

Untersuchungen zur Eigenblendung des Fahrzeugführers durch Streulicht bei Nebel und Schnee sowie durch retroreflektierende Verkehrszeichen

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der
Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

M. Sc. Peter Schreier
geboren am 26.07.1984 in Bamberg / Deutschland

Tag der Einreichung: 28.07.15
Tag der Verteidigung: 12.09.16

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh
3. Gutachter: Dr.-Ing. Tim Gocke

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000821

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit in der Abteilung Lichtsystem bei der BMW Group in München entstanden. Die wissenschaftliche Betreuung erfolgte durch das Fachgebiet Lichttechnik an der Technischen Universität Ilmenau unter der Leitung von Prof. Christoph Schierz.

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die mich auf dem Weg zur Erlangung des Dokortitels fachlich und persönlich unterstützt, mir durch konstruktive Kritik Denkanstöße gegeben oder zur Inspiration und Motivation beigetragen haben.

Besonders möchte ich mich bei meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz, bedanken, der mit seiner fachlichen Kompetenz und mit seinem persönlichem Engagement stets zu richtungsweisenden Ideen motiviert hat und in vielen Diskussionen mit zur Gestaltung des Inhalts und der Methodik der Arbeit beigetragen hat.

Für die Übernahme des Koreferats, die kritische Durchsicht der Arbeit sowie die Ratschläge und Hinweise möchte ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh bedanken.

Ebenso möchte ich meinem Betreuer Dr.-Ing. Tim Gocke für die offene, konstruktive und engagierte Betreuung und seine Unterstützung während der gesamten Bearbeitungszeit danken.

Weiterhin gilt mein Dank dem Kollegium und meinen Vorgesetzten, die mich bei der Umsetzung meiner Ideen unterstützt und für hervorragende Rahmenbedingungen zur Bearbeitung meines Themas beigetragen haben. Der Dank gilt besonders Jörg Kälble, Thomas Hausmann und Christian Amann.

Abschließend möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern bedanken, die mir meine eingeschlagene Laufbahn ermöglicht haben. Ebenso bedanke ich mich bei meiner Frau Susanne, auf deren Rückhalt und Unterstützung ich mich stets verlassen konnte.

München, Oktober 2016

Peter Schreier

Kurzzusammenfassung

Zur Vermeidung der Eigenblendung des Fahrzeugführers gibt es aktuell keine geeigneten Vorgaben in Form von objektiven Grenzwerten und Bewertungswerkzeugen. Ziel der Arbeit ist es, diese für die Eigenblendung durch Streulicht bei Nebel und Schnee bei Fahrten mit Abblendlicht sowie für die Eigenblendung durch retroreflektierende Verkehrszeichen bei Fahrten mit Fernlicht abzuleiten.

Durch eine Umfrage wurden grundsätzliche Thesen, wie das Auftreten von Blendung an Verkehrszeichen, belegt und die Motivation zur Arbeit nochmals objektiv begründet.

Der Einfluss von Streulicht bei Nebel wurde durch Leuchtdichteaufnahmen aus Fahrerperspektive in realem Umfeld dokumentiert. Aus einer Messreihe am Goniofotometer werden objektive Kennwerte zur Beschreibung des Streulichtbereichs abgeleitet und zur Bewertung konstruktiver Maßnahmen zur Streulichtminimierung herangezogen.

In Probandenstudien zum Störeinfluss von Streulicht bei Nebel und Schnee wurde der Einfluss verschiedener Faktoren, wie z. B. der Abstrahlwinkel, die Intensität und die Farbtemperatur auf die psychologische Blendung ermittelt. Dafür wurde ein Versuchsstand zur Nachbildung von Nebel aufgebaut und eine virtuelle Schneeumgebung entwickelt. Bei Nebel konnten der Objektkontrast, bei Schnee die Anzahl der sichtbaren Schneeflocken als Haupteinflussfaktor auf die Störwirkung in einer Korrelationsanalyse bestätigt werden.

Vorgaben für den Streulichtbereich werden anhand einer Messreihe am Goniofotometer und der Ergebnisse aus den Probandenstudien abgeleitet. Außerdem werden Bewertungswerkzeuge für den Nachtfahrsimulator vorgestellt, die eine subjektive Beurteilung unter konstanten, reproduzierbaren Bedingungen ermöglichen.

Zur Untersuchung der Eigenblendung durch retroreflektierende Verkehrszeichen wurde ein Versuchsstand konzipiert, der die Durchführung von Probandenstudien zur Ermittlung der psychologischen Störschwellen ermöglichte. Grenzwerte für die psychologische Blendung wurden in Abhängigkeit der Schildgröße für seitliche Verkehrszeichen und Überkopf-Schilder ermittelt. Die zulässigen Leuchtdichten wurden für weiße und gelbe Schilder getrennt untersucht.

Vorgaben zur Reduzierung der Eigenblendung werden aus den Ergebnissen im Versuch abgeleitet. Weiterhin wird ein Ansatz aus präventiven und reaktiven Maßnahmen zur Vermeidung von Eigenblendung beim Fahren mit Fernlicht vorgestellt.

Abstract

To avoid self glare of the driver, there are currently no appropriate specifications regarding objective threshold values and assessment tools. This thesis seeks to derive them for self glare caused by stray light in fog or snow driving with low beam and for self glare caused by retroreflection on traffic signs driving with high beam.

A survey verified fundamental theories, such as the occurrence of glare on traffic signs, and once more showed the motivation for this thesis objectively.

The influence of stray light in fog was documented by luminance measurements from the driver's perspective in real environment. From a series of measurements on a goniophotometer objective and representative parameters for describing the stray light area were derived and used to assess design measures to minimize stray light.

In volunteer studies on disturbance influence of stray light in fog and snow the influence of various factors such as the emission angle, intensity and colour temperature was determined on discomfort glare. Therefore, a setup for simulating fog was built and a virtual snow environment was developed. Whereas in fog the object contrast was confirmed as the main factor, in snow it was the number of visible snowflakes that has proved to be the main influencing factor on the interference effect in a correlation analysis.

Requirements for the stray light field are derived using a series of measurements on a goniophotometer and the results of the studies on volunteers. In addition, assessment tools are presented for a night driving simulator that enable a subjective judgement under constant, reproducible conditions.

To investigate the glare by retro-reflective traffic signs, an experimental setup was designed which enables the implementation of studies on volunteers to determine the psychological interference thresholds. Limits for discomfort glare were determined as a function of the lateral plate size for traffic signs and overhead signs. The permissible luminance values were examined separately for white and yellow signs.

Commitments to reduce the self glare can be derived from the results of the experiment. Furthermore, an approach of preventive and reactive measures to avoid self glare while driving with high beam is presented.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Einordnung des Themas	1
1.2	Problem- und Aufgabenstellung	3
1.3	Struktur der Arbeit	4
2	Grundlagen und Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext	5
2.1	Begriffsdefinition Eigenblendung	5
2.2	Fahrsituationen mit Eigenblendung	6
2.2.1	Fahrten bei Nebel	6
2.2.2	Fahrten bei Schnee	8
2.2.3	Fahrten mit Fernlicht oder blendfreien Fernlichtassistenten	9
2.3	Begriffsdefinition Streulicht	13
2.4	Funktion und Umsetzung relevanter Lichtverteilungen	14
2.4.1	Umsetzungsmöglichkeiten von Lichtfunktionen für Nebel und Schnee	16
2.4.2	Umsetzungsmöglichkeiten von blendfreien Fernlichtsystemen	17
2.5	Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext	18
2.5.1	Allgemeine Vorschriften und Studien zur Bewertung von Scheinwerfern	18
2.5.2	Vorschriften und Studien zum Thema Bewertung und Blendung durch Streulicht	20
2.5.3	Studien zum Thema Blendwirkung verschiedener Lichtquellen	23
2.5.4	Studien zum Thema Retroreflexion und Blendung durch Verkehrsschilder	25
3	Präzisierte Darstellung der Vorgehensweise	31
4	Umfrage zur Bewertung von Scheinwerfersystemen und zur Eigenblendung	35
4.1	Ziele und Inhalte der Umfrage	35
4.2	Rahmenbedingungen und Teilnehmerkreis	35
4.3	Ergebnisse	36
4.3.1	Positive und negative Erfahrungen mit Scheinwerfersystemen	36
4.3.2	Nutzungsverhalten und Zusatznutzen von Nebelscheinwerfern	37
4.3.3	Eigenblendung bei Nebel oder Schnee	37
4.3.4	Bewertung blendfreier Fernlichtassistenten	38
4.4	Diskussion der Ergebnisse	38

5	Untersuchungen zur Bewertung von Streulicht bei Nebel	41
5.1	Zielstellung und Methodenübersicht	41
5.2	Messtechnische Erfassung und Auswertung von Nebelsituationen	42
5.2.1	Methode	42
5.2.2	Ergebnisse	43
5.2.3	Diskussion der Ergebnisse	45
5.3	Messtechnische Bewertung einer Reihe von Abblendlichtverteilungen am Gonio- fotometer	47
5.3.1	Methode	47
5.3.2	Ergebnisse	48
5.3.3	Diskussion der Ergebnisse	53
5.4	Probandenstudie zum Thema Auswirkungen von Streulicht bei Nebel	56
5.4.1	Ziel des Versuchs	56
5.4.2	Versuchsaufbau	56
5.4.3	Versuchsablauf und Rahmenbedingungen	61
5.4.4	Versuchsergebnisse	63
5.4.5	Diskussion der Ergebnisse	69
6	Untersuchungen zur Bewertung von Streulicht bei Schnee	73
6.1	Zielstellung und Methodenübersicht	73
6.2	Probandenstudie zum Thema Auswirkungen von Streulicht bei Schnee	73
6.2.1	Ziel des Versuchs	73
6.2.2	Versuchsaufbau	74
6.2.3	Versuchsablauf und Rahmenbedingungen	80
6.2.4	Versuchsergebnisse	82
6.2.5	Diskussion der Ergebnisse	86
6.3	Korrelationsanalyse	89
7	Untersuchungen zur Eigenblendung durch retroreflektierende Verkehrszeichen	95
7.1	Zielstellung und Methodenübersicht	95
7.2	Probandenstudien zum Thema Schilderblendung	95
7.2.1	Ziel der Versuche	95
7.2.2	Versuchsaufbau	96
7.2.3	Versuchsablauf und Rahmenbedingungen	100
7.2.4	Versuchsergebnisse	102
7.2.5	Diskussion der Ergebnisse	107
8	Ableitung von Anforderungen und Bewertungsmethoden zur Reduzierung der Eigen- blendung	117
8.1	Anforderungen an die Lichtverteilung im Streulichtbereich	117
8.1.1	Diskussion von bereits vorhandenen Grenzwerten im Streulichtbereich	117

8.1.2	Definition des relevanten Winkelbereichs bei der Streulichtbewertung . . .	118
8.1.3	Vorgaben anhand der messtechnischen Scheinwerferanalyse am Goniofotometer	118
8.2	Bewertung von Streulicht im Nachtfahrsimulator	122
8.2.1	Streulichtkuppel	122
8.2.2	Schneeumgebung	123
8.3	Anforderungen zur Reduzierung der Eigenblendung an Verkehrszeichen	125
9	Schlussdiskussion und Ausblick	129
9.1	Bewertung der Ergebnisse und Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext .	129
9.1.1	Allgemeiner Teil	129
9.1.2	Eigenblendung durch Streulicht bei Nebel und Schnee	130
9.1.3	Eigenblendung durch retroreflektierende Schilder	133
9.2	Ausblick	135
	Literaturverzeichnis	139
	Abbildungsverzeichnis	147
	Tabellenverzeichnis	151
	Anhang	152
A	Thesen zur Doktorarbeit	153
B	Erklärung	155
C	Datenblätter der eingesetzten Messtechnik	157
D	Fragebogen zur Bewertung von Scheinwerfersystemen	163
E	Bewertung von Streulicht bei Nebel	167
E.1	Übersicht der Abblendlichtverteilungen im Streulichtbereich	167
E.2	Probandenstudie zur Untersuchung von Streulicht bei Nebel	169
E.3	Ermittlung der optimalen Rastergröße bei der Messung am Goniofotometer zur Darstellung im Fahrsimulator	174
F	Bewertung von Streulicht bei Schnee	175
G	Bewertung der Eigenblendung durch Retroreflexion	181
G.1	Leuchtdichte der Verkehrszeichen im Versuch	181
G.2	Leuchtdichte - Probandenbewertung - Diagramme	184
G.3	Schwellenleuchtdichte für Verkehrszeichen unterschiedlicher Größe	185
G.4	Datenblatt Reflexmaterial 3M	187

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol/Abk.	Benennung	Einheit
α	Beobachtungswinkel nach DIN 67520	°
β	Anleuchtwinkel nach DIN 67520	°
β_1	Vertikalkomponente Anleuchtwinkel nach DIN 67520	°
β_2	Horizontalkomponente Anleuchtwinkel nach DIN 67520	°
ε	Verdrehungswinkel nach DIN 67520	°
ϕ	Objektgröße	'
Φ	Lichtstrom	lm
$\Phi_{\text{Streulicht,Absolut}}$	Absoluter Streulichtstrom	lm
$\Phi_{\text{Streulicht,Relativ}}$	Relativer Streulichtstrom	%
$\Phi_{\text{Gesamt,Absolut}}$	Absoluter Gesamtlichtstrom	lm
ρ'	Schwellenreflexionsgrad	%
σ	Schwächungskoeffizient homogener getrüebter Medien	mm ⁻¹
A	Flächenbezeichnung	m ²
a	Wegstrecke beim Durchlaufen eines Mediums	mm
a	Abstand zwischen Beobachter und Verkehrsschild	m
B	Mittelwert der Probandenbewertung	
$C(x, y, z)$	Zentrum der Streulichtkuppel	
C_W	Weberkontrast	
d	äquivalenter Korndurchmesser	mm
d	Tropfendurchmesser von Nebeltropfen	mm
E	Beleuchtungsstärke	lx
E_{\perp}	Senkrecht auftreffende Beleuchtungsstärke	lx
E_A	Am Auge auftreffende Beleuchtungsstärke	lx
F	Umrechnungsfaktor für Blendwerte	lx
F	Prüfgröße für die einfaktorielle Varianzanalyse	
$G_{\text{Hopkinson}}$	Blendungsfaktor nach Hopkinson	

Fortsetzung auf der nächsten Seite ...

