärke (lx) entlang der Linie-RP<sub>25</sub> und Angabe der absoluten Erhöhung und des Faktors

Messposition	Fliesenkante	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	Aritmetischer Mittelwert
	y / (m)	3,78	3,15	2,52	1,89	1,26	0,63	0	-0,63	
<b>Ohne Blenden</b>	E / (lx)	1,90	2,00	2,15	2,40	2,64	2,83	2,90	3,58	<b>1,70</b> <b>3,14</b>
<b>Mit Blenden</b>	E / (lx)	0,59	0,63	0,65	0,70	0,76	0,85	0,96	1,68	
$\Delta E = E_{\text{ohne}} - E_{\text{mit}}$	E / (lx)	1,31	1,37	1,50	1,70	1,88	1,98	1,94	1,90	
<b>Faktor</b>	()	3,22	3,17	3,31	3,43	3,47	3,33	3,02	2,13	

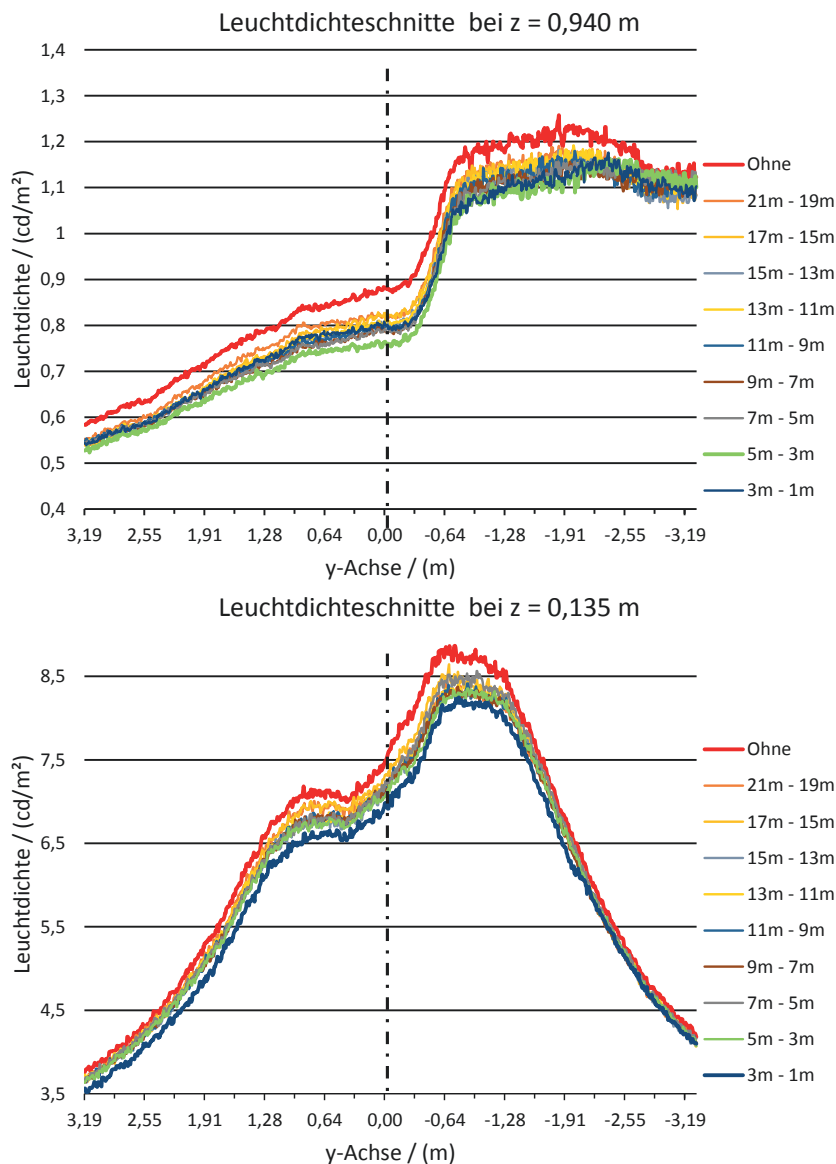


Abbildung B.2: Leuchtdichteschnitte bei 0,940 m (oben) und 0,135 m (unten) zur Darstellung des Effekts einer streifenweisen Modifikation der Reflexionseigenschaft der Fahrbahndeckschicht

Tabelle B.5: Prozentuale Reduzierung der messbaren Leuchtdichte in 0,940 m Höhe in Abhängigkeit des modifizierten Bereichs

	Leuchtdichte (cd/m²)		Prozentuale Reduzierung der messbaren Leuchtdichte in Abhängigkeit des modifizierten Bereichs (m)											Durchschnittliche Reduzierung
	Ohne Blende	Mit Blende	Blende	21 - 19	19 - 17	17 - 15	15 - 13	13 - 11	11 - 9	9 - 7	7 - 5	5 - 3	3 - 1	
<b>Mittelwert:</b>	0,74	0,26	65,31	5,28	6,33	7,23	8,26	7,52	8,11	9,01	8,99	11,24	7,88	7,99
<b>Standardabweichung:</b>	0,09	0,03	1,16	0,74	0,91	0,92	0,54	0,60	0,88	0,98	1,09	1,14	0,63	



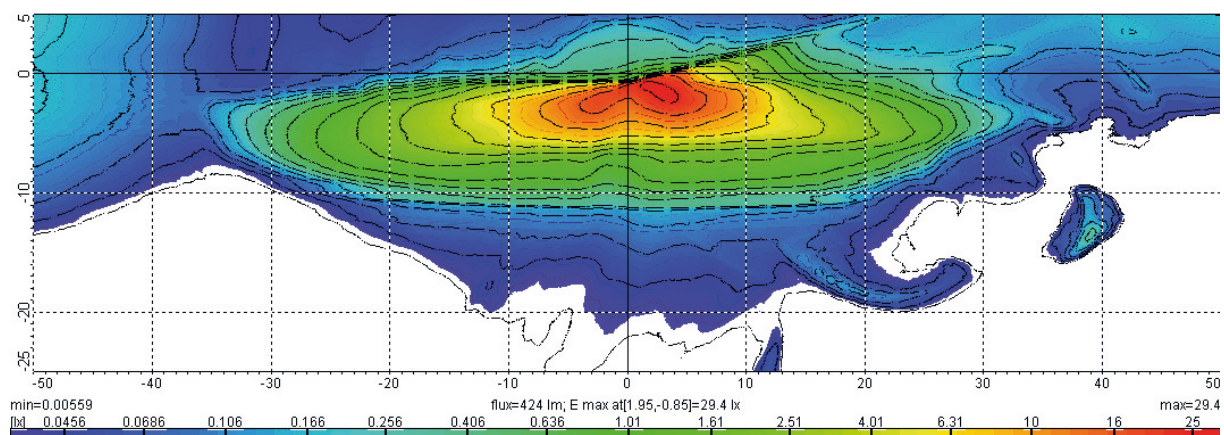


Abbildung B.3: Beleuchtungsstärkeverteilung des Trabant nT Prototypenscheinwerfers in 25 m Messentfernung (Quelle: IAV)

Tabelle B.6: Messwerte der Blendbeleuchtungsstärke am Punkt B50L und Effekt (absolut und relativ) der Wechselwirkung aus Scheinwerferanbauhöhe und Modifikation der jeweiligen Zone

Bereich der Modifikation / (m)	Mit Blende im Strahlengang	Zone									Σ aller Bereiche
		Keine	1	2	3	4	5	6	7	8	
			1 - 4	4 - 7	7 - 10	10 - 13	13 - 16	16 - 19	19 - 22	22 - 25	
<b>Anbauhöhe 530mm</b>											
Beleuchtungsstärke / (lx)		1,72	1,71	1,6	1,44	1,43	1,48	1,5	1,51	1,61	
Reduzierung absolut / (lx)			0,01	0,12	0,28	0,29	0,24	0,22	0,21	0,11	1,48
Reduzierung relativ / (%)			0,6	7,0	16,3	16,9	14,0	12,8	12,2	6,4	86,0
<b>Anbauhöhe 650mm</b>											
Beleuchtungsstärke / (lx)	0,41	2,02	2,04	1,99	1,84	1,73	1,71	1,69	1,66	1,82	
Reduzierung absolut / (lx)			-0,02	0,03	0,18	0,29	0,31	0,33	0,36	0,2	1,68
Reduzierung relativ / (%)			-1,0	1,5	8,9	14,4	15,3	16,3	17,8	9,9	83,2
<b>Anbauhöhe 820mm</b>											
Beleuchtungsstärke / (lx)		2,27	2,27	2,25	2,15	2	1,94	1,88	1,82	2,02	
Reduzierung absolut / (lx)			0	0,02	0,12	0,27	0,33	0,39	0,45	0,25	1,83
Reduzierung relativ / (%)			0,0	0,9	5,3	11,9	14,5	17,2	19,8	11,0	80,6