Symbol/Abk.	Benennung	Einheit
H	Horizontaler Winkel der Lichtstärkeverteilung	°
I_{Bl}	maximal zulässige Lichtstärke für Verkehrszeichen	cd
\bar{K}	Mittlerer Wert einer Kennzahl K	
K_{MAX}	Höchster Wert einer Kennzahl K	
K_{MIN}	Niedrigster Wert einer Kennzahl K	
L	Leuchtdichte	cd m ⁻²
L'	Schwellenleuchtdichte	cd m ⁻²
L_A	Adaptationsleuchtdichte	cd m ⁻²
L_B	Leuchtdichte der Blendlichtquelle	cd m ⁻²
L_{Bl}	maximal zulässige Leuchtdichte für Verkehrszeichen aus Versuch	cd m ⁻²
$L_{Bl,SW}$	maximal zulässige Leuchtdichte für Verkehrszeichen für reale Scheinwerfer	cd m ⁻²
L_S	Schwellenleuchtdichte	cd m ⁻²
L_U	Umfeldleuchtdichte	cd m ⁻²
L_{VKZ}	Verkehrszeichenleuchtdichte	cd m ⁻²
Q	Raumwinkel eines Objekts	sr
R^2	Bestimmtheitsmaß nach Pearson	
R_A	spezifischer Mindestrückstrahlwert	cd m ⁻² lx ⁻¹
S	Spannweite	
V	Vertikaler Winkel der Lichtstärkeverteilung	°
V_λ	Spektrale Hellempfindlichkeit des Menschen (2 Grad Gesichtsfeld)	
X	Strahlungsgröße	
<hr/>		
AFS	Adaptive Frontbeleuchtungssysteme	
AN	Abkühlungsnebel	
Bj.	Baujahr	
BFFLA	Blendfreier Fernlichtassistent	
CMVSS	Canadian Motor Vehicle Safety Standard	
CIE	frz. Commission Internationale de l'Éclairage (dt. Internationale Beleuchtungskommission)	
ECE	Economic Commission for Europe	
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard	

Fortsetzung auf der nächsten Seite ...

Symbol/Abk.	Benennung	Einheit
HDG	Hell-Dunkel-Grenze	
HID	Hochdruckentladungslampen	
HV	horizontaler und vertikaler Abstrahlwinkel von 0°	
LED	Leuchtdiode (engl. light emitting diode)	
LV	Lichtstärkeverteilung	
LVK	Lichtstärkeverteilungskörper	
MAX	Maximalwert	
MW	Mittelwert	
MN	Mischungsnebel	
Q95	95% Quantil	
spV	skotopisch-photopisches Verhältnis	
RAL	Richtlinien für die Anlage von Landstraßen	
SSA	specific surface area (Verhältnis aus Schneekornoberfläche und Volumen)	
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe	
VN	Verdunstungsnebel	
VwV-StVO	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs- ordnung in Deutschland	

1 Einführung

1.1 Einordnung des Themas

Moderne Scheinwerfersysteme realisieren heute eine Vielzahl an sicherheitsrelevanten Lichtfunktionen, wie z. B. das Abblendlicht, das Fernlicht oder adaptive Lichtfunktionen. Außerdem setzen viele Automobilhersteller die Scheinwerfer als Markenzeichen und Wiedererkennungsmerkmal ein, so dass auch ein attraktives Erscheinungsbild neben funktionalen Aspekten einen hohen Stellenwert besitzt. Aus den Ansprüchen an Sicherheit und Ästhetik entstehen jedoch häufig gegensätzliche Zielkonflikte, die sich im Entwicklungsprozess bemerkbar machen. Zudem existieren auch aus rein funktionaler Sicht für ein Scheinwerfersystem häufig konkurrierende Ziele. Zum einen wird eine optimale Ausleuchtung der Fahrbahn in allen Fahrsituationen angestrebt, zum anderen sollen störende Einflüsse auf den Fahrzeugführer und den entgegenkommenden Verkehr, z. B. durch Blendung, so gering wie möglich gehalten werden. Ein entscheidender Bestandteil der Anforderungen an ein Scheinwerfersystem, nämlich die Vermeidung von Eigenblendung des Fahrzeugführers, wird jedoch oft nicht ausreichend berücksichtigt.

Für eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Scheinwerfersysteme ist es erforderlich, wirkungsvolle Bewertungssysteme zu schaffen, die neben Reichweite, Fahrbahnausleuchtung und Effizienz auch die Eigenblendung des Fahrzeugführers berücksichtigen. Die Bewertung muss dabei einerseits robust und objektiv sein, aber gleichzeitig die Wahrnehmung der Fahrzeugführer, also deren subjektive Empfindung, widerspiegeln. Die Bewertung von Reichweite, Fahrbahnausleuchtung und Blendung des Gegenverkehrs wurden bereits in einer Reihe von Untersuchungen ausführlich beschrieben und objektiviert (vgl. [CIE10], [Kie12], [Dam95]). Das Risiko der Eigenblendung des Fahrzeugführers hingegen wird häufig nur unzureichend, rein subjektiv oder überhaupt nicht bewertet. Es fehlen hier geeignete Kriterien, um die Eigenblendung bereits in der frühen Entwicklungsphase von Scheinwerfersystemen aufzuzeigen und gegebenenfalls reduzieren zu können.

Vor diesem Hintergrund sollen im Rahmen dieser Arbeit gerade die negativen Einflüsse von Scheinwerfersystemen untersucht werden, welche Eigenblendung hervorrufen können. Daher sollen vorwiegend die Fahrsituationen und Lichtfunktionen, welche ein besonders hohes Eigenblendungsrisiko mit sich bringen, betrachtet werden. Speziell wird der störende Einfluss auf den Fahrzeugführer untersucht, welcher auf die zwei im Folgenden beschriebenen Ursachen zurückzuführen ist:

- Eigenblendung/Kontrastreduzierung aufgrund von sekundärem Streulicht bei den Witterungsbedingungen Nebel und Schnee (vgl. Abb. 1.1 links).
- Eigenblendung aufgrund starker Retroreflexion an Schildern bei Fernlichtbetrieb bzw. bei der Nutzung blendfreier Fernlichtassistenten (BFFLA) (vgl. Abb. 1.1 rechts).

Eigenblendung bei Nebel und Schnee entsteht aufgrund von Lichtstreuung und Reflexion an Partikeln (Wassertropfen oder Eiskristallen) in der Luft (vgl. Abb. 1.1 links). Streulicht, welches vom Scheinwerfersystem oberhalb des Horizonts abgestrahlt wird, erzeugt bei Nebel eine Aufhellung im Bereich des Fahrersichtfeldes. Die dadurch erzeugten (Streu-)Leuchtdichten können den Fahrer entweder direkt blenden, den Adaptionszustand ungünstig verändern oder zu einer Kontrastreduzierung führen. Zudem führt Nebel ohnehin zu einer Abnahme der Sichtweite und einer Reduzierung der Objektkontraste. Die Überlagerung dieser Effekte bewirken eine starke Einschränkung der Sichtbedingungen [Sch08]. Reflektiertes Streulicht an Schneeflocken wiederum macht diese für den Fahrzeugführer sichtbar. Das bedeutet, dass sich eine Vielzahl sichtbarer Objekte mit der eigentlichen Umgebung überlagern. Dies lenkt den Fahrzeugführer ab und kann zu einer eingeschränkten Objekterkennung und Aufmerksamkeit führen.

Eigenblendung an retroreflektierenden Schildern tritt vorwiegend bei der Nutzung von Fernlicht auf (vgl. Abb. 1.1 rechts). Durch den vermehrten Einsatz von BFFLAs wird die Einschaltdauer des Fernlichts deutlich erhöht [Aus13], was den Fahrer durch eine bessere Fernsicht unterstützt. Allerdings erhöht dies auch die Wahrscheinlichkeit, dass das Fernlicht auf retroreflektierende Schilder gerichtet wird und somit häufiger zu Eigenblendung führen kann.

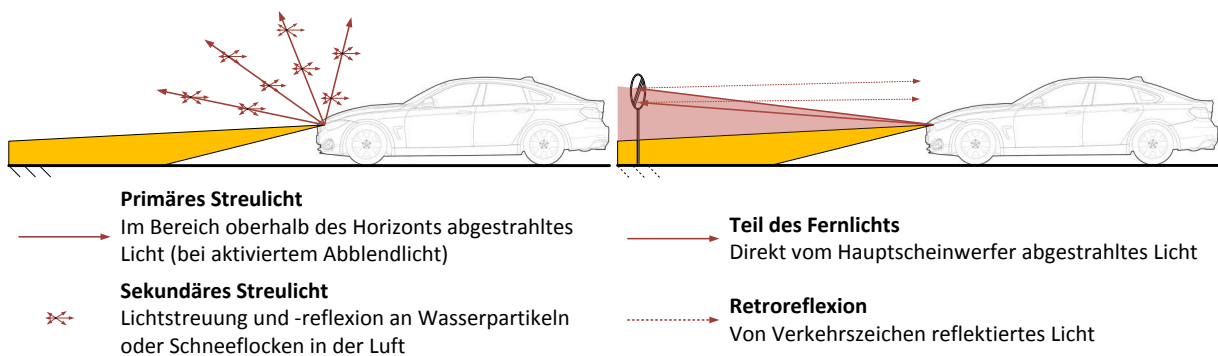


Abbildung 1.1: Eigenblendung bei Schnee oder Nebel (links) und durch retroreflektierende Verkehrszeichen (rechts)

1.2 Problem- und Aufgabenstellung

Trotz einer Vielzahl an gesetzlichen Vorschriften und vorhandenen Bewertungskriterien für Scheinwerfersysteme, die darauf ausgerichtet sind, eine gute Ausleuchtung der Straße sicherzustellen und störende Effekte für andere Verkehrsteilnehmer zu vermeiden, tritt Eigenblendung im Straßenverkehr auf. Dies wirkt sich in bestimmten Situationen negativ auf die Sichtbedingungen bei Nachtfahrten aus, sodass der Fahrzeugführer dadurch beeinträchtigt, gestört oder abgelenkt werden kann. Eine Erhöhung des Unfallrisikos kann die Folge sein.

Unterschiedliche Vorgaben für die Maximalwerte und die Verteilung der Lichtstärke in unterschiedlichen Zulassungsbereichen (z. B. in Europa und Nordamerika) machen deutlich, dass keine einheitlichen Vorgaben zur Reduzierung des Eigenblendungsrisikos vorhanden sind. Hier von sind sowohl die zulässigen maximalen Lichtstärken im Streulichtbereich beim Abblendlicht als auch die zulässigen Maximalwerte der Lichtstärke des Fernlichts betroffen, welche die Eigenblendung maßgeblich beeinflussen.

Im Entwicklungsprozess von Scheinwerfersystemen entstehen häufig Zielkonflikte, die nicht eindeutig aufgelöst werden können. Ursachen von primärem Streulicht sind meist bekannt und können durch geeignete konstruktive Maßnahmen eliminiert oder reduziert werden. Dies bringt jedoch mehrere Nachteile mit sich. Zum einen wird Streulicht bei klarer Sicht benötigt, um Schilder (vor allem die Überkopfschilder) sichtbar zu machen, zum anderen sind konstruktive Änderungen des Scheinwerfers stets mit hohen Kosten verbunden und können im Widerspruch zu den ästhetischen Ansprüchen der Kunden und Fahrzeugentwickler stehen. Auch bei der Entwicklung des Fernlichts steht eine möglichst hohe Intensität des Lichts, die dem Fahrer bestmögliche Sichtbedingungen bei Nacht ermöglichen soll, im Konflikt mit der Gefahr der Selbstblendung an Straßenschildern.

Die Schwierigkeit besteht darin, einen Scheinwerfer hinsichtlich des Risikos der Eigenblendung vergleichbar und korrekt bewerten zu können. Nur so können Risiken minimiert und Änderungsmaßnahmen gerechtfertigt werden. Dabei müssen jedoch zahlreiche Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Die subjektive Wahrnehmung des Menschen (abhängig u. a. vom Alter und der persönlichen Einstellung) muss daher ebenso einbezogen werden wie die unterschiedlichen Witterungsbedingungen bei Nebel, Schnee oder im Falle der Blendung an Verkehrszeichen die unterschiedlichen Größen, Entfernungen und Materialien der Schilder.

Durch die hier präsentierten Untersuchungen zur Eigenblendung wurden die subjektive Wahrnehmung und das Blendungsempfinden in Probandenstudien untersucht. Außerdem wurden die genannten Situationen theoretisch und messtechnisch untersucht. Anhand der Ergebnisse werden objektivierte Spezifikationen, Visualisierungs- und Bewertungswerkzeuge erarbeitet, welche eine Auflösung der vorher genannten Zielkonflikte und eine objektive Beurteilung des Eigenblendungsrisikos ermöglichen.

1.3 Struktur der Arbeit

Im Folgenden ist der inhaltliche Aufbau dieser Arbeit dargestellt. Die Struktur ist eng von den in Abbildung 1.1 gezeigten Themengebieten abgeleitet.

Zu Beginn wird in der Einführung das Forschungsthema in einen sachlichen Kontext eingeordnet, die Motivation zur Arbeit näher erläutert und der strukturelle Aufbau der Dissertationsschrift beschrieben (Kap. 1). Die Eingliederung in den wissenschaftlichen Kontext liefert im Anschluss daran den aktuellen Stand der Technik und die zum Verständnis der Arbeit notwendigen Hintergrundinformationen (Kap. 2). In der Erläuterung der Zielstellung wird dargestellt, mit welcher Methodik vor dem Hintergrund des aktuellen Stands der Technik die Problem- und Aufgabenstellung gelöst wird (Kap. 3). Anschließend folgt die Darstellung der Untersuchungsergebnisse. Die Auswertung einer Umfrage bildet den Einstieg in die Ergebnisdarstellung (Kap. 4). Im folgenden Abschnitt werden die Untersuchungen zur Eigenblendung durch Streulicht bei Nebel dargestellt (Kap. 5). Der nächste Abschnitt beinhaltet die Untersuchungen zur Eigenblendung durch Streulicht bei Schnee (Kap. 6). Anschließend werden die Untersuchungen zur Eigenblendung durch retroreflektierende Schilder beim Einsatz von Fernlicht bzw. blendfreien Fernlichtassistenten wiedergegeben (Kap. 7). Im nächsten Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchungen für die drei Themenblöcke in Form von Anforderungen und aus den Untersuchungen abgeleiteten Bewertungsmöglichkeiten dargestellt (Kap. 8). Die Schlussdiskussion ordnet die Ergebnisse in den wissenschaftlichen Kontext ein und gibt einen Ausblick auf weiterführende Untersuchungen (Kap. 9).

2 Grundlagen und Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext

2.1 Begriffsdefinition Eigenblendung

Blendung beschreibt den Sehzustand, der durch eine ungünstige Leuchtdichteverteilung oder zu hohe Leuchtdichtekontraste als unangenehm empfunden wird und in manchen Fällen die Sehleistung herabsetzt [Hen02]. Blendung lässt sich grundsätzlich in unterschiedliche Kategorien einteilen. Eine Unterteilung erfolgt häufig anhand der Wirkung der Blendung. Dabei wird zwischen physiologischer und psychologischer Blendung unterschieden, wie beispielsweise bei BAER und HENTSCHEL [Bae06], [Hen02]. Auch im Straßenverkehr treten diese zwei Arten der Blendung auf. Weiterhin können nach kausalen Gesichtspunkten weitere Blendungsdefinitionen formuliert werden. Als bedeutend für den Straßenverkehr hat SPRUTE und WÖRDENWEBER beispielsweise die Sättigungsblendung und die Adaptationsblendung angeführt. Im Folgenden werden die genannten Blendungsbegriffe näher beschrieben (vgl. [Spr11], [Wör07]).

1. **Physiologische Blendung (engl.: disability glare):** Diese wird z. B. durch die Frontscheinwerfer entgegenkommender Kraftfahrzeuge bei Nacht ausgelöst, insbesondere bei aktiviertem Fernlicht, also der punktuellen Erhöhung der Leuchtdichte gewisser Bereiche im Gesichtsfeld. Es entsteht ein Leuchtdichteschleier um die Blendquelle im Gesichtsfeld. Dieser setzt die Sehleistung messbar herab.
2. **Psychologische Blendung (engl.: discomfort glare):** Diese kann z. B. durch entgegenkommende Fahrzeuge mit aktiviertem Abblendlicht oder durch Lichtquellen im peripheren Sichtfeld entstehen. Der Begriff beschreibt ein durch Blendung entstehendes Unbehagen bzw. Unwohlsein des Geblendeten. Die Sehleistung muss dabei nicht messbar beeinträchtigt sein.
3. **Sättigungsblendung (engl.: saturation glare):** Diese entsteht z. B. durch das Fahren bei starker Sonneneinstrahlung, also der zeitlich langen Konfrontation des Gesichtsfeldes mit einer hohen Leuchtdichte.
4. **Adaptationsblendung (engl.: adaptation glare):** Sie tritt z. B. beim Herausfahren aus einem langen Tunnel bei Tageslicht auf, also bei einem plötzlichen und starken Leuchtdichteanstieg im Gesichtsfeld.

Der Begriff der Eigenblendung ist für die unterschiedlichen Fahrsituationen, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, ebenfalls differenziert zu betrachten. Im Folgenden werden daher die drei Arten der Eigenblendung, die im weiteren Verlauf der Arbeit behandelt werden, entsprechend ihrer Fahrsituation unterschiedlich definiert.

Definition Eigenblendung bei Nebel:

Unter dem Begriff Eigenblendung bei Nebel werden die kontrastmindernden und störenden Effekte verstanden, die aufgrund von Überlagerungen der Streuleuchtdichte von Wassertröpfchen in der Luft mit der Objekt- bzw. Fahrbahnleuchtdichte entstehen.

Definition Eigenblendung bei Schnee:

Eigenblendung bei Schnee bedeutet die Beeinträchtigung der Konzentration, das Störimpfinden und die Behinderung der Sicht durch rückreflektiertes Licht von Schneepartikeln in der Luft, die eine Art visuelles Rauschen im Fahrersichtfeld verursachen.

Definition Eigenblendung an Schildern:

Als Eigenblendung durch retroreflektierende Schilder wird die psychologische und physiologische Blendung verstanden, die durch den Einsatz leistungsstarker Scheinwerfer und blendfreier Fernlichtassistenten vermehrt im Straßenverkehr auftritt.

2.2 Fahrsituationen mit Eigenblendung

Ein besonders hohes Gefährdungspotential hinsichtlich der Eigenblendung weisen Fahrsituationen bei Nacht mit aktiviertem Abblendlicht bei Nebel und Schnee sowie Fahrten mit manuell aktiviertem Fernlicht oder mit automatischen, blendfreien Fernlichtsystemen auf. Im Folgenden sollen diese Fahrsituationen mit ihren Eigenschaften und physikalischen Grundlagen beschrieben werden.

2.2.1 Fahrten bei Nebel

Das Auftreten von Nebel im Straßenverkehr hat mehrere nachteilige Eigenschaften, die bei Nachtfahrten die ohnehin eingeschränkten Sichtbedingungen weiter verschlechtern. Dabei sind sowohl physikalische als auch psychologische Effekte von Bedeutung. Auf beiden Gebieten wurden bereits Forschungsarbeiten durchgeführt. DAMASKY hat in erster Linie die optischen und lichttechnischen Eigenschaften untersucht (vgl. [Dam95]), wohingegen RICHTER hauptsächlich die psychologischen Aspekte betrachtet hat (vgl. [Ric01]).

Vor allem die Streuung des Lichts und die Überlagerung der Streuleuchtdichte mit der Objekt- bzw. Umgebungsleuchtdichte (Kontrastveränderung) kann dazu führen, dass Gegenstände oder Fußgänger nicht rechtzeitig erkannt werden. Eine Abschwächung des Lichtstroms kommt beim Auftreffen von Licht auf Wassertröpfchen zustande. Das Licht wird dabei absorbiert und

gestreut. Da die Absorption von sichtbarer Strahlung im Nebel sehr gering ist, wird dieser Anteil jedoch häufig vernachlässigt. Die Abschwächung wird also hauptsächlich durch die tropfengrößenabhängige Umlenkung der Lichtstrahlen ausgelöst. Die Abschwächung folgt dabei den allgemeinen Gesetzen von Strahlung beim Durchlaufen von Materie. Danach hat eine Strahlungsgröße X_0 nach dem Durchlaufen der Strecke a in einem homogenen getrübbten Medium den Wert X [Ack13], [Eck93], [Ros99]:

$$X = X_0 \cdot e^{-\sigma a} \quad (2.1)$$

Die Mie-Theorie liefert eine mathematisch exakte Beschreibung der winkelabhängigen Streufunktion im Nebel, die durch BOEHLAU-GODAU auch experimentell bestätigt wurde [Ros99]. Für den Schwächungskoeffizienten σ gilt bei Tropfengrößen mit $d \gg \lambda$ (Wellenlänge) nach dem Gesetz der Mie-Streuung [Eck93]:

$$\sigma = \text{const} \frac{\pi}{4} d^2 \quad (2.2)$$

Unter Einbezug von Gleichung 2.1 und einer berechneten, winkelabhängigen Streufunktion ermittelt DAMASKY für eine Szene mit Nebel bei einer Normsichtweite von 50 m Streuleuchtdichten von bis zu $L = 0,51 \text{ cd m}^{-2}$ oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze (HDG). Als Grundlage für die Berechnung wird eine gemessene Lichtstärkeverteilung eines Serienscheinwerfers herangezogen, die oberhalb der HDG eine Lichtstärke von ca. 550 cd aufwies [Dam95]. Neben den kontrastmindernden und nachteiligen Effekten der Lichtstreuung und Rückreflexion kommen im Nebel außerdem noch Effekte wie Blendung, Farbveränderungen oder Fehlwahrnehmungen hinzu, die negativen Einfluss auf die psychologische Grundeinstellung des Fahrers haben (vgl. [Ric01]).

Nebel entsteht, wenn sich feuchte Luft mit ausreichend Kondensationskernen unter den Taupunkt abkühlt, also mit Wasserdampf gesättigt ist. Er kann als eine bodennahe Wolke aus kleinen Wassertröpfchen bezeichnet werden. In Abhängigkeit von der Tropfengröße und von der Konzentration ändert sich die Nebeldichte und damit auch die Sichtweite im Nebel, wobei die Bezeichnung Nebel erst ab einer Sichtweite von unter 1000 m verwendet wird [Sch11]. Die Konzentration der Wassertröpfchen im Nebel beträgt zwischen 10 cm^{-3} und 100 cm^{-3} (vgl. Tabelle 2.1). Nebel hat eine Tropfengröße mit einem Radius von $1 - 10 \mu\text{m}$ (vgl. Tabelle 2.1) [Nar01]. Einige Quellen gehen teilweise sogar von bis zu $50 \mu\text{m}$ als maximalen Radius eines Wassertropfens bei Nebel aus [Eck93]. Das zeigt, dass die Tropfengröße meist deutlich größer ist als die Wellenlänge des einfallenden Lichts. Die Eigenschaften des Nebels im Vergleich zu anderen Wetterbedingungen sind in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Tabelle 2.1: Wetterbedingungen und zugehörige Partikelarten, Radien und Konzentrationen (entnommen aus [Nar01])

Bedingung	Partikelart	Radius in μm	Konzentration in cm^{-3}
Luft	Molekül	10^{-4}	10^{19}
Dunst	Aerosol	$10^{-2} - 1$	$10^{10} - 10^3$
Nebel	Wassertröpfchen	$1 - 10$	$10 - 100$
Wolke	Wassertröpfchen	$1 - 10$	$10 - 300$
Regen	Wassertropfen	$10^2 - 10^4$	$10^{-5} - 10^{-2}$

Es gibt verschiedene Arten von Nebel, welche den drei Hauptgruppen Abkühlungsnebel (AN), Verdunstungsnebel (VN) und Mischungsnebel (MN) zugeordnet werden können (vgl. [Grü12], [Ric01]). Ausschlaggebend für die Unterscheidung sind die unterschiedlichen Entstehungsursachen.