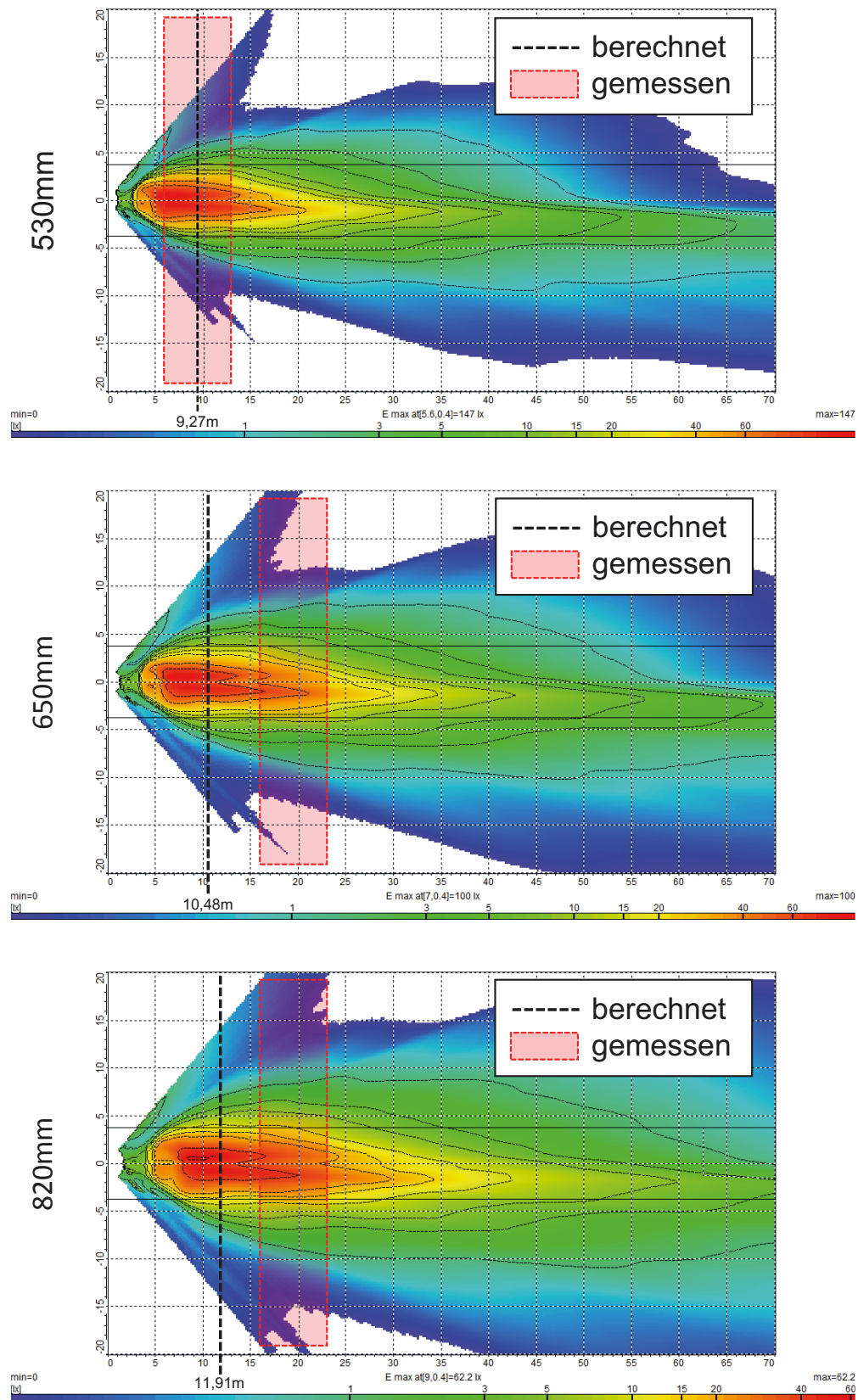


Abbildung B.4: Vergleich der mathematisch berechneten mit den messtechnisch erfassten Bereichen, die vorrangig die Blendbeleuchtungsstärke beeinflussen (vgl. [Töp13])

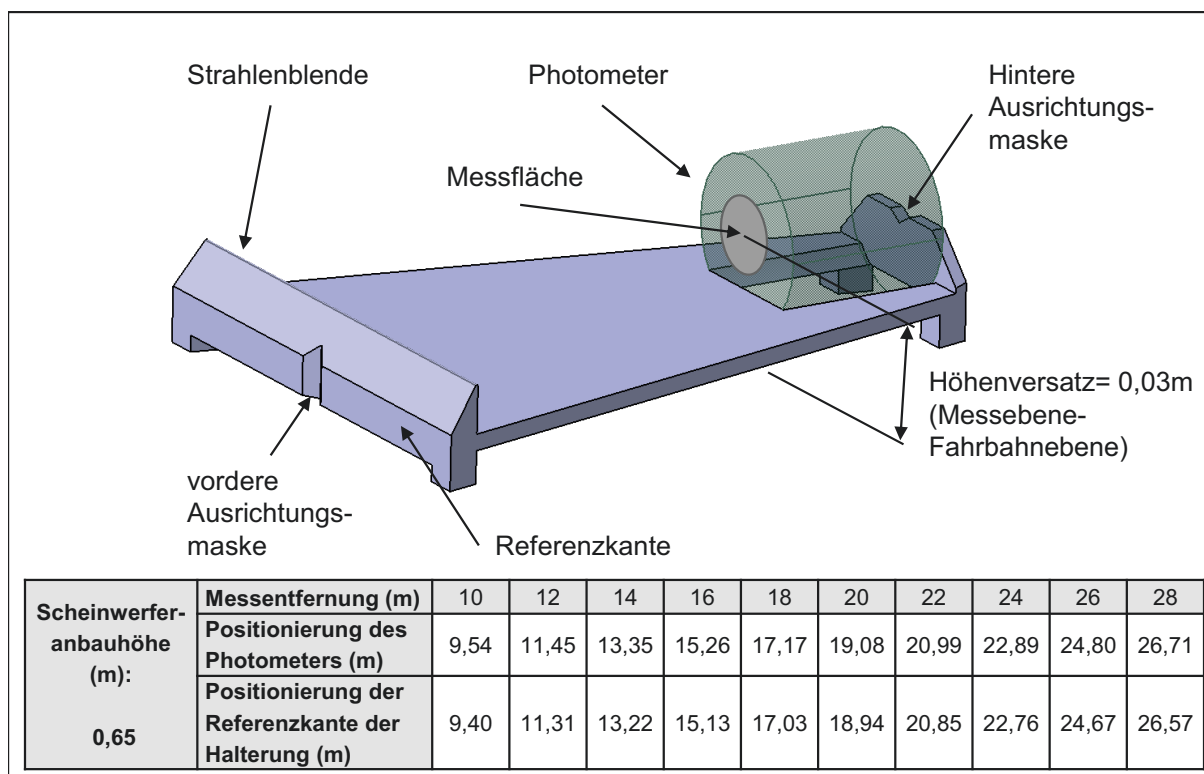
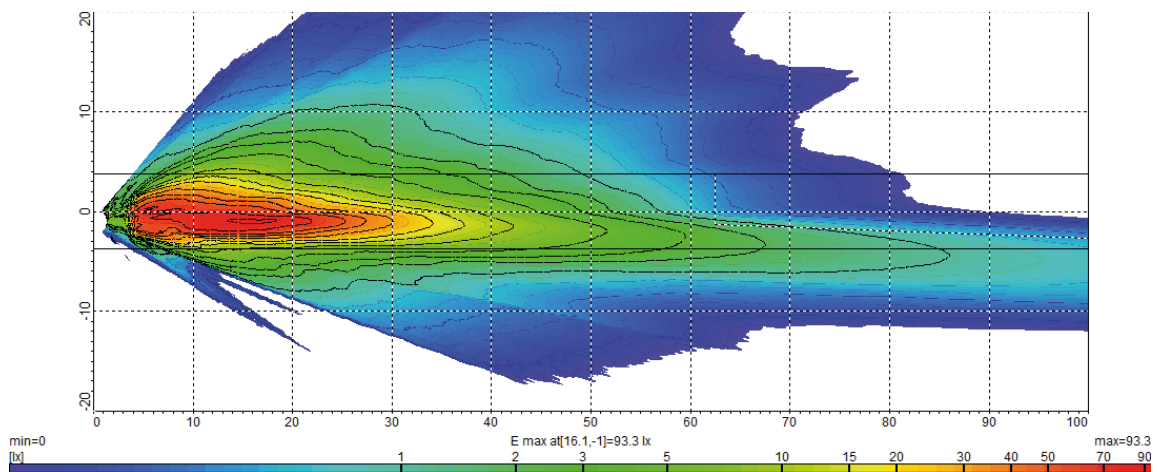


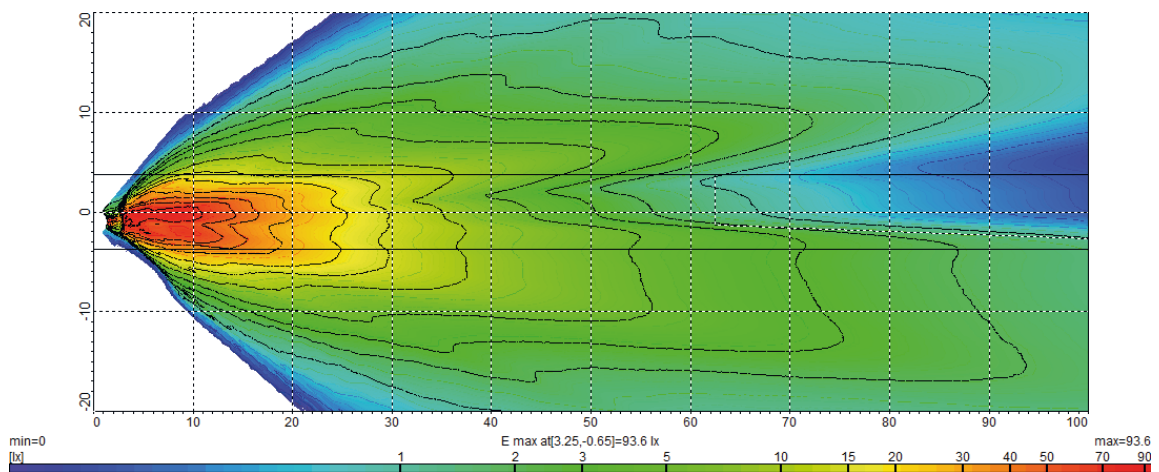
Abbildung B.5: Photometerhalterung inklusive der Messentfernungen bei einer Scheinwerferanbauhöhe von 0,65 m zur Messung der direkten vertikalen Beleuchtungsstärke auf Fahrbahnhöhe

Tabelle B.7: Messwerte der vertikalen  $E_v$  und radialen Beleuchtungsstärke  $E_r$  inklusive absoluter und relativer Abweichung

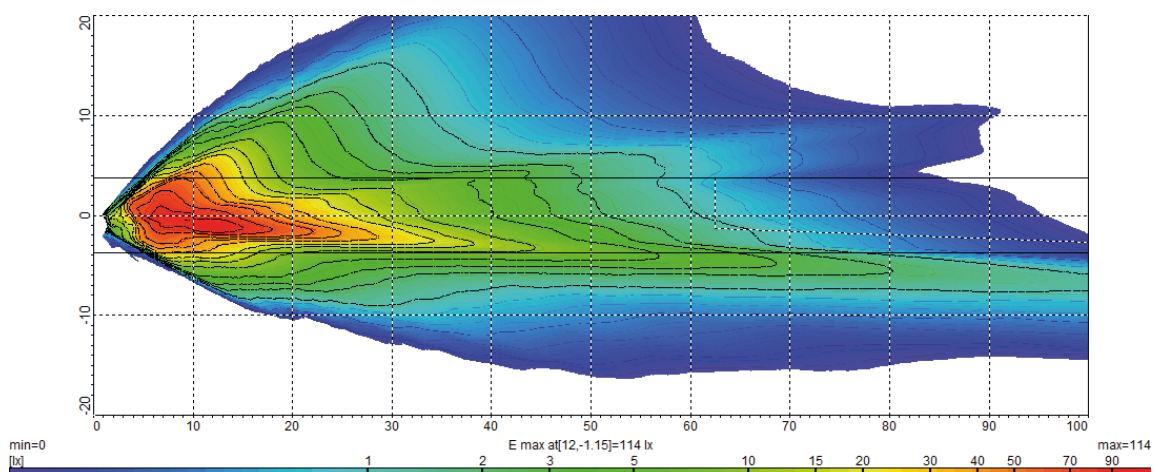
Messentfernung / (m)	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
Beleuchtungsstärke (basierend auf LVK) / (lx)	61,54	52,13	43,91	37,85	32,81	28,56	24,75	21,55	18,86	16,61
Beleuchtungsstärke (Messung) / (lx)	60,85	54,00	46,50	40,30	35,00	30,60	26,80	23,50	20,60	18,10
Abweichung (abs.) / (lx)	0,69	-1,87	-2,59	-2,45	-2,19	-2,04	-2,05	-1,95	-1,74	-1,49
Abweichung (rel.) / (%)	1,11	3,58	5,89	6,47	6,66	7,13	8,29	9,03	9,24	9,00



(a) Lichtverteilung eines Reflexionssystems mit Halogen-Glühlampe (H7)



(b) Lichtverteilung eines Projektionssystems mit Gasentladungslampe (D3S)



(c) Lichtverteilung eines Projektionssystems mit LED Leuchtmitteln

Abbildung B.6: Beleuchtungsstärkeverteilung der untersuchten linken Serienscheinwerfer eines Fahrzeugs der oberen Mittelklasse aus bird's eye view (BEV) bei einer angenommenen Anbauhöhe von 0,65 m

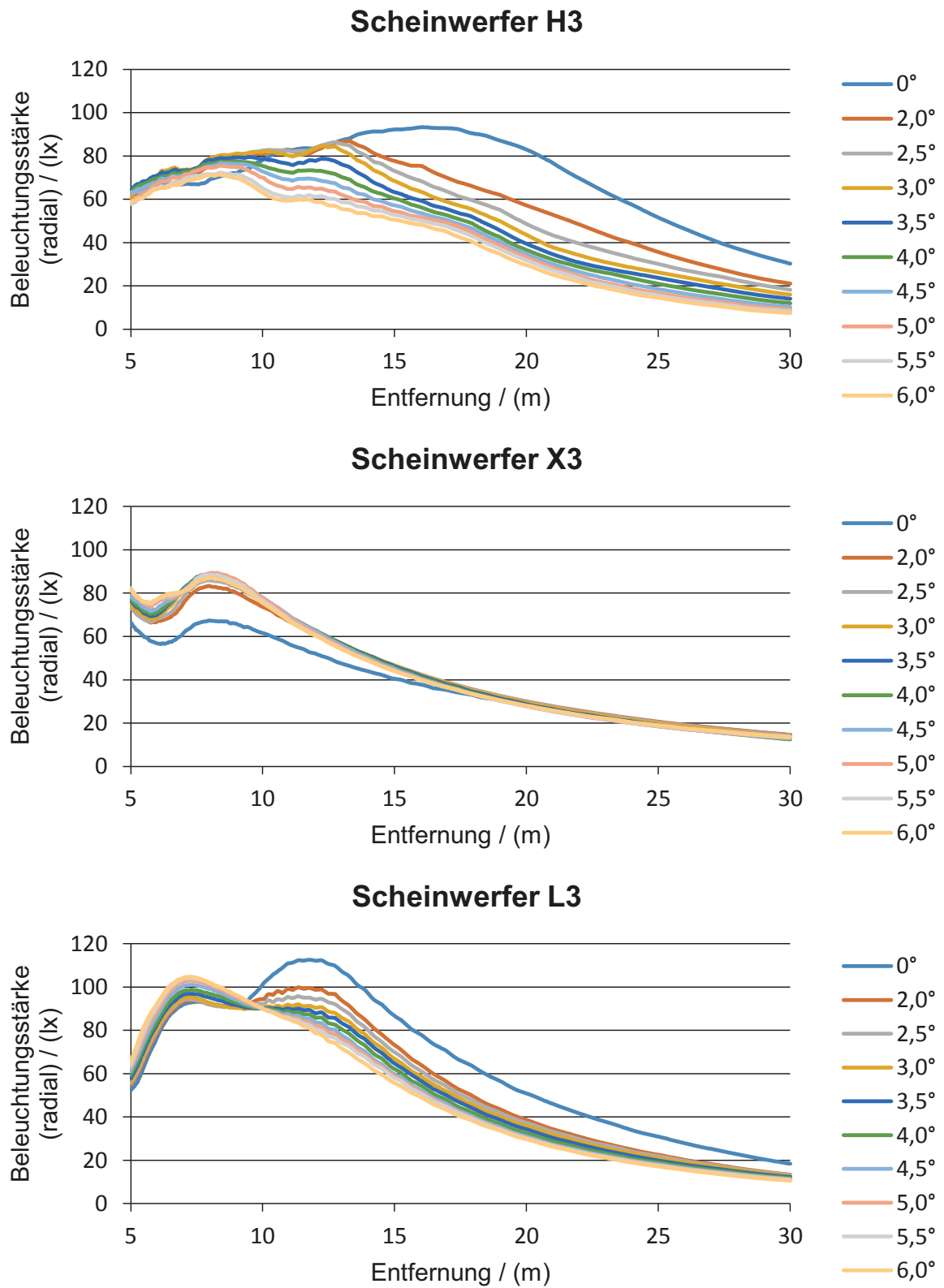


Abbildung B.7: Beleuchtungsstärke entlang der Reflexlinien (Oben: Halogen; Mitte: Xenon; Unten: LED)