- Strahlungsnebel (AN): Starke, meist nächtliche Abkühlung des Bodens führt zu Wasserkondensation in bodennahen Schichten; tritt häufig im Frühjahr und Herbst in Gebieten mit wenig Luftbewegung (Senken, Täler) auf; lokales, teilweise kurzweiliges und schwer prognostizierbares Auftreten.
- Advektionsnebel (AN): Feuchte Warmluft wird beim Überströmen einer kalten Bodenschicht abgekühlt und führt so zur Wasserkondensation; tritt häufig in Wintermonaten auf und kann mächtige, dauerhafte Nebelschichten von 100 m bis 1000 m Höhe hervorbringen.
- Niederschlags- oder Frontnebel (VN): Abkühlung der sehr warmen Bodenschicht durch kalten Niederschlag oder Verdunstung von warmem Regen, der auf eine kalte Grundschicht fällt; kommt meist im Winterhalbjahr vor und ist nur kurz andauernd.

2.2.2 Fahrten bei Schnee

Neben den ohnehin widrigen Bedingungen bei Schneefall, wie z. B. Fahrbahnglätte, wird auch die Beleuchtungssituation beeinflusst. Bei schneebedeckter Fahrbahn nehmen die Kontraste ab und Licht wird stärker als bei trockener Fahrbahn in Fahrtrichtung reflektiert. Rückreflektiertes Licht von Schneepartikeln in der Luft behindert die Sicht auf die Straße oder auf Objekte, die sich darauf befinden. Durch die kontinuierliche Bewegung von leuchtenden Objekten wirkt der Schneefall wie ein visuelles Rauschen [Bul01]. Die Aufmerksamkeit des Fahrers wird dadurch stärker als sonst beansprucht.

Schnee entsteht durch Gefrieren von unterkühltem Wasserdampf (Sublimation). Die Temperatur in der Wolke beeinflusst die Form der Schneekristalle. Man unterscheidet dünne sechseckige Plättchen (0°C bis 3°C), Eisnadeln (-3°C bis -5°C) und sechsarmige Schneesterne (-12°C bis -16°C) [Sch11]. REY liefert eine detaillierte Beschreibung der spektralen Eigenschaften von Schnee [Rey08]. Da Schnee kein granulares Material ist, gibt die Korngröße allein die optischen

Eigenschaften nicht adäquat wieder. Ein angemessener Parameter sollte nach GIDDINGS und LACHAPPELLE [Gid61] das Volumen und die Oberfläche des Schneekorns berücksichtigen. Das Verhältnis aus Kornoberfläche und Volumen ($SSA = \text{specific surface area}$) kann zur näherungsweise Berechnung des optisch äquivalenten Korndurchmessers d herangezogen werden. Er berechnet sich nach folgender Formel:

$$d = \frac{6}{SSA} \quad (2.3)$$

Abbildung 2.1 zeigt den modellierten spektralen Reflexionsgrad für unterschiedliche Korndurchmesser in einem Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1400 nm. Dabei ist bei allen Durchmessern eine Abnahme der Reflektanz mit zunehmender Wellenlänge zu beobachten, wobei der Einfluss der Wellenlänge im sichtbaren Bereich deutlich geringer ist als im Bereich größerer Wellenlängen. Als sichtbarer Bereich wird der Wellenlängenbereich von 380 bis 780 nm angenommen [Pau07]. Weiterhin wird aus der Abbildung deutlich, dass der Reflexionsgrad mit zunehmendem Kornradius auch einen größeren Abfall hin zu größeren Wellenlängen verzeichnet.

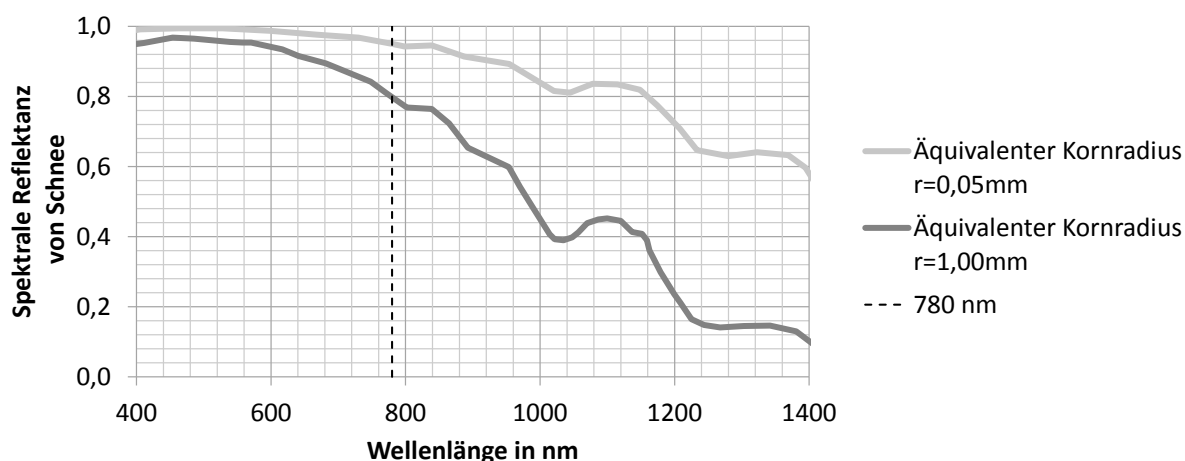


Abbildung 2.1: Modellierter spektraler Reflexionsgrad von reinem Schnee mit unterschiedlichen Kornradien. Aus [Rey08] nach Wiscombe et al. [Wis80]

2.2.3 Fahrten mit Fernlicht oder blendfreien Fernlichtassistenten

Die durch Fahren mit Fernlicht bzw. mit blendfreien Fernlichtassistenten (BFFLA) entstehende Gefahr der Eigenblendung an retroreflektierenden Schildern hängt maßgeblich vom eingesetzten Scheinwerfersystem und von den retroreflektierenden Eigenschaften der Beschilderung ab. In Kapitel 2.4.2 werden die verschiedenen Umsetzungsmöglichkeiten für BFFLA beschrieben. Dabei weisen die verschiedenen Technologien insgesamt ein erhöhtes Eigenblendungsrisiko auf.

Dieses Risikopotential wird bei der Bewertung der Systeme jedoch meist nicht berücksichtigt. FLEURY et al. beispielsweise bewerten zwar die allgemeine Funktionalität mit Kriterien wie „Ausleuchtung von Hindernissen“, „Leuchtkraft“ und „Präzision“ [Fle12]. Die Eigenblendung wird jedoch nicht berücksichtigt. Diese kann grundsätzlich von allen Systemen, die hohe Lichtstärken aufweisen, ausgelöst werden, da die Einschaltdauer des Fernlichts erhöht wird und damit auch häufiger kritische Situationen auftreten können.

Der größte Einflussfaktor für Eigenblendung ist die Lichtstärke des Scheinwerfers. Moderne Scheinwerfersysteme ermöglichen durch den Einsatz von leistungsstarken und effizienten Lichtquellen sehr gute Sichtbedingungen bei Nacht. Die Lichtstärkemaxima unterliegen jedoch, abhängig von der eingesetzten Lichtquelle und dem Gesamtsystem, großen Schwankungen. Ein Vergleich der Maximalwerte der Lichtstärke im Fernlichtbetrieb von 18 Fahrzeugen des Herstellers BMW und Mini zeigt Schwankungen zwischen 47 500 und 131 000 cd. Mit einem weiteren Anstieg der Maximalwerte ist aufgrund von Leistungssteigerungen bei der LED-Technik und dem Einsatz von laseraktiviertem Leuchtstoff in zukünftigen Fahrzeuggenerationen zu rechnen. Da es auch weiterhin Fahrzeuge mit Glühlampentechnologie oder LED-Systeme mit niedrigen Maximalwerten geben wird und andere Verkehrsteilnehmer wie Rad- oder Motorradfahrer über weniger Lichtstärke verfügen, wäre eine Reduzierung der Anforderungen an die retroreflektierenden Folien keine Option zur Verminderung der Eigenblendung. Eine Übersicht über die Unterschiede bezüglich der maximalen Lichtstärken für Fernlichtverteilungen gibt Abbildung 2.2.

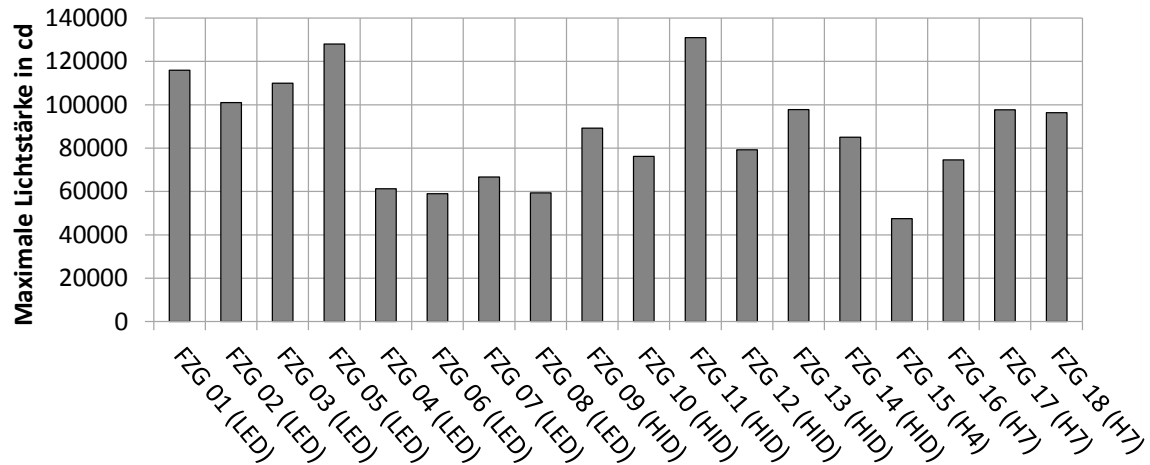


Abbildung 2.2: Maximale Lichtstärke innerhalb unterschiedlicher Fernlichtverteilungen

Maßgeblichen Einfluss auf die wahrgenommene Helligkeit der Schilder haben auch ihre retroreflektierenden Eigenschaften. Im Straßenverkehr kommen drei unterschiedliche Folientypen auf Verkehrsschildern zum Einsatz, deren Mindestanforderungen an die spezifischen Rückstrahlwerte in der Norm DIN 67520 für retroreflektierende Materialien zur Verkehrssicherung festgehalten sind [DIN67]. Dort werden folgende Typen unterschieden (vgl. Abb. 2.3):

- Folien mit eingebundenen Mikroglasperlen (Bauart RA1).
- Folien mit eingekapselten Mikroglasperlen (Bauart RA2).
- Mikroprismatische Folien für kurze Distanz (Bauart RA3A) und lange Distanz (Bauart RA3B) .



Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau unterschiedlicher retroreflektierender Materialien für den Einsatz im Straßenverkehr [3M 07]

Dabei weisen die drei Folientypen aus Abbildung 2.3 unterschiedliche Eigenschaften auf. Den höchsten maximalen spezifischen Mindestrückstrahlwert R_A nach DIN 67520 weist der Folientyp RA3, also eine mikroprismatische Folie, mit $850 \text{ cd m}^{-2} \text{ lx}^{-1}$ auf [DIN67]. Bei Folien vom Typ RA2 liegt die Mindestanforderung deutlich niedriger bei $250 \text{ cd m}^{-2} \text{ lx}^{-1}$ und bei Folien vom Typ RA1 bei $70 \text{ cd m}^{-2} \text{ lx}^{-1}$ [DIN67]. Auch für unterschiedliche Farben gelten spezielle Anforderungen. Weiße Folien haben dabei stets die höchsten Anforderungen an die spezifischen Rückstrahlwerte, so dass bei weißen Schildern auch die höchsten Leuchtdichten und damit das größte Blendungsrisiko zu erwarten sind.

Die Größe des spezifischen Rückstrahlwertes ist für alle Farben und Materialien abhängig von der Lage der retroreflektierenden Probe (z. B. Schild), der Lichtquelle (z. B. Scheinwerfer) und des Empfängers (z. B. Auge des Fahrers) zueinander (vgl. Abb. 2.4). Die Werte von R_A sind damit von mehreren Winkeln abhängig. Der Beobachtungswinkel α ist der Winkel zwischen den Geraden, die die Mittelpunkte der anleuchtenden Lichtquelle und des Empfängers mit dem Mittelpunkt der Probe verbindet. Der Anleuchtwinkel β ist der Winkel zwischen der Mittelsenkrechten auf der Probenoberfläche und der Lichtquelle. Dabei unterscheidet man die Vertikalkomponente β_1 und die Horizontalkomponente β_2 . Der Verdrehungswinkel ε beschreibt den Winkel, um den die Probe um ihre Mittelsenkrechte gedreht ist [DIN67].