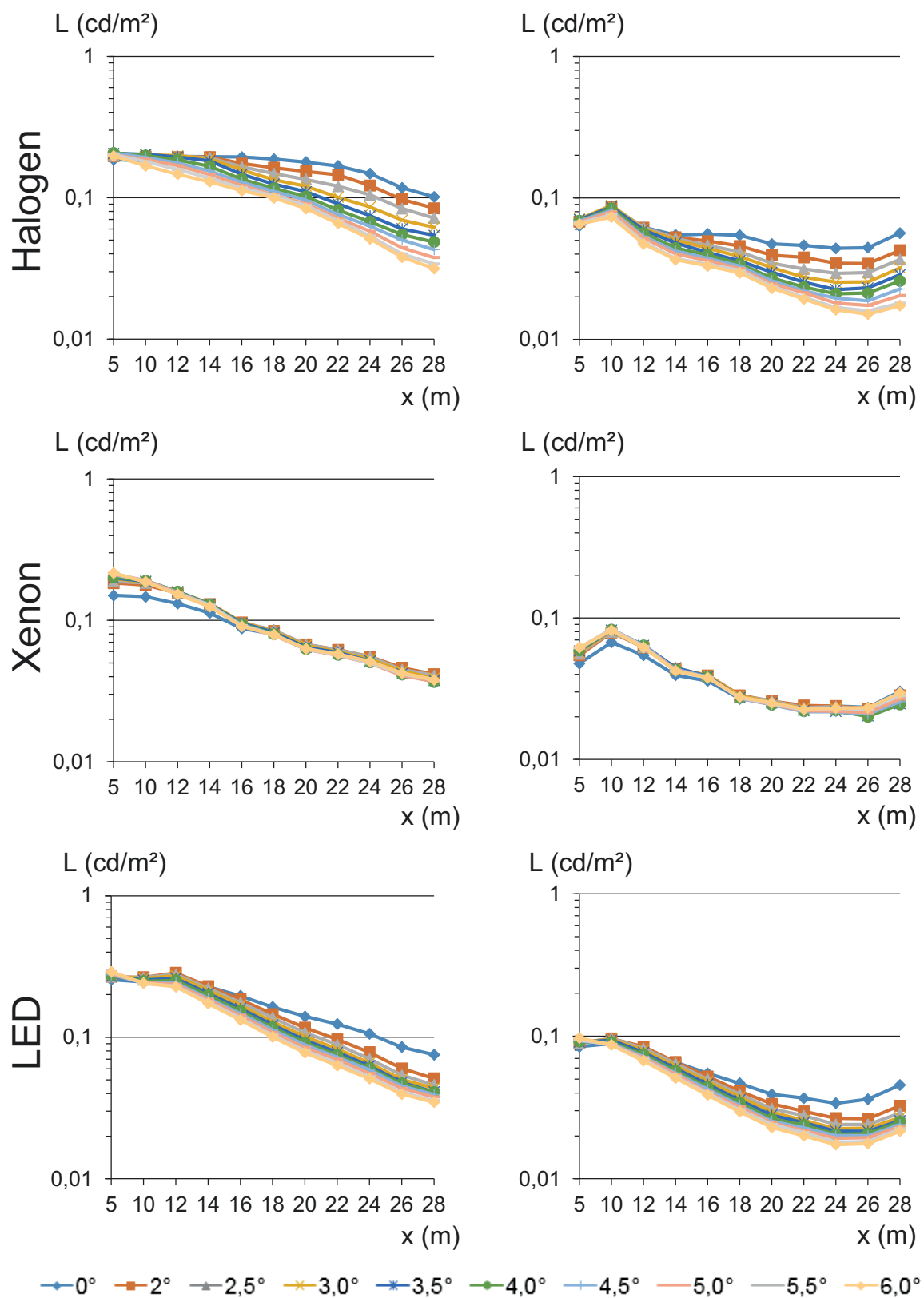


Abbildung B.8: Leuchtdichte entlang der Reflexlinien bei trockener (li.) und nasser (re.) Fahrbahndeckschicht aus Fahrerperspektive (Oben: Halogen; Mitte: Xenon; Unten: LED)

## C Anhang zu Kapitel 6

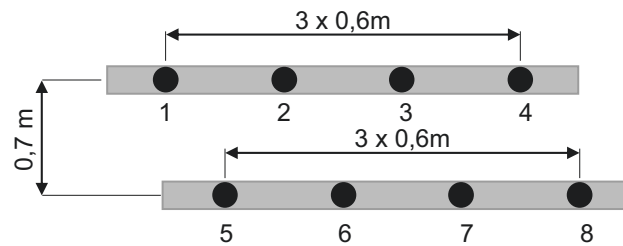
Tabelle C.1: Messwerte - Analyse der Abblendlichtverteilung des Trabant nT Scheinwerfers

I. Analyse der Abblendlichtverteilung des Trabant nT Scheinwerfers										
Messentfernung (m)	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
<b>Messwerte (bereits Streulicht bereinigt) (lx)</b>										
Direkte Blendbeleuchtungsstärke	0,31	0,29	0,28	0,22	0,17	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07
Gesamte Blendbeleuchtungsstärke bei trockener Fahrbahn	0,58	0,6	0,43	0,3	0,23	0,18	0,14	0,12	0,09	0,09
Gesamte Blendbeleuchtungsstärke bei spiegelnder Fahrbahn	5,09	6,25	7,96	5,58	4,28	4,25	3,23	2,72	1,98	1,59
<b>Äquivalente Schleierleuchtdichte (cd/m²)</b>										
Simulation	0,05	0,08	0,12	0,13	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16
trockene Fahrbahn	0,09	0,16	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,2	0,18	0,22
spiegelnde Fahrbahn	0,78	1,69	3,36	3,38	3,53	4,57	4,4	4,57	4,03	3,85
<b>Indirekte Blendbeleuchtungsstärke (=Gesamt-Direkt) (lx)</b>										
trockene Fahrbahn	0,27	0,31	0,15	0,08	0,06	0,05	0,03	0,03	0,01	0,02
spiegelnde Fahrbahn	4,78	5,96	7,68	5,36	4,11	4,12	3,12	2,63	1,9	1,52
<b>Blendanteile bei trockener Fahrbahn (%)</b>										
Direkt	53,62	49	64,42	72,67	71,74	72,22	75	72,92	83	71,67
Indirekt	46,38	51	35,58	27,33	28,26	27,78	25	27,08	17	28,33
<b>Blendanteile bei spiegelnder Fahrbahn (%)</b>										
Direkt	6,11	4,7	3,48	3,91	3,86	3,06	3,25	3,22	3,77	4,06
Indirekt	93,89	95,3	96,52	96,09	96,14	96,94	96,75	96,78	96,23	95,94

Tabelle C.2: Messwerte - Vergleich verschiedener Abblendlichtverteilungen

II. Vergleich verschiedener Abblendlichtverteilungen													
Messentfernung (m)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
<b>1. Messwerte zu den linken Scheinwerfern</b>													
Direkte Blendbeleuchtungsstärke (lx)													
Projektion_D1_35W	1,20	0,40	0,29	0,17	0,11	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02
Projektion_D5_25W	0,00	0,94	0,73	0,45	0,24	0,15	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03
Reflexion_H4	0,72	0,50	0,41	0,23	0,19	0,16	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05
Reflexion_H7(1)	1,27	0,96	0,50	0,31	0,21	0,17	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05
Reflexion_H7(2)	1,69	0,78	0,48	0,36	0,25	0,19	0,15	0,12	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05
Ref-fzg Reflexion_Halogen_H3	4,36	1,11	0,54	0,32	0,24	0,19	0,15	0,12	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05
Ref-fzg Projektion_Xenon_X3	0,67	1,02	0,57	0,36	0,26	0,18	0,14	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05
Ref-fzg Multi-Projektion_LED_L3	2,52	2,07	0,99	0,67	0,42	0,27	0,19	0,14	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05
<b>2. Messwerte zu den rechten Scheinwerfern</b>													
Direkte Blendbeleuchtungsstärke (lx)													
Projektion_D1_35W	0,84	0,33	0,17	0,12	0,09	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03
Projektion_D5_25W	0,00	0,14	0,36	0,38	0,28	0,21	0,17	0,12	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04
Reflexion_H4	0,03	0,12	0,13	0,10	0,11	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05
Reflexion_H7(1)	0,06	0,30	0,25	0,20	0,15	0,12	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03
Reflexion_H7(2)	0,50	0,40	0,28	0,25	0,24	0,21	0,18	0,14	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06
Ref-fzg Reflexion_Halogen_H4	0,29	0,52	0,50	0,37	0,26	0,18	0,15	0,12	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05
Ref-fzg Projektion_Xenon_X4	0,32	0,60	0,57	0,39	0,27	0,19	0,14	0,11	0,09	0,07	0,06	0,06	0,05
Ref-fzg Multi-Projektion_LED_L4	0,32	1,46	0,91	0,57	0,41	0,30	0,22	0,16	0,12	0,10	0,08	0,07	0,06

## Skizze: Beobachterpositionen



		Vertikale Blendbeleuchtungsstärke $E_V / (lx)$							
		Beobachterposition							
Scheinwerfer	Blendsituation	1	2	3	4	5	6	7	8
Halogen	Gesamt	2,59	3,48	2,49	1,75	3,58	2,58	2,07	1,51
	Direkt	0,14	0,13	0,13	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12
	Indirekt	2,57	3,37	2,44	1,72	3,56	2,55	2,05	1,44
	Dunkelmessung	0,02							
Xenon	Gesamt	1,42	2,21	1,83	1,45	2,00	1,81	1,59	1,29
	Direkt	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,10
	Indirekt	1,36	2,14	1,75	1,34	1,94	1,75	1,51	1,19
	Dunkelmessung	0,03							
LED	Gesamt	1,76	2,66	2,07	1,68	2,34	2,24	1,89	1,44
	Direkt	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,12
	Indirekt	2,46	3,48	2,44	1,71	3,55	2,55	2,03	1,46
	Dunkelmessung	0,03							

Abbildung C.1: Skizze und Messwerte der vertikalen Blendbeleuchtungsstärke  $E_V(lx)$  an den Beobachterpositionen (1-8) in 50 m Entfernung bei spiegelnder Fahrbahnoberfläche

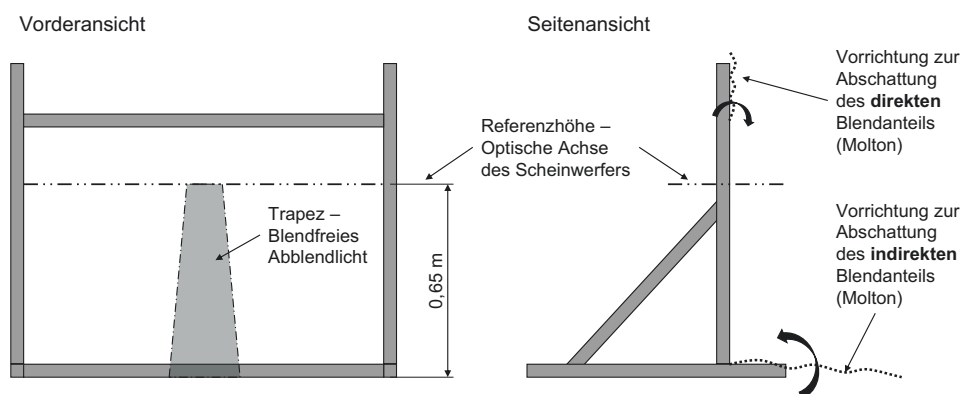


Abbildung C.2: Skizze der variablen Blende zur Realisierung der unterschiedlichen Blendsituationen (Gesamt; Direkt; Indirekt) in Vorder- und Seitenansicht; Referenzhöhe = optischen Achse des Scheinwerfersystems



Tabelle C.3: Messwerte - Vergleich verschiedener Abblendlichtverteilungen eines Referenz-Fahrzeugs

<b>III. Vergleich verschiedener Abblendlichtverteilungen eines Referenz-Fahrzeugs</b>												
<b>Messentfernung</b>		(m)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	49,3
<b>1. Messwerte bei trockener Fahrbahn (lx)</b>												
Abblendlichtverteilung	Ref-fzg_Reflexion_Halogen (links: H3; rechts H4)	links	3,28	1,46	0,82	0,57	0,41	0,3	0,22	0,17	0,15	0,12
		rechts	0,19	0,59	0,58	0,45	0,36	0,26	0,2	0,16	0,14	0,11
		beide	3,47	2,05	1,41	1,02	0,76	0,56	0,43	0,34	0,29	0,24
	Ref-fzg_Projektion_Xenon (links: X3; rechts X4)	links	0,78	1,2	0,77	0,5	0,35	0,25	0,18	0,14	0,11	0,11
		rechts	0,28	0,85	0,8	0,59	0,45	0,32	0,24	0,18	0,14	0,11
		beide	1,07	2,06	1,55	1,09	0,8	0,57	0,42	0,32	0,25	0,21
	Ref-fzg_Multi-Projektion (links: L3; rechts L4)	links	2,8	2,51	1,59	0,97	0,59	0,38	0,28	0,19	0,14	0,17
		rechts	0,28	1,81	1,26	0,74	0,53	0,4	0,3	0,21	0,16	0,15
		beide	3,07	4,29	2,84	1,71	1,11	0,78	0,57	0,41	0,32	0,3
<b>2. Messwerte bei spiegelnder Fahrbahn (lx)</b>												
Abblendlichtverteilung	Ref-fzg_Reflexion_Halogen (links: H3; rechts H4)	links	3,7	3,95	4,19	3,99	3,9	3,05	2,74	2,27	1,9	1,53
		rechts	0,21	0,97	2,09	2,52	3,17	3,02	2,48	2,35	2,11	1,76
		beide	3,92	4,93	6,28	6,51	7,08	6,08	5,22	4,6	4,02	3,28
	Ref-fzg_Projektion_Xenon (links: X3; rechts X4)	links	1,83	4,85	4,95	4,45	3,7	2,78	2,31	1,84	1,48	1,19
		rechts	0,43	3,05	4,43	4,99	5,12	4,35	3,41	3,05	2,71	2,38
		beide	2,27	7,88	9,41	9,44	8,83	7,16	5,68	4,88	4,17	3,59
	Ref-fzg_Multi-Projektion (links: L3; rechts L4)	links	3,74	6,44	7,03	6,43	5,26	3,97	3,35	2,56	1,95	1,56
		rechts	0,33	3,62	4,37	3,89	3,71	3,43	2,73	2,47	2,23	1,81
		beide	4,04	10,02	11,39	10,32	8,96	7,4	6,07	5,02	4,18	3,38
<b>3. Effekt der spiegelnden Fahrbahnoberfläche</b>												
absolut (lx)												
Abblendlichtverteilung	Ref-fzg_Reflexion_Halogen (links: H3; rechts H4)	links	0,42	2,49	3,37	3,42	3,49	2,75	2,52	2,1	1,75	1,41
		rechts	0,02	0,38	1,51	2,07	2,81	2,76	2,28	2,19	1,97	1,65
		beide	0,45	2,88	4,87	5,49	6,32	5,52	4,79	4,26	3,73	3,04
	Ref-fzg_Projektion_Xenon (links: X3; rechts X4)	links	1,05	3,65	4,18	3,95	3,35	2,53	2,13	1,7	1,37	1,08
		rechts	0,15	2,2	3,63	4,4	4,67	4,03	3,17	2,87	2,57	2,27
		beide	1,2	5,82	7,86	8,35	8,03	6,59	5,26	4,56	3,92	3,38
	Ref-fzg_Multi-Projektion (links: L3; rechts L4)	links	0,94	3,93	5,44	5,46	4,67	3,59	3,07	2,37	1,81	1,39
		rechts	0,05	1,81	3,11	3,15	3,18	3,03	2,43	2,26	2,07	1,66
		beide	0,97	5,73	8,55	8,61	7,85	6,62	5,5	4,61	3,86	3,08
Faktor* ( )												
Abblendlichtverteilung	Ref-fzg_Reflexion_Halogen (links: H3; rechts H4)	links	1,13	2,71	5,11	7,00	9,51	10,17	12,45	13,35	12,67	12,75
		rechts	1,11	1,64	3,60	5,60	8,81	11,62	12,40	14,69	15,07	16,00
		beide	1,13	2,40	4,45	6,38	9,32	10,86	12,14	13,53	13,86	13,67
	Ref-fzg_Projektion_Xenon (links: X3; rechts X4)	links	2,35	4,04	6,43	8,90	10,57	11,12	12,83	13,14	13,45	10,82
		rechts	1,54	3,59	5,54	8,46	11,38	13,59	14,21	16,94	19,36	21,64
		beide	2,12	3,83	6,07	8,66	11,04	12,56	13,52	15,25	16,68	17,10
	Ref-fzg_Multi-Projektion (links: L3; rechts L4)	links	1,34	2,57	4,42	6,63	8,92	10,45	11,96	13,47	13,93	9,18
		rechts	1,18	2,00	3,47	5,26	7,00	8,58	9,10	11,76	13,94	12,07
		beide	1,32	2,34	4,01	6,04	8,07	9,49	10,65	12,24	13,06	11,27
*Der Faktor wurde anhand des Quotienten aus der Beleuchtungsstärke bei spiegelnder und trockener Fahrbahn ermittelt												

Tabelle C.4: Vertikale Blendbeleuchtungsstärke (Messposition: mittig zwischen den Probanden in einer Höhe von 1,2 m, Messwiederholung: bei jedem Probanden-Team)