Wenn der spezifische Rückstrahlwert und die entsprechenden Winkel bekannt sind, kann die auf dem Schild auftretende Leuchtdichte L_{VKZ} mit Hilfe der senkrecht auf dem Schild auftretenden Beleuchtungsstärke E_{\perp} nach Gleichung 2.4 berechnet werden. Bei der Berechnung

werden Faktoren wie Alterung oder Verschmutzung nicht mit berücksichtigt, so dass in der Realität meist von unbestimmt niedrigeren Werten ausgegangen werden kann.

$$L_{VKZ} = \frac{R_A(\alpha, \beta_1, \epsilon) \cdot E_{\perp}}{\cos(\alpha - \beta_1)} \quad (2.4)$$

Gleichung 2.4 gilt unter der Annahme $\beta_2 = 0$, also unter Vernachlässigung der horizontalen Komponente des Anleuchtwinkels [DIN67].

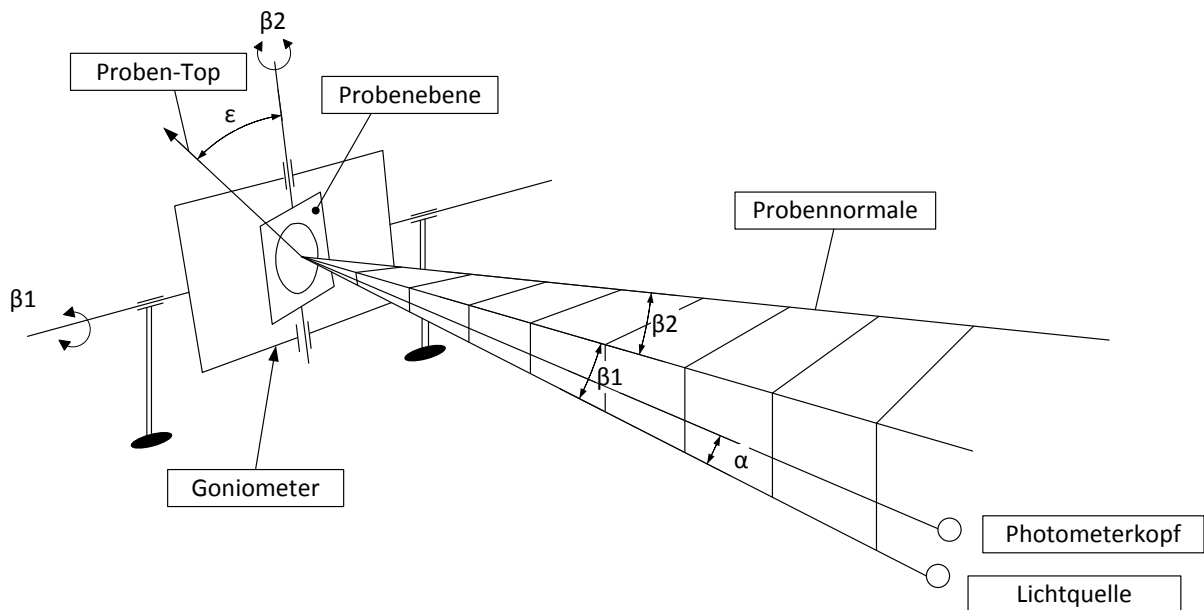


Abbildung 2.4: Skizze zur Messanordnung zur Bewertung retroreflektierender Materialien (aus [DIN67])

Die relative Lage zwischen Verkehrsschild und Fahrzeug bzw. Fahrer hat auf die tatsächliche Helligkeit des Schildes großen Einfluss, wie aus Gleichung 2.4 hervorgeht. Allgemeine Vorschriften für Verkehrszeichen werden in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrsordnung (VwV-StVO) in § 39 bis § 43 festgelegt. Neben Angaben zur Aufstellhöhe und zum Abstand des Verkehrszeichens zum Fahrbahnrand sind auch Vorschriften für die Mindestgröße in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit enthalten. So müssen beispielsweise außerorts auf Landstraßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h runde Verkehrszeichen (Ronden) mit einem Durchmesser von 75 cm aufgestellt werden. Dabei müssen sie einen seitlichen Abstand von 1,5 m zum Straßenrand und eine Aufstellhöhe von 2,0 m bis zur Schildunterkante aufweisen. Für Über-Kopf Schilder wird nach VwV-StVO eine Höhe von 4,5 m Metern gefordert. Laut Leitfaden zur wegweisenden Beschilderung auf Autobahnen entspricht die Schildbreite von Über-Kopf Schildern der Fahrbahnbreite, wobei sich die Schildhöhe nach dem Informationsgehalt der Schilder richtet [Nie14], [StVo09].

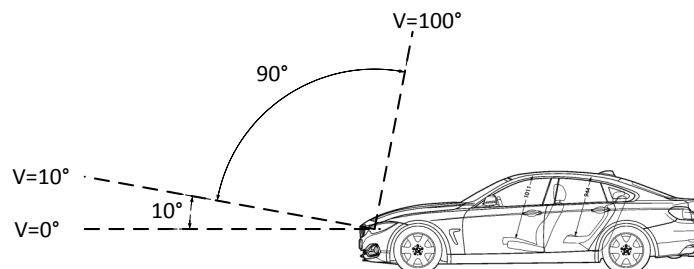
2.3 Begriffsdefinition Streulicht

Primäres Streulicht wird als Ursache für die Eigenblendung bei Nebel und Schnee angesehen (vgl. Kap. 1.1). Dabei wird das Licht an Wasser- oder Eispartikeln in der Luft gestreut und als sekundäres Streulicht in Richtung des Fahrers reflektiert. Der Begriff „Streulicht“ wird auch in anderen Zusammenhängen verwendet, so dass in Bezug auf die Verwendung im weiteren Verlauf der Arbeit eine Definition und Abgrenzung des Begriffs erforderlich ist. Diese wird im Folgenden dargestellt.

Als primäres Streulicht wird der Anteil der Lichtverteilung verstanden, welcher keinen Beitrag zur primären Lichtfunktion liefert und in einen Bereich oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze (HDG) emittiert wird (vgl. Abb. 1.1). Primäres Streulicht entsteht durch Direktabstrahlung von Licht aus dessen Quelle (z. B. LED, Halogenglühlampe) oder durch Mehrfachreflexionen an Scheinwerferkomponenten, wie beispielsweise optische Komponenten (z. B. Linsen) oder Zierelemente (z. B. glänzende Blenden, Kunststoffbauteile). Oftmals hat auch die Form der Abdeckscheibe Einfluss auf die Streulichtentstehung. Bei flachen Einfallswinkeln kann es zu Totalreflexion an der Abdeckscheibe kommen, die wiederum Reflexe an Blenden hervorruft [VH07]. Die genannte Definition deckt sich weitgehend mit der Definition von KIEL, der in seiner Dissertation u. a. eine Methode zur Bewertung von Streulicht vorstellt [Kie12]. Die Arbeit befasst sich jedoch vorwiegend mit der Bewertung von Inhomogenitäten, die beispielsweise an Tunnelwänden sichtbar werden, und nicht mit den nachteiligen Effekten des Streulichts bei Nebel und Schnee.

Vertikaler Streulichtbereich:

V: +10° bis + 100°



Horizontaler Streulichtbereich:

H: -80° bis +80°

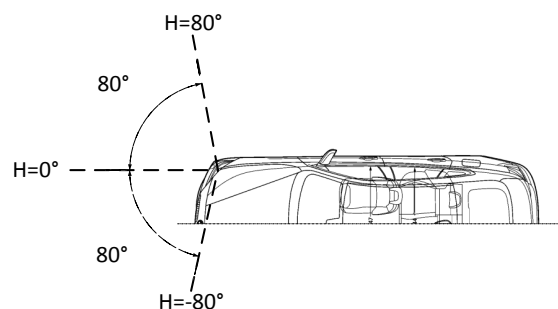


Abbildung 2.5: Definition des horizontalen und vertikalen Streulichtbereichs (H, V)

Abbildung 2.5 definiert den Winkelbereich, der als Streulichtbereich untersucht wird. Die Untersuchungen beziehen sich im weiteren Verlauf der Arbeit vorwiegend auf das Abblendlicht als

Hauptlichtfunktion. Im Gegensatz zu einem Nebel- oder Schlechtwetterlicht ist diese Funktion in allen Fahrzeugen vorhanden, so dass die Untersuchungen vorrangig darauf ausgerichtet sind.

Als Streulichtbereich wird ein Winkelbereich der Abblendlichtverteilung definiert, der die Hauptlichtverteilung nicht mit einschließt. Dieser befindet sich in einem horizontalen Winkelbereich (H) von -80° bis $+80^\circ$ und einem vertikalen Winkelbereich (V) von $+10^\circ$ bis $+100^\circ$ (vgl. Abb. 2.5). Die Grenzen spiegeln den Bereich wieder, in dem vorwiegend mit Streulicht zu rechnen ist. Außerhalb dieser Grenzen wurde bei den Untersuchungen nur in Einzelfällen Streulicht detektiert. Vertikale Winkel über 100° liegen außerhalb des messtechnisch erfassbaren Bereichs des verwendeten Goniofotometers, so dass eine Erfassung aus technischen Gründen oberhalb von 100 nicht möglich war. Da eine Vermessung der Scheinwerfer im Streulichtbereich vorwiegend im ausgebauten Zustand im Labor durchgeführt wird, werden Streulichtanteile, die von der Fahrbahnoberfläche reflektiert werden, also indirektes Streulicht, nicht berücksichtigt.

2.4 Funktion und Umsetzung relevanter Lichtverteilungen

Kraftfahrzeug-Scheinwerfer haben die Aufgabe, die Fahrbahn und deren Umgebung auszuleuchten. Dadurch soll der Mensch bei der nächtlichen Wahrnehmung unterstützt werden. Gleichzeitig soll der Gegenverkehr nicht geblendet werden [Wal06]. Außerdem sollen Effekte, die zur Eigenblendung des Fahrzeugführers führen, vermieden bzw. gering gehalten werden (vgl. [Ros99], [Dam95]).

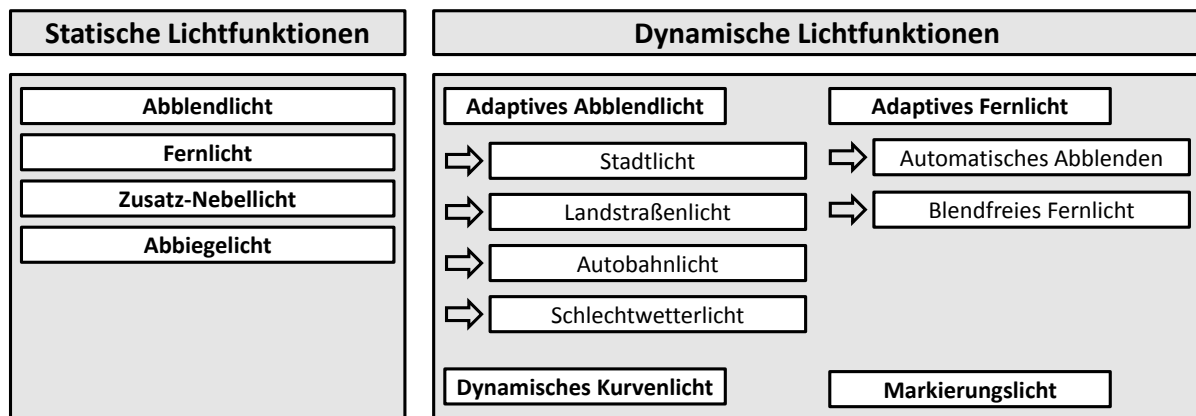


Abbildung 2.6: Überblick der statischen und dynamischen Scheinwerferlichtfunktionen im Kraftfahrzeug

Neben statischen Lichtfunktionen kommen immer häufiger auch adaptive Frontbeleuchtungssysteme (AFS) und Assistenzsysteme zum Einsatz, die die Ausleuchtung der Straße optimieren sollen. Abbildung 2.6 zeigt in einer Übersicht die möglichen statischen und dynamischen Scheinwerferlichtfunktionen mit Ausnahme der Signallicht- und Innenlichtfunktionen.

Adaptive Frontbeleuchtungssysteme und Assistenzsysteme ermöglichen heute eine Anpassung der Scheinwerfer an die unterschiedlichen Fahrsituationen. So kann dank Sensorik und Aktorik im Scheinwerfer die Abblendlichtverteilung speziellen Fahrzuständen angepasst werden (Autobahnlicht, Landstraßenlicht, Stadtlicht, Schlechtwetterlicht) oder in Kurvenrichtung mitgeschwenkt werden (adaptives Kurvenlicht) [Eic05] [Fis12]. Fernlichtassistenten ermöglichen ein automatisches An- und Abschalten des Fernlichts bei entgegenkommenden oder vorausfahrenden Fahrzeugen. Blendfreie Fernlichtassistenten (BFFLA) ermöglichen es, Verkehrsteilnehmer gezielt auszublenden. Dadurch kann die Einschaltdauer des Fernlichts und damit die Ausleuchtung der Fahrbahn und Umgebung im Vergleich zu anderen Systemen nochmals deutlich gesteigert werden [Aus13].