Nasse Fahrbahn					Trockene Fahrbahn				
Vertikale Blendbeleuchtungsstärke $E_v$ (lx)					Vertikale Blendbeleuchtungsstärke $E_v$ (lx)				
	Halogen	Xenon	LED	Modifizierter Xenon		Halogen	Xenon	LED	Modifizierter Xenon
<b>Mittelwert</b>	1,87	1,12	1,47	0,10	<b>Mittelwert</b>	0,11	0,08	0,12	0,06
<b>Median</b>	1,81	1,11	1,46	0,10	<b>Median</b>	0,11	0,08	0,12	0,06
<b>Standardabweichung</b>	0,15	0,04	0,06	0,00	<b>Standardabweichung</b>	0,01	0,01	0,00	0,00
<b>Anzahl Messwerte</b>	15	15	15	15	<b>Anzahl Messwerte</b>	7	7	7	7
<b>Blendsituation</b>					<b>Gesamt</b>				
Vertikale Blendbeleuchtungsstärke $E_v$ (lx)					Vertikale Blendbeleuchtungsstärke $E_v$ (lx)				
	Halogen	Xenon	LED	Modifizierter Xenon		Halogen	Xenon	LED	Modifizierter Xenon
<b>Mittelwert</b>	0,10	0,06	0,11	0,07	<b>Mittelwert</b>	0,08	0,06	0,10	0,05
<b>Median</b>	0,10	0,06	0,11	0,07	<b>Median</b>	0,08	0,06	0,10	0,05
<b>Standardabweichung</b>	0,01	0,01	0,01	0,00	<b>Standardabweichung</b>	0,01	0,00	0,00	0,01
<b>Anzahl Messwerte</b>	15	15	15	15	<b>Anzahl Messwerte</b>	7	7	7	7
<b>Direkt</b>					<b>Direkt</b>				
Vertikale Blendbeleuchtungsstärke $E_v$ (lx)					Vertikale Blendbeleuchtungsstärke $E_v$ (lx)				
	Halogen	Xenon	LED	Modifizierter Xenon		Halogen	Xenon	LED	Modifizierter Xenon
<b>Mittelwert</b>	1,77	1,07	1,38	0,04	<b>Mittelwert</b>	0,02	0,02	0,03	0,01
<b>Median</b>	1,74	1,05	1,38	0,05	<b>Median</b>	0,02	0,02	0,03	0,01
<b>Standardabweichung</b>	0,17	0,04	0,06	0,01	<b>Standardabweichung</b>	0,01	0,01	0,01	0,00
<b>Anzahl Messwerte</b>	15	15	15	15	<b>Anzahl Messwerte</b>	7	7	7	7
<b>Indirekt</b>					<b>Indirekt</b>				

Tabelle C.5: Randomisierter Versuchsablauf bei nasser und trockener Fahrbahndeckschicht

**Nasse Fahrbahn**

Scheinwerfersystem	Bezeichnung	Darbietung	Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III	Gruppe IV
Halogen	A	g/d/i	1	4	3	2
Xenon	B		2	1	4	3
LED	C		3	2	1	4
Xenon (blendfrei)	D		4	3	2	1

**Trockene Fahrbahn**

Scheinwerfersystem	Bezeichnung	Darbietung	Gruppe IV	Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
Halogen	A	g/d/i	1	4	3	2
Xenon	B		2	1	4	3
LED	C		3	2	1	4
Xenon (blendfrei)	D		4	3	2	1

Tabelle C.6: Messwerte der Goniophotometermessungen zu jedem Scheinwerfer (Messinstitut: IPeG, Leibniz Universität Hannover)

Typ	Bezeichnung	SW-Seite	Spannung (V)	Strom (A)	Lichtstrom (lm)	max. Beleuchtungsstärke (lx)	max. Lichtstärke (cd)
Halogen	H1	links	13,21	4,308	445	50,7	31700
	H2	rechts	13,21	4,298	442	43	26900
	H3	links	13,21	4,298	455	54,3	33900
	H4	rechts	13,21	4,307	458	44,2	27600
Xenon	X1	links	-	-	758	33	20900
	X2	rechts	13,20	3,226	805	44	27500
	X3	links	13,20	3,242	702	29,2	18300
	X4	rechts	13,20	3,182	878	61,3	38300
LED	L1	links	-	-	615	38,1	23800
	L2	rechts	13,20	1,925	628	42,4	26500
	L3	links	13,20	1,968	624	39,8	24900
	L4	rechts	13,20	1,968	617	39,4	24600

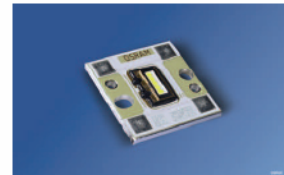
Tabelle C.7: Ermittelte Objektkontraste an der Kante des Sehobjekts in Abhängigkeit des Scheinwerfersystems und des Fahrbahnzustandes

		Ermittelte Objektkontraste $C_w$ an der zur Fahrbahn gerichteten Objektkante			
Fahrbahnzustand	Scheinwerfersystem	31m	46m	60m	80m
trocken	Halogen	0,24	0,41	0,14	0,16
	Xenon	0,20	0,18	0,05	0,01
	LED	0,08	0,28	0,24	0,12
nass	Halogen	0,42	0,90	0,40	0,42
	Xenon	0,14	1,30	0,88	0,43
	LED	0,08	0,47	0,47	0,33

DS10011

## OSRAM OSTAR Headlamp Pro Datasheet Version 2.1

### LE UW U1A5 01



OSRAM OSTAR Headlamp Pro is able to meet a wide range of requirements in terms of output and adaptability to ambient conditions. It offers a uniform light pattern, thermal stability and great brightness. The 20 x 20 mm high-flux LED is available with two to five chips.

#### Features:

- **Package:** compact lightsource in multi chip on board technology
- **Technology:** ThinGaN (UX:3)
- **Viewing angle at 50 % I<sub>v</sub>:** 120° (Lambertian Emitter)
- **Color:** C<sub>x</sub> = 0.32, C<sub>y</sub> = 0.33 acc. to CIE 1931 (ultra white)
- **ESD - withstand voltage:** up to 15 kV acc. to IEC 61000-4-2 (air discharge)
- **Corrosion Robustness:** Improved corrosion robustness

#### Applications

- Exterior Automotive Lighting
- Floodlight

Die OSRAM OSTAR Headlamp Pro erfüllt viele verschiedene Anforderungen in Bezug auf die Leistung und die Anpassungsfähigkeit an die Umgebungsbedingungen. Sie bietet ein homogenes Lichtbild, Temperaturstabilität und Helligkeit. Die 20 x 20 mm große Hochleistungs-LED gibt es mit zwei bis fünf Chips.

#### Besondere Merkmale:

- **Gehäusetyp:** Kompakte Lichtquelle mit Multi Chip Technologie
- **Technologie:** ThinGaN (UX:3)
- **Abstrahlwinkel bei 50 % I<sub>v</sub>:** 120° (Lambertscher Strahler)
- **Farbe:** C<sub>x</sub> = 0.32, C<sub>y</sub> = 0.33 nach CIE 1931 (ultra weiß)
- **ESD - Festigkeit:** bis 15 kV nach IEC 61000-4-2 (Luftentladung)
- **Korrosionsstabilität:** Verbesserte Korrosionsstabilität

#### Anwendungen

- Automobilbeleuchtung außen
- Flutlicht

Abbildung C.3: Datenblatt der High-Power-LED [OSRAM] zur Realisierung der Abblendlichtverteilung im Voll-LED Scheinwerfer des Leichtbau-Konzeptfahrzeuges InEco [Pan12]

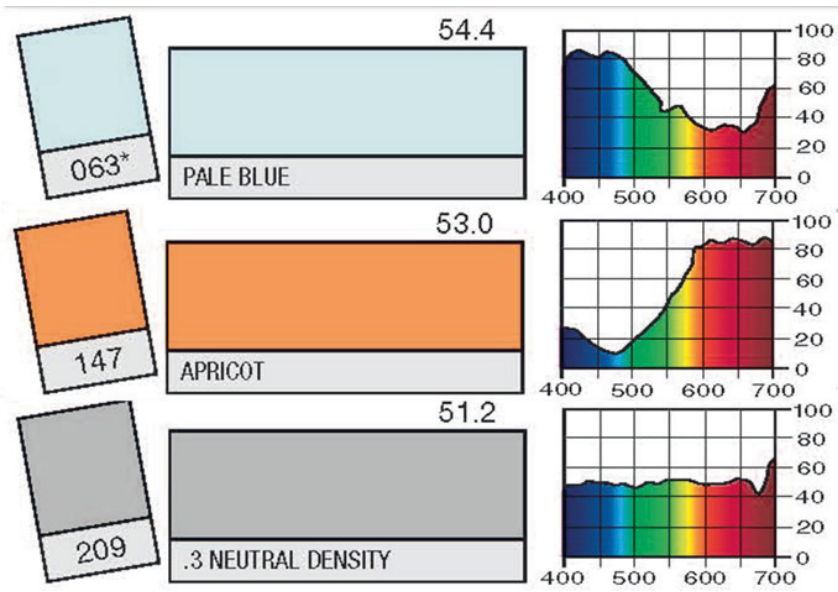


Abbildung C.4: Angaben zu den gewählten Farbfiltern: Bezeichnung, Transmissionsgrad und spektrale Verteilung ([LEE15] aus [Schz13])