Die Situationen mit dem höchsten Risiko der Eigenblendung, welche den Schwerpunkt der Untersuchungen festlegen, sind in Abbildung 2.7 dargestellt.

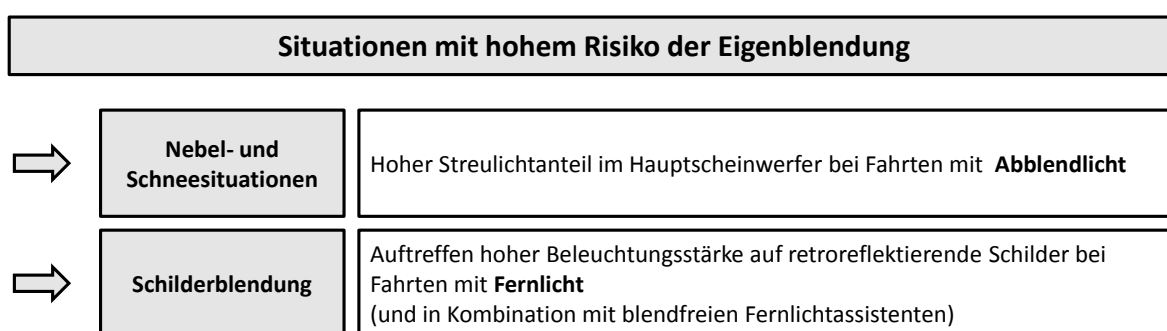


Abbildung 2.7: Risikosituationen der Eigenblendung und zugehörige Lichtfunktionen

Bei Schnee oder Nebel erhöht ein hoher Anteil an Streulicht, also Licht das oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze (HDG) emittiert wird, das Blendungsrisiko (vgl. Kap. 2.3). Besonders bei Abblendlichtbetrieb oder Fernlichtbetrieb kann dies zu einer Sichtverschlechterung bzw. Störung des Fahrers führen. Da das Fernlicht, im Gegensatz zu den Streulichtanteilen beim Abblendlicht, vom Fahrer deaktiviert werden kann, wird dieser Sonderfall als vermeidbar und daher nicht als kritisch eingestuft. Weitere Streulichtanteile durch den Zusatznebelscheinwerfer können das Risiko noch erhöhen. Auch die sogenannte Schlechtwetterlichtverteilung ist nicht zwingend für Nebel- und Schneesituationen ausgelegt. Daher kann auch hier ein Risiko entstehen. VON HOFFMANN sieht im Schlechtwetterlicht beispielsweise keinen Ersatz für Nebellicht, sondern mehr die Anpassung der Lichtverteilung an die regennasse Fahrbahn und damit die Reduzierung der indirekten Blendung des Gegenverkehrs durch eine reduzierte Vorwärtsreflexion [Von03]. Das Risiko der Schilderblendung ist bei aktiviertem Fernlicht gegeben. Immer wenn der Lichtschwerpunkt bzw. die maximale Lichtstärke auf ein Schild trifft, ist das Risiko besonders hoch. Der Einsatz von blendfreien Fernlichtassistenten erhöht einerseits den Nutzungsgrad, andererseits auch das Eigenblendungsrisiko an retroreflektierenden Verkehrszeichen [Sch14]. Einige Systeme verlagern bei vorausfahrendem Verkehr den Lichtschwerpunkt

zum Fahrbahnrand und erhöhen damit das Risiko durch seitlich angebrachte Verkehrszeichen Blendung zu erzeugen.

Bei der technologischen Umsetzung der Lichtfunktionen gibt es unterschiedliche Ansätze bezüglich des optischen Systems und der verwendeten Lichtquellen. Sowohl Projektions- als auch Reflexionssysteme werden im Scheinwerfer verwendet. Als Lichtquellen kommen beim Abblendlicht Halogenleuchtstofflampen, Hochdruckgasentladungslampen oder Leuchtdioden zum Einsatz. Seit dem Jahr 2014 werden erstmals auch Scheinwerfer mit laseraktiviertem Leuchtstoff zur Realisierung der Fernlichtfunktion angeboten. Ein sogenannter Laserscheinwerfer ist durch hohe Effizienz und sehr hohe Lichtstärken mit bis zu 212 500 cd um das Zentrum der Lichtstärkeverteilung ausgezeichnet [Han13].

2.4.1 Umsetzungsmöglichkeiten von Lichtfunktionen für Nebel und Schnee

Die verschiedenen Varianten zur Umsetzung von Lichtfunktionen, die dem Fahrer bei Nebel und Schnee zur Verfügung stehen, werden im Folgenden mit ihren Kerneigenschaften dargestellt. Welche der Lichtfunktionen dem Fahrer zur Verfügung stehen, hängt von der Ausstattung seines Fahrzeugs ab, da einige Funktionen nur als Sonderausstattung erhältlich sind.

- **Abblendlicht:** Dem Fahrzeugführer steht bei Nebel oder Schnee lediglich das Abblendlicht zur Verfügung (z. B. asymmetrisches Abblendlicht nach ECE R20 [UNE06], Class C Abblendlicht nach ECE R123 [UNE13b]). Dieses wird ohne zusätzliche oder variable Komponenten im Hauptscheinwerfer erzeugt.
- **Nebellicht:** Zusatzlichtverteilung, die zum Abblendlicht zugeschaltet wird und durch eine breite Lichtverteilung gekennzeichnet ist (ECE R19 [UNE13c]). Die Realisierung erfolgt durch Zusatzscheinwerfer, die eine tiefe Anbauposition aufweisen.
- **Schlechtwetterlicht bei adaptiven Scheinwerfersystemen:** Anpassung der Lichtverteilung für die Verwendung unter ungünstigen Bedingungen (Class W nach ECE R123 [UNE13b]). Bei der Umsetzung sind je nach Hersteller unterschiedliche Varianten möglich. Eine Variante ist beispielsweise das Zuschalten des Abbiegelichtes zum Abblendlicht, um eine breitere Lichtverteilung zu generieren (bei statischen Scheinwerfersystemen). Eine weitere Möglichkeit ist die Anpassung einer Lichtverteilung durch ein Schwenken der Hauptlichtmodule zur Seite und nach unten. Zusätzlich kann der Asymmetrieanteil oberhalb der HDG abgeschaltet werden, wenn dieser Teil der Lichtverteilung einzeln ansteuerbar ist (häufig bei LED-Scheinwerfern). Dadurch wird die Lichtverteilung breiter und das Streulicht reduziert.

Im ungünstigsten Fall hat ein Fahrer nur das statische Abblendlicht bei Fahrten im Nebel oder Schnee zur Verfügung. Daher wird diese Lichtfunktion im Rahmen dieser Arbeit vorrangig untersucht. Die übrigen Systeme sind in der Regel auf Schlechtwettersituationen abgestimmt

und bieten gegenüber dem Abblendlicht eine bessere Ausleuchtung (z. B. Streulichtreduzierung durch Absenkung der Scheinwerfer oder tiefen Anbauort). Somit sind diese Systeme deutlich weniger kritisch einzuordnen.

2.4.2 Umsetzungsmöglichkeiten von blendfreien Fernlichtsystemen

Die verschiedenen Varianten zur Umsetzung von automatischen bzw. blendfreien Fernlichtsystemen werden im Folgenden mit ihren Kerneigenschaften dargestellt:

- **Zweistufiger Fernlichtassistent:** Automatische Abschaltung des Fernlichts bei entgegenkommenden oder vorausfahrenden Fahrzeugen.
- **Gleitende Leuchtweite:** Kontinuierliche Verschiebung der horizontalen HDG vom Abblendlicht bis zum vollen Fernlicht.
- **Maskiertes Dauerfernlicht:** Variabler Schattentunnel inmitten der Fernlichtverteilung. Das Fernlicht blendet Verkehrsteilnehmer aus. Der Schattentunnel kann entweder durch ein Schwenken der Fernlichtmodule in Kombination mit einer vertikalen HDG oder durch das Einbringen einer beweglichen Blende erzeugt werden.
- **Segmentiertes Fernlicht:** Durch das Unterteilen der Fernlichtverteilung in mehrere Segmente können Teilbereiche gezielt abgeschaltet werden. Entgegenkommende und vorausfahrende Fahrzeuge werden ausgeblendet. Es ist sowohl eine vertikale als auch eine horizontale Unterteilung denkbar.

Bei allen Systemen ist die kamerabasierte Erkennung von vorausfahrenden und entgegenkommenden Fahrzeugen Voraussetzung (vgl. [Nie14], [Fle12], [Hum09]). Das maskierte Dauerfernlicht und das segmentierte Fernlicht haben bereits Einzug bei einigen Automobilherstellern wie Audi, BMW oder Mercedes erhalten. Aktuelle Forschungsthemen beschäftigen sich vor allem mit der Thematik einer sinnvollen Segmentierung und der Realisierung eines sogenannten Pixellichts, z. B. mit Hilfe von DMD Chips (vgl. [Gün08], [Tot08], [Gut14]). HUMMEL liefert in seiner Dissertation neben der Beschreibung der hier genannten Systeme auch eine detailliertere Auflistung der Systeme, die aktuell nicht zum Einsatz kommen [Hum09].

2.5 Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext

Für die Zulassung von Kraftfahrzeugscheinwerfern gibt es weltweit unterschiedliche Regelungen, die einheitliche technische Vorschriften, wie z. B. Vorgaben für die Lichtstärkeverteilung, den Farbort oder die Anbauposition, beinhalten. In großen Teilen der Welt gelten die Vorgaben der *United Nations Economic Commission for Europe* (UNECE) vollständig oder in abgewandelter Form. Für den nordamerikanischen Raum gelten die Zulassungsgesetze des *Federal Motor Vehicle Safety Standard* (FMVSS) und im kanadischen Raum die fast vollständig aus dem FMVSS übernommenen Vorschriften des *Canadian Motor Vehicle Safety Standard* (CMVSS). Eine Übersicht über die Gültigkeit der Ländervorschriften kann der Dissertation von GÖCKE oder KIEL entnommen werden [Goc13], [Kie12]. Auch in verschiedenen Doktorarbeiten, Konferenzbeiträgen oder Berichten wurde das Thema Eigenblendung durch Streulicht und durch retroreflektierende Schilder bereits untersucht (vgl. [Ros99], [Dam95], [Zie07], [Lac14b], [Nie14]). Im Folgenden werden die relevanten Bewertungsrichtlinien, Normen und Studien vorgestellt.

2.5.1 Allgemeine Vorschriften und Studien zur Bewertung von Scheinwerfern

Die Regelungen der UNECE und des FMVSS definieren die Anforderungen für heute zulässige Lichtfunktionen in großen Teilen der Welt. Im Zusammenhang mit den Blendungsrisiken werden im Folgenden einerseits die maximal zulässigen Lichtstärken für Fernlichtverteilungen aufgezeigt. Andererseits werden die Vorgaben für Abblendlichtverteilungen zur Vermeidung von Blendung des Gegenverkehrs untersucht, die im weiteren Verlauf der Arbeit Anhaltspunkte für Grenzwerte der Schilderblendung liefern können. Außerdem wird die Abblendlichtverteilung im Bereich oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze (HDG) reglementiert. Hier wird untersucht, inwieweit der Streulichtbereich bereits jetzt definiert ist und welche Vorschriften hinsichtlich Eigenblendung bereits vorhanden sind. Die Werte in Tabelle 2.2, 2.3 und 2.4 sind aus den Vorschriften ECE-R98, ECE-R112, ECE-R123 und des FMVSS-108 entnommen (vgl. [UNE12a], [UNE13a], [UNE13b], [FMV12]).

Die Vorgaben für Bereiche des Abblendlichts oberhalb der HDG beschränken sich in den ECE-Normen auf wenige Messpunkte bzw. Zonen. Bereiche oberhalb eines vertikalen Winkels von 4° werden nicht berücksichtigt. Die Regelung FMVSS-108 hingegen weist eine klare Einschränkung im Streulichtbereich auf und fordert ab einem vertikalen Winkel von 10° eine maximale Lichtstärke von 125 cd (vgl. Tab. 2.2).

Tabelle 2.2: Vorgaben für die Lichtstärke des Abblendlichts oberhalb der HDG aus den Normen der UNECE und des FMVSS

Bezeichnung	I_{Min} in cd	I_{Max} in cd	Bereich / Messpunkte	Regelung in
Schilderbeleuchtung (P1, P2, P3)	$I_{P1} + I_{P2} + I_{P3} \geq 190$		$V_{P1,P2,P3} = 4^\circ$, $H_{P1} = -8^\circ$, $H_{P2} = 0^\circ$, $H_{P3} = 8^\circ$	ECE-R98/ ECE-R112/ ECE-R123
Bereich oberhalb der HDG (Zone 3)	-	625	Oberhalb der HDG bis $V=4^\circ$; $H=-8^\circ$ bis $+8^\circ$	ECE-R98/ ECE-R112
Bereich oberhalb der HDG (Zone 3)	-	880	Oberhalb der HDG bis $V=4^\circ$; $H=-8^\circ$ bis $+8^\circ$	ECE-R123
Bereich oberhalb der HDG	-	125	Alle Punkte innerhalb $H=-90^\circ$ bis 90° und $V=10^\circ$ bis 90°	FMVSS-108

Die Eigenblendung durch retroreflektierende Schilder wird als solche in den Normen nicht berücksichtigt. Vorgaben zur Vermeidung der Blendung des Gegenverkehrs bei aktiviertem Abblendlicht werden in den ECE-Normen durch den Punkt B50L (Rechtsverkehr) definiert. Dieser Punkt beschreibt die Position des Kopfes eines entgegenkommenden Verkehrsteilnehmers in 50 m Entfernung. Der Maximalwert liegt bei 350 cd (vgl. Tab. 2.3). In den Vorschriften des FMVSS wird eine Blendgerade für Gegenverkehr definiert, welche dieselbe vertikale Ausrichtung hat wie der Punkt B50L (bei $V=0,57^\circ$), jedoch entlang einer Geraden definiert ist, die ab einem horizontalen Winkel von $H=-1,5^\circ$ beginnt. Der Maximalwert liegt bei 1 000 cd (vgl. Tab. 2.3). In diesem Fall lässt der FMVSS deutlich höhere Werte in Bezug auf Fremdblendung zu als die UNECE.

Tabelle 2.3: Vorgaben für Blendpunkte bei Abblendlicht aus den Normen der UNECE und des FMVSS

Bezeichnung	I_{Min} in cd	I_{Max} in cd	Bereich / Messpunkte	Regelung in
Blendpunkt für Gegenverkehr (B50L)	-	350	$H=-3,43^\circ$; $V=0,57^\circ$	ECE-R98/ ECE-R112
Blendpunkt für Gegenverkehr (B50L)	50	350	$H=-3,43^\circ$; $V=0,57^\circ$	ECE-R123 Class C und V
Blendgerade für Gegenverkehr		1 000	ab $H=-1,5^\circ$; $V=0,57^\circ$	FMVSS-108

Die Eigenblendung an retroreflektierenden Verkehrszeichen wird maßgeblich von der Lichtstärke des Scheinwerfers beeinflusst. Die Maximalwerte für das Fernlicht sind sowohl für die ECE- als auch für die FMVSS-Vorschriften im Zentrum der Lichtstärkeverteilung im Punkt

HV (horizontaler und vertikaler Abstrahlwinkel von 0°) definiert. In Bezug auf die maximal erlaubte Intensität des Fernlichts erlaubt der FMVSS 70 000 cd im Gegensatz zu 215 000 cd bei der UNECE (vgl. Tab. 2.4). In ECE-Zulassungsräumen sind also deutlich höhere Maximalwerte zulässig als in den Gebieten, in denen die Vorschriften des FMVSS gelten.

Tabelle 2.4: Wertebereich für Fernlicht im Punkt HV aus den Normen der UNECE und des FMVSS

Bezeichnung	I_{Min} in cd	I_{Max} in cd	Bereich / Messpunkte	Regelung in
Wert in HV	37 500	215 000	H= 0° ; V= 0°	ECE-R98
Wert in HV	27 000/40 500	215 000	H= 0° ; V= 0°	ECE-R112,
Wert in HV	40 500	215 000	H= 0° ; V= 0°	ECE-R23,
Wert in HV	40 000	70 000	H= 0° ; V= 0°	FMVSS-108,

Neben den zulassungsrelevanten Vorschriften der UNECE, des FMVSS und des CMVSS liefert der *CIE Bericht 188:2010* allgemeine Bewertungsmethoden für Scheinwerfer. Er ist erstellt worden, um dem Bedarf für standardisierte, exakte und zuverlässige Methoden zur Bewertung der fotometrischen Leistungsdaten von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern gerecht zu werden. Dabei werden die Anforderungen an Scheinwerfer in Bezug auf die Ausleuchtung der Straße und die Begrenzung von Blendung sowie die Erkennbarkeit der Fahrspur, von Fußgängern und Objekten berücksichtigt [CIE10]. Blendung beispielsweise wird durch die Berechnung der gewichteten Beleuchtungsstärke eines Scheinwerfers ermittelt. Dabei wird ein Bereich betrachtet, der die Position des Auges des entgegenkommenden Verkehrsteilnehmers andeutet. Die Bewertungsmethoden werden ständig weiterentwickelt und bieten eine Grundlage für neue Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet. Beispielsweise baut eine Bewertungsmethode für adaptive Lichtfunktionen [Cer11] darauf auf und es werden neue Ansätze für die Fernlichtbewertung untersucht [Web13]. Das Thema Eigenblendung findet aktuell keine Berücksichtigung in dem Bericht.

2.5.2 Vorschriften und Studien zum Thema Bewertung und Blendung durch Streulicht

ROSENHAHN hat sich im Rahmen einer Dissertation ausführlich mit dem Thema „lichttechnische Vorschriften für Schlechtwetterlichtverteilungen“ auseinandergesetzt und mit Hilfe von Simulationsdaten und physiologischen Studien Anforderungen an Schlechtwetterlichtverteilungen abgeleitet (vgl. [Ros99]). Er untersucht den Einfluss der Sichtweite, die Anbauposition und die Vorneigung der Scheinwerfer bei nebligen Bedingungen. Außerdem wird explizit der Einfluss der Scheinwerferlichtstärke oberhalb des Horizonts untersucht, dessen Ergebnisse im Folgenden genauer dargestellt werden. Für die Abschätzung simuliert ROSENHAHN drei künstliche Lichtstärkeverteilungen mit einer konstanten Lichtstärke von 200 cd. Jede Verteilung wird in einen einzelnen Sektor oberhalb des Horizonts ausgestrahlt. Die drei Sektoren liegen im Bereich

$V=0^\circ$ bis $V=5^\circ$, $V=40$ bis $V=45^\circ$ und $V=85^\circ$ bis $V=90^\circ$ (vgl. Abb. 2.8 a). Die Streuleuchtdichten im Nebel werden auf den Grundlagen der MIE-Theorie berechnet (vgl. Kap. 2.2.1) und die in der Simulation angenommene Sichtweite beträgt jeweils 50 m.

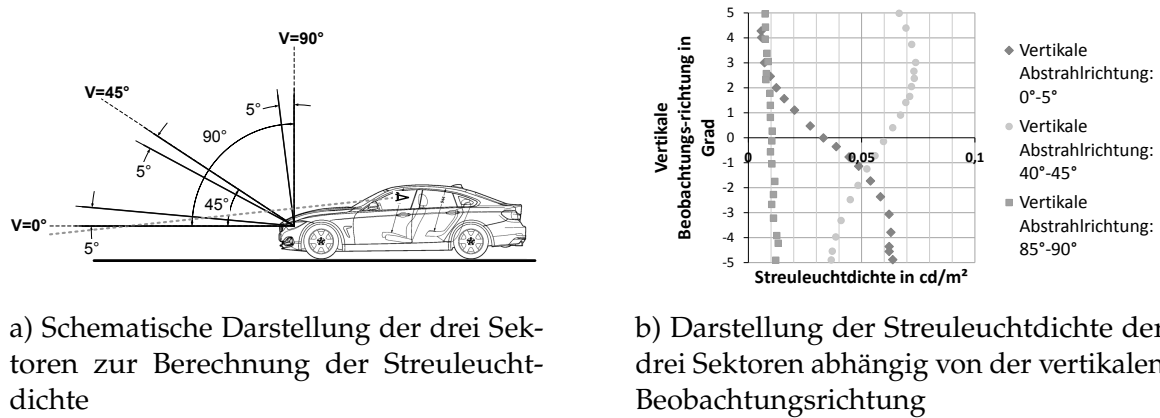


Abbildung 2.8: Simulation der Streuleuchtdichte oberhalb des Horizonts mit einer Lichtstärke von 200 cd und einer Sichtweite von 50 m nach ROSENHAHN (aus [Ros99])

Abbildung 2.8 b zeigt deutlich die unterschiedlichen Einflüsse der Sektoren auf die Streuleuchtdichte. Den geringsten Einfluss weist Sektor 3 auf, der fast senkrecht nach oben strahlt (vert. Abstrahlrichtung 85° - 90°). Sektor 1, mit annähernd waagrechten Strahlen (vert. Abstrahlrichtung 0° - 5°), erzeugt unterhalb von $V=0^\circ$ die größten Streuleuchtdichten, die darüber stark zurückgehen. Sektor 2 (vert. Abstrahlrichtung 40° - 45°) verhält sich gerade umgekehrt und hat ab einer vertikalen Blickrichtung von 2° oder höher den größten Einfluss. Grund für diese Unterschiede in der Charakteristik sind die unterschiedlich langen Schnittlinien in den Sektoren und die unterschiedlichen Entfernungen zu den Ebenen der Streuzentren [Ros99].

In einer Studie hat Rosenhahn den Schwellenreflexionsgrad ρ' für quadratische Tafeln einer Kantenlänge von 40 cm bei unterschiedlichen Lichtverteilungen mit überlagerter Streuleuchtdichte in einem statischen Experiment ermittelt. Der Schwellenreflexionsgrad wird für jede Lichtverteilung anhand der Schwellenleuchtdichte L' und der am Objekt gemessenen Beleuchtungsstärke E ermittelt und soll einer besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse dienen. Für ein diffus reflektierendes Objekt gilt:

$$\rho' = \frac{L' \cdot \pi}{E} \quad (2.5)$$

Dabei hat ein erhöhter Streulichtanteil von 200 cd im Halbraum oberhalb der HDG zu einer leichten Anhebung des Schwellenreflexionsgrades bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen geführt. Untersucht wurde einerseits eine Objektentfernung von 30 m bei einer Normsichtweite von 50 m und andererseits eine Objektentfernung von 50 m bei einer Normsichtweite von 250 m [Ros99].

Die aus den Untersuchungen von ROSENHAHN abgeleiteten Anforderungen für den Streulichtbereich werden zwischen linkem und rechtem Scheinwerfer unterschieden und sind durch Linien auf bzw. oberhalb von $V=10^\circ$ definiert. Die zulässigen Maximalwerte liegen auf beiden Seiten bei 62,5 cd. Auf einer Linie mit $V=2^\circ$ liegen diese bei 250 cd für den linken und bei 156 cd für den rechten Scheinwerfer [Ros99].

Nach ROSENHAHN sind die geringsten Streuleuchtdichten für steile Winkel erreicht, da hier der Schnitt von Sichtlinie und Streulichtkegel am kürzesten ist (vgl. Abb. 2.8). Ob dies gleichzeitig auch bedeutet, dass bei steilen Abstrahlwinkeln auch das geringste Eigenblendungsrisiko und eine geringe Störwirkung für den Fahrer entsteht, wird nicht erörtert. Dies soll daher durch Versuche im Rahmen dieser Arbeit ermittelt werden. Die in der Dissertation von ROSENHAHN ausgestellten Anforderungen definieren sehr strenge Vorgaben für den Streulichtbereich auf einer Linie über dem Horizont und der Ebene, in der sich die Streuleuchtdichten des linken und rechten Scheinwerfers in HV überschneiden. Oberhalb dieser Linien gibt es keine Vorschriften für Maximalwerte. Eine Aussage, wie die Werte genau ermittelt wurden, konnte der Arbeit nicht entnommen werden [Ros99].

DAMASKY hat Vorgaben für eine Schlechtwetterlichtverteilung erarbeitet und speziell für Nebel folgende Forderungen aufgestellt (vgl. [Dam95]): Die Hell-Dunkel-Grenze soll eine Mindestschärfe und eine leichte Neigung nach unten aufweisen. Eine klare Definition der Mindestschärfe wird nicht gegeben. Oberhalb der HDG bis $V=20^\circ$ soll eine Lichtstärke von 100 bis 200 cd gegeben sein, die zur Erkennung von Objekten und Leiteinrichtungen erforderlich ist. Außerdem soll die Verteilung gleichmäßig sein, um eine Fixation der hellen Stellen zu vermeiden. Weiterhin soll kein Licht oberhalb von $V=20^\circ$ (direktes Streulicht) und im Bereich bis 8-10 m vor dem Fahrzeug (indirektes Streulicht) ausgesendet werden. Identische Vorgaben gelten auch für Schnee und starken Regen. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass der Blick des Fahrers bereits in einer Entfernung von 4,5 bis 6,7 m vor dem Fahrzeug auf die Straße trifft [Sch13]. Daher sollte zumindest der Bereich ab 4-6 m ausgeleuchtet werden.