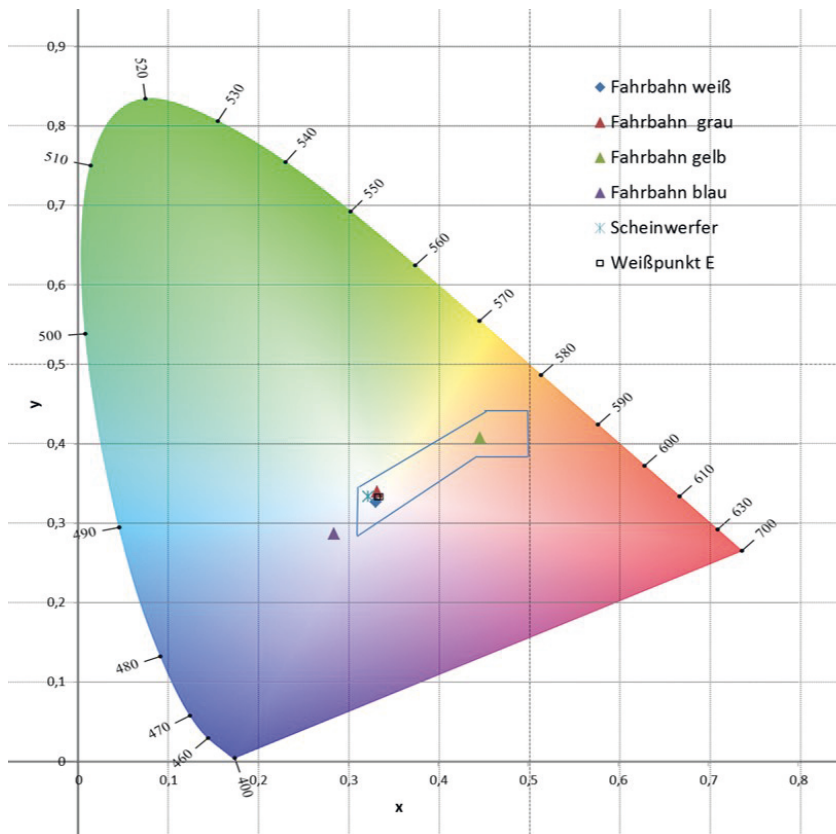


Abbildung C.5: Farbort in Abhängigkeit des eingesetzten Farbfilters (Messregion: Innerhalb der analysierten „Blendkeule“; vgl. [Schz13])

06.09.2013 – 07.09.2013

ID-Nr.		Uhrzeit	
Alter		Geschlecht	<input type="radio"/> w <input type="radio"/> m

**1. Wie häufig treten folgende Beschwerden/Sehprobleme auf?**

Beschwerden/Sehprobleme	immer	häufig	selten	nie
Blendempfindlich				
Lichtempfindlich				
Schnelles Ermüden				
Sehprobleme bei Dämmerung/Nacht				

**2. Nehmen Sie derzeit Medikamente ein oder leiden Sie an Erkrankungen, die die Sehschärfe oder das Hellempfinden beeinflussen?**

ja                       nein

**3. Vorhandene Sehhilfe (Kontaktlinse)**

ja                       nein

**4. Sehschärfenbestimmung**

$V_{\text{bin}}$  (photopisch):                       LCS:

**5. Test auf Farbsinnstörung**

Anzahl der Fehler:                        Farbsinnstörung  
 keine Auffälligkeiten

**6. Pupillenlichtreaktion**

spontan                       Auffälligkeiten  
 seitengleich

**7. Bemerkungen**

.....

.....

.....

Abbildung C.6: Fragebogen: Probandenstudie zur Analyse des Einflusses der Lichtfarbe auf den Fahrkomfort und die psychologische Blendung (vgl. [Schz13])

# D Anhang zu Kapitel 7

CAGE.xlsm

**C**omputer **A**ided **G**lare **E**valuation

automotive **iauv**  
engineering

Prüfbericht für: Prototyp

Bewertungsmethode		IAV	
Scheinwerfer	Typ: Reflexionsmodul Leuchtmittel: Halogen Anbauhöhe: 0,65 m Anbauabstand: 1,4 m Neigung: -1 ° Seite: Links		
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">                     B50L                      I<sub>B50L</sub> = 200,04 cd                      OK                 </div>		
Straße	Fahrbahnbreite: 3,5 m Deckschicht: Asphalt nass		
Simulationsparameter (aus LucidShape)	Länge: 0 m bis 150 m Breite: -20 m bis 20 m x-Inkrement: 0,05 m y-Inkrement: 0,05 m		

	Augenposition [m]		Reflexpunkt [m]	Blendwinkel [°]	Beleuchtungsstärke [lx]			Schleierleuchtdichte [cd/m²]		
	y	2,025			y	0,711	direkt	indirekt	gesamt	Carraro
	x	x								
1	100	35,14	1,16	0,025	0,11	0,135	2,53	1,03	0,92	
2	95	33,38	1,22	0,027	0,143	0,17	2,82	1,19	1,05	
3	90	31,62	1,29	0,03	0,187	0,217	3,15	1,37	1,2	
4	85	29,86	1,36	0,033	0,244	0,277	3,54	1,59	1,38	
5	80	28,11	1,45	0,036	0,32	0,356	3,94	1,82	1,56	
6	75	26,35	1,55	0,04	0,413	0,453	4,35	2,06	1,73	
7	70	24,59	1,66	0,045	0,532	0,577	4,8	2,32	1,93	
8	65	22,84	1,78	0,051	0,687	0,738	5,3	2,61	2,14	
9	60	21,08	1,93	0,058	0,886	0,944	5,79	2,89	2,33	
10	55	19,32	2,11	0,067	1,117	1,184	6,18	3,09	2,45	
11	50	17,57	2,32	0,079	1,38	1,459	6,49	3,21	2,49	
12	45	15,81	2,58	0,095	1,731	1,826	6,81	3,32	2,52	
13	40	14,05	2,9	0,116	2,197	2,313	7,12	3,4	2,53	
14	35	12,3	3,31	0,146	2,538	2,684	6,9	3,11	2,25	
15	30	10,54	3,86	0,189	2,774	2,963	6,33	2,61	1,83	
16	25	8,78	4,63	0,247	3,103	3,35	5,73	2,12	1,44	
17	20	7,03	5,78	0,326	3,226	3,552	4,77	1,51	0,98	
18	15	5,27	7,69	0,541	4,171	4,712	4,34	1,2	0,73	
19	10	3,51	11,45	1,146	1,617	2,763	2,01	0,34	0,19	
20	5	1,76	22,05	4,459	0,625	5,084	1,58	0,19	0,1	

**Anmerkungen:**  
Test zur Veranschaulichung der Inhalte des Prüfberichts

Abbildung D.1: Seite 1 des Prüfberichts aus CAGE





# Veröffentlichungen, Lehrveranstaltungen und betreute Arbeiten

## Patente

MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; BUTENUTH, M.; SCHEIBE, T.: *Verfahren zum Testen und Wiedergeben von dynamischen Lichtverteilungen*, erteiltes Patent, DE 10 2013 021 958 B4 2016.02.04.

MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; BOGDANOW, S.: *Verfahren zur Bewertung von Scheinwerfern*, erteiltes Patent, DE 10 2013 011 975 B4 2015.03.05.

## Veröffentlichungen:

### 2016

KLEINERT, B.; MARUTZKY, M.; VÖLKER, S.; SCHIERZ, Ch.: „Impact of today’s automotive headlamps in interaction with road conditions on disability and discomfort glare“ Manuskript in Vorbereitung In: *Lighting Research & Technology (LR&T)*.

MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; BOGDANOW, S.: „Neue Methode zur Simulation von Volumestreueung - Anwendungsfall: Nebel und Regen im Straßenverkehr“ Vortrag, In: *LICHT 2016*, Karlsruhe, 2016.

WERNER, Ch.; KLEINERT, B.; MARUTZKY, M.; BOGDANOW, S.: „Simulative Bewertung der indirekten Blendbelastung von Kfz-Scheinwerfern“ Vortrag, In: *LICHT 2016*, Karlsruhe, 2016.

MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; BOGDANOW, S.: „Method for the Treatment of Wavelength-Dependent Volume Scattering in a Homogeneous, Absorptive Medium“ Vortrag, In: *4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance*, CIE, Prag, 2016.

KLEINERT, B.; WERNER, Ch.; MARUTZKY, M.; BOGDANOW, S.: „APB - next generation of glare-free headlamp systems for wet roads“ Poster, In: *VISION Conference*, Versailles, 2016.

### 2015

KLEINERT, B.; WERNER, Ch.; BOGDANOW, S.; MARUTZKY, M.; SCHIERZ, Ch.: „CAGE – Computer Aided Glare Evaluation of Automotive Headlamps“ Poster, In: *11th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2015 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2015.

WERNER, Ch.; KLEINERT, B.; MARUTZKY, M.; BOGDANOW, S.; SCHIERZ, Ch.: „Blendfreie dynamische Abblendlichtverteilung für Kfz-Scheinwerfer – Anforderungen und Validierung“ Vortrag, In: *Luxjunior 2015*, Dörnfeld, 2015.

SCHWANZ, B.; MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; BOGDANOW, S.: „Messsystemanalyse eines Leuchtdichtekamera-basierten Scheinwerferprüfstands“ Vortrag, In: *Luxjunior 2015*, Dörnfeld, 2015.

**2014**

KLEINERT, B.; BOGDANOW, S.; WERNER, Ch.; SCHIERZ, Ch.: „Everybody is talking about ADB – but what about APB?“ Poster, In: *VISION Conference*, Versailles, 2014.

MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; BOGDANOW, S.: „Analysis of cost efficient methods for dynamic head lamp evaluations“ Poster, In: *VISION Conference*, Versailles, 2014.

KLEINERT, B.; MARUTZKY, M.; BOGDANOW, S.; SCHIERZ, Ch.: „Reduzierung der Adaptationsleuchtdichte bei nasser Fahrbahn – Mehr Sicherheit oder erhöhte Blendung?“ Vortrag, In: *LICHT 2014*, Den Haag, 2014.

AMIRASLANOW, P.; BOGDANOW, S.; KLEINERT, B.; MARUTZKY, M.: „IAV I<sup>3</sup>-Lighting: Entwicklungswerkzeug für Innovative Intelligente Innenraumbeleuchtung“ Vortrag, In: *LICHT 2014*, Den Haag, 2014.

MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; BOGDANOW, S.: „Genauigkeit und Effizienz verschiedener Messverfahren zur Scheinwerferbewertung“ Poster, In: *LICHT 2014*, Den Haag, 2014.

MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; HEINRICHS, A.; SCHWANZ, B.; BOGDANOW, S.: „Accuracy, Reproducibility and Repeatability of Fast Methods for Head Lamp Evaluation“ In: *Proceedings of CIE Expert Symposium on Measurement Uncertainties in Photometry and Radiometry for Industry*, CIE x040:2014, Wien, 2014.

MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; BOGDANOW, S.: „Perceptions under real like conditions and measurements in a reference ambience“ In: *IAL - Intelligent Automotive Lighting*, Frankfurt, 2014.

**2013**

KLEINERT, B.; MARUTZKY, M.; SEER, M.; BOGDANOW, S.; SCHIERZ, Ch.: „The glare ratio – an evaluation under repeatable conditions for different dry and wet road surfaces“ Poster, In: *10th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2013 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2013.

MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; SEER, M.; BOGDANOW, S.: „Fast evaluation of dynamic headlamps: Application of contrast-based criteria for Recognisability to the method of geometrical reduction“ In: *10th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2013 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2013.

KLEINERT, B.; MARUTZKY, M.; SEER, M.; BOGDANOW, S.; SCHIERZ, Ch.: „Blendungsbewertung von Kfz-Scheinwerfern – Was wird messtechnisch erfasst und was nicht?“ Vortrag, In: *Luxjunior 2013*, Dörnfeld, 2013.

MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; SEER, M.; BOGDANOW, S.: „Applicability of contrast-based perceptibility criterions on the method of geometrical reduction“ Postervortrag, In: *Luxjunior 2013*, Dörnfeld, 2013.

KLEINERT, B.; MARUTZKY, M.; BOGDANOW, S.; SCHIERZ, Ch.: „Multi-Functional Measurement Setup for Evaluating the Angle-Resolved Appearance of Automotive Luminaires“ Poster, In: *Lux Europa*, Krakau, 2013.

BOGDANOW, S.; MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; SCHULZE, K.: „Testen am gesamten Lichtsystem“ In: *ATZ 115. Jahrgang (2013), Nr. 11/2013*.

AMIRASLANOW, P.; BOGDANOW, S.; MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.: „Wahrnehmung und Bewertung innovativer Innenraumbeleuchtung“ In: *ATZ* 115. Jahrgang (2013), Nr. 9/2013.

MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; BOGDANOW, S.: „A new method for headlamp evaluation“ In: *IAL - Intelligent Automotive Lighting*, Wiesbaden, 2013.

## 2012

SCHONLAU, B.; VOIGT, U.; MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; BOGDANOW, S.: „Testen von Lichtassistenzsystemen unter wiederholbaren Umgebungsbedingungen“ In: *28. VDI/VW Gemeinschaftstagung*, Wolfsburg, 2012.

BOGDANOW, S.; MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.: „Fast assessment-method for dynamic head-lighting systems considering indirect glaring effects“ Poster, In: *VISION Conference*, Versailles, 2012.

BOGDANOW, S.; KLEINERT, B.; MARUTZKY, M.: „Bewertung der Abblendlicht-Fernfeldverteilung in einem geschlossenen Raum durch geometrische Verkürzung“ Postervortrag, In: *LICHT 2012*, Berlin, 2012.

BOGDANOW, S.; MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.: „Bewertung der Lichtverteilung im Fern- und Nahfeld“ In: *ATZ* 114. Jahrgang (2012), Nr. 06/2012.

BOGDANOW, S.; MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; SCHWANZ, B.: „A special environment for significant testing and evaluation of vehicle lighting“ In: *IAL - Intelligent Automotive Lighting*, Stuttgart, 2012.

## 2011

MARUTZKY, M.; KLEINERT, B.; BOGDANOW, S.: „The Trabant nT and innovative vehicle lighting performance tests“ In: *9th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2011 - Proceedings of the Conference*, Hrsg. von Khahn, T.Q. Darmstädter Lichttechnik, 2011.

## Lehrveranstaltungen

KLEINERT, B.: *Lichttechnik im Automobil*, Vorlesung im Rahmen der Praxistage, Wintersemester 2015, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 2015

KLEINERT, B.: *Lichttechnik im Automobil*, Vorlesung im Rahmen des Vorlesungszyklus „Lichttechnik“, Sommersemester 2014, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 2014

KLEINERT, B.: *Automobile Lichttechnik - Gute Sichtverhältnisse ohne zu blenden*, Vorlesung im Rahmen der Praxistage, Sommersemester 2013, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 2013

KLEINERT, B.: *Der Entwicklungsprozess automobiler Lichttechnik - Von der ersten Idee bis zum fertigen Produkt*, Vorlesung im Rahmen der Praxistage, Sommersemester 2012, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 2012.

## Betreute Arbeiten

HAARS, E.: *Entwicklung und Validierung eines Ausrichtungskonzeptes für Automobilscheinwerfer zur leuchtdichtemesstechnischen Bewertung der Lichtverteilung*, Bachelorarbeit, Fachhochschule Münster, 2016.

---

WERNER, Ch.: *Blendfreie dynamische Abblendlichtverteilung für Kfz-Scheinwerfer - Anforderungen und Validierung*, Projektbericht, 1. Studiensemester im Masterstudiengang Applied Research in Engineering Sciences (M-APR), Technische Hochschule Nürnberg, 2015.

GÄRTNER, A.: *Pilotstudie zur Bewertung der durch verschiedene Kfz-Scheinwerfer verursachten Blendung*, Bachelorarbeit, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 2015.

WERNER, Ch.: *Computergestützte Blendungsbewertung bei automobilen Frontscheinwerfern*, Bachelorarbeit, Technische Hochschule Nürnberg, 2015.

PETERSMANN, T.: *Dekompositionierung eines Voll-LED Scheinwerfers und Inbetriebnahme der Einzelfunktionen*, Bachelorarbeit, Leibniz Universität Hannover, 2015.

HEINRICHS, A.: *Prototypischer Aufbau eines modularen Scheinwerferprüfstandes*, Masterarbeit, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Standort Wolfenbüttel, 2014.

WERNER, Ch.: *Bericht über das praktische Studiensemester*, Praxisbericht, Technische Hochschule Nürnberg, 2014.

SCHWANZ, B.: *Spektrale Untersuchungen zur Blendungsbewertung automobiler Scheinwerfer nach TC4-45*, Masterarbeit, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 2013.

TÖPFER, R.: *Untersuchungen zur Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern nach TC4-45 in einer Referenzumgebung*, Masterarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 2013.

BAIER, D.: *Konzeptionelle Weiterentwicklung eines Lichtprüfstandes zur Bewertung von Scheinwerfern*, Bachelorarbeit, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Standort Wolfsburg, 2013.

SEER, M.: *Ermittlung der Reflexionseigenschaften von Straßenoberflächen zur späteren Blendungsbewertung (nach TC4-45)*, Bachelorarbeit, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 2013.

---