Das Auftreten von Streulicht und insbesondere von Inhomogenitäten können nach HUHNN ungewollte Blickzuwendungen und störende Reflexe bei Nebel oder Schneefall auslösen [Huh96]. KIEL stellt in seiner Dissertation eine Methode zur Bewertung von Streulicht in einer Simulation und in einem Versuchsaufbau im Lichttunnel vor. Er ermittelt Lage und Ausdehnung von Inhomogenitäten, sowie Minimal, Maximal- und Mittelwerte der Beleuchtungsstärke an einer Tunnelwand. In seiner Arbeit hat er gezeigt, dass die im Fernfeld ermittelten Größen und die Berechnung von horizontalen Beleuchtungsstärken im Nahfeld als vernachlässigbar einzustufen sind. Die Ableitung und Evaluation einheitlicher und allgemeingültiger Modelle kommt aus dieser Arbeit nicht hervor. [Kie12].

Wie bereits zu Beginn dieses Abschnitts erwähnt wurde, beschäftigt sich RICHTER im Rahmen ihrer Dissertation vorwiegend mit psychologischen Fragen zum Thema „nachteilige Effekte bei Nebelfahrten“. Speziell auf Nachtfahrten ausgerichtete Experimente wurden nicht durchgeführt.

Als Einflussfaktoren auf das Sehen im Nebel nennt sie Lichtstreuung, Reflexion, Blendung, Kontrastverlust, Farbveränderungen und Fehlwahrnehmungen durch Nachbilder. Die Arbeit geht jedoch nicht auf die physikalischen Aspekte ein und liefert auch keine Vorgaben für Beleuchtungseinrichtungen am Kraftfahrzeug. Vielmehr wird das Gefüge von Einstellungen, Handlungsintentionen und Fahrverhalten unter Nebelbedingungen erhoben [Ric01].

2.5.3 Studien zum Thema Blendwirkung verschiedener Lichtquellen

Der Einsatz gelber Farbfilter zur Verbesserung der Sicht bei streuenden Medien basiert auf Untersuchungen von Mouton [Mou35] und Monnier [Mou36] unter der Annahme, dass die lichtstreuenden Effekte nach den mathematischen Gesetzen der Rayleigh-Streuung berechnet werden können. Die Rayleigh-Streuung tritt auf, wenn die Partikelgröße in etwa der Größe der Wellenlänge entspricht. Dies indiziert, dass langwelliges Licht (z. B. rot) stärker gestreut wird als kurzwelliges Licht (z. B. blau). Sowohl bei Schnee, als auch bei Nebel trifft dies nicht zu, da die Durchmesser zwischen 1 000 nm und 10 000 nm für Nebel liegen (vgl. Tab. 2.1) und bei 100 000 nm bis 300 000 nm für Neu-Schnee [Rey08]. Diese sind damit mindestens eine Größenordnung größer als die sichtbare Strahlung zwischen 380 und 780 nm, so dass die Gesetze der Rayleigh-Streuung nicht zur Anwendung kommen [Bul01].

Eine Kennzahl für den Einfluss von Zapfen und Stäbchen bei der Hellempfindung ist das skotopisch-photopische Verhältnis (spV). Dabei wird die spektrale Strahlungsverteilung mit der skotopischen und photopischen Hellempfindlichkeitsfunktion gewichtet und integriert. Anschließend wird daraus das Verhältnis gebildet. BULLOUGH beschreibt diesen Einfluss in einer Arbeit zum Thema „Fahren im Schnee“ [Bul01]. In eigenen Versuchen kann er einen Unterschied bei der subjektiven Störbewertung und stark unterschiedlichen spV feststellen. Dieser Unterschied ist jedoch nicht für Störlichtquellen in Weiß (spV=2,92) und Gelb (spV=2,52) nachzuweisen. Andere Arbeiten belegen einen Zusammenhang zwischen spV und der subjektiven Störwirkung. Eine Gegenüberstellung von Versuchen von DE BOER und FERGUSON zeigen, dass das Verhältnis zweier spV mit dem Verhältnis der Leuchtdichten ($L_{Blendung,50\%}$), bei dem 50 % der Beobachter die Lichtquellen als gleich störend beurteilt haben, in etwa übereinstimmen [Bul01]. Für die zwei herangezogenen Beispiele gilt demnach:

$$\frac{spV_1}{spV_2} \approx \frac{L_{Blendung,50\%,1}}{L_{Blendung,50\%,2}} \quad (2.6)$$

Ein Report der Transportation Lighting Alliance zeigt durch Experimente, dass Unterschiede in der Reaktionszeit und in der Erkennbarkeit (Verfehlung) von Objekten in Abhängigkeit der spektralen Verteilungsfunktion der verwendeten Scheinwerfer vorhanden sind. Dies wird im peripheren Bereich der Testperson nachgewiesen. Im zentralen Sichtfeld dagegen waren keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Insgesamt haben Lichtquellen mit höheren Farbtemperaturen bzw. höheren spV eine Steigerung der Sehleistung im peripheren Bereich

erzielt [Der05]. In Tabelle 2.5 werden die skotopisch-photopischen Verhältnisse von einigen Lichtquellen dargestellt.

Tabelle 2.5: Skotopisch-photopisches Verhältnis (spV) von verschiedenen Lichtquellen ([Der02], [Der05])

Lichtquelle	Warmweiße LED	Kaltweiße LED	HID	Halogen
spV	1,2	2,0	1,7	1,4

Eine Untersuchung von HAMM und LAMPEN zeigt, dass beim Vergleich eines Scheinwerfers mit Halogenglühlampe und LED Unterschiede beim Helligkeitseindruck und bei den Detektionsschwellen vorhanden sind. Demnach bieten LEDs den Vorteil, als heller wahrgenommen zu werden (ca. 15 % im Vergleich zu Halogenglühlampen). Bei der Detektion von Objekten hingegen war eine um 30 % höhere Beleuchtung der Objekte beim LED-Scheinwerfer im Vergleich zum Halogenscheinwerfer erforderlich, um die Detektionsschwelle zu erreichen. Die Detektionsschwellen liegen also bei LEDs höher als bei Halogenglühlampen [Ham11]. In weiteren Untersuchungen von LAMPEN und ROSENHAHN wurde jedoch auch gezeigt, dass im Rahmen des 90 % Konfidenzintervalls und bei realistischeren Experimenten (Erkennung von Objekten und Ermittlung von Fehlerraten) keine signifikanten Unterschiede aufgrund der verwendeten Lichtquelle nachzuweisen sind [Ros13].

VÖLKER gibt in einem Bericht einen aktuellen Überblick über die Geschichte der Blendung und geht darin auf den Farbeinfluss auf die physiologische und psychologische Blendung ein. Mehrere Untersuchungen belegen, dass der Einfluss der Lichtfarbe und der Lampenart keinen signifikanten Einfluss auf die physiologische Blendung hat, solange die Blendbeleuchtungsstärke am Auge identisch ist. Dies geht beispielsweise aus Untersuchungen hervor, die Halogen- und Gasentladungslampen von Fahrzeugscheinwerfern vergleichen. Anders ist der Einfluss bei der psychologischen Blendwirkung. Mit Anstieg der Farbtemperatur bzw. mit steigendem Blauanteil einer Lichtquelle steigt auch die Blendwirkung. CHIN ergänzt diese Aussage noch mit der Prämisse, dass eine unterschiedliche Blendbeurteilung bis zu einer Beleuchtungsstärke von 0,75 lx gültig ist [Chi02]. Oberhalb dieses Werts werden Halogen- und Gasentladungslampen als gleich störend empfunden [Völ12].

SPRUTE untersucht den Einfluss der Farbtemperatur auf die subjektive Blendempfindlichkeit durch eine eigene Studie im Rahmen seiner Dissertation. Er stellt fest, dass bei gleicher Beleuchtungsstärke LED-Scheinwerfer geringeres Blendempfinden auslösen als Halogenscheinwerfer. Dies widerspricht den Aussagen von VÖLKER und auch SPRUTE selbst weist nicht erklärbare Abweichungen zu anderen Ergebnissen aus Forschungsarbeiten auf. Insgesamt zieht er den Rückschluss, dass eine Lichtfarbe mit höherem Blauanteil nicht zu Nachteilen bei der Blendung führt. Voraussetzung ist ein ECE-konformer Farbort der Strahlung [Spr11].

2.5.4 Studien zum Thema Retroreflexion und Blendung durch Verkehrsschilder

AULBACH untersucht in einem Forschungsbericht optimale Farben und Formen von Leiteinrichtungen bei Dunkelheit [Aul92]. In Versuchen auf einer Modellstraße wird die optimale Leuchtdichte zur Erkennung von verschiedenen Formen ermittelt. Die Bewertung der Probanden erfolgt auf einer bipolaren 9-stufigen deBoer Skala mit den Stufen „9 - Form der Fläche nicht erkennbar, viel zu dunkel“, „5 Form der Fläche optimal erkennbar und „1 - Form der Fläche nicht erkennbar, überstrahlend“. Es wurde also bewertet, ob die Formen zu dunkel, optimal, oder zu hell erscheinen, um deren Form zu erkennen. Die Studie wurde für die zwei Umfeldleuchtdichten $L_U = 0,01 \text{ cd m}^{-2}$ und $L_U = 1 \text{ cd m}^{-2}$ durchgeführt. Die Größe bzw. der Sehwinkel der Objekte entspricht einer Entfernung von 100 m für Leitpfosten mit einer retroreflektierenden Fläche von $4 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$. Die Ergebnisse der Bewertung der Formenunterscheidbarkeit in Abhängigkeit der Leuchtdichte sind in Form der ermittelten Regressionsgeraden in Abbildung 2.9 dargestellt.

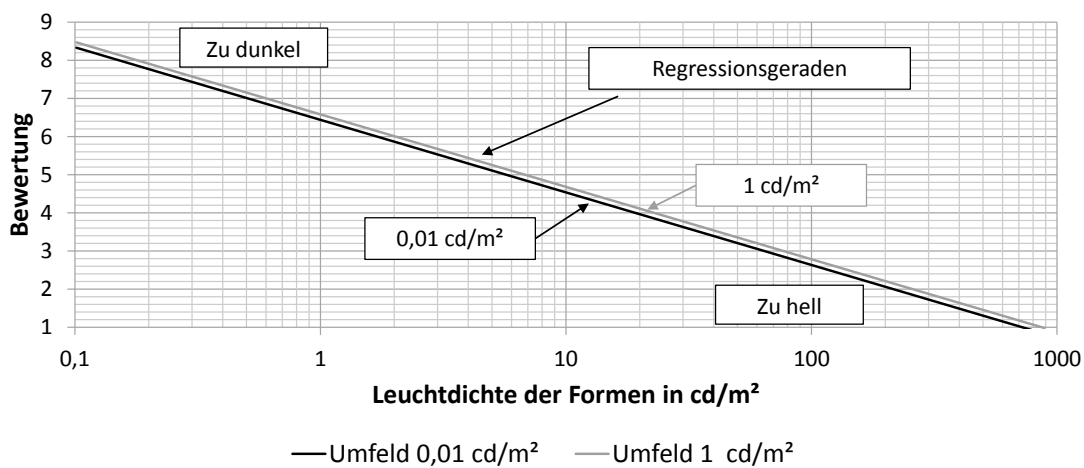


Abbildung 2.9: Regressionsgeraden zur Bewertung der Formenunterscheidbarkeit in Abhängigkeit von der Leuchtdichte (aus [Aul92])

Der Kurvenverlauf ist für beide Umgebungsleuchtdichten ähnlich und weist nur einen geringen Versatz auf der y-Achse auf. Die Umgebungsleuchtdichte hat also keinen starken Einfluss. Als Obergrenze für die Helligkeit der Formen wird eine Leuchtdichte von $L = 200 \text{ cd m}^{-2}$ angegeben, da hier die Formen überstrahlt werden und somit nicht mehr erkennbar sind. Die Störwirkung wurde im Rahmen dieses Versuches nicht explizit abgefragt. Unter der Annahme, dass sich ein Überstrahlen der Schilder auch auf das Störempfinden auswirkt, ist der hier genannte Grenzwert mit großer Wahrscheinlichkeit auch auf die Störwirkung von retroreflektierenden Verkehrszeichen übertragbar.

Im Rahmen einer Dissertation untersucht AULBACH lichttechnische Anforderungen an die visuelle Information von Signalbildern für die Verkehrsführung. Er zeigt einerseits auf, dass der Verlauf der Schwellenleuchtdichte L_S in Abhängigkeit der Umfeldleuchtdichte L_U für

verschiedene Sehwinkel φ gleich ist. Die Absolutwerte der Schwellenleuchtdichte nehmen mit steigender Objektgröße (also bei größeren Sehwinkeln) ab. Unterhalb einer Umgebungsleuchtdichte von $L_U = 0,01 \text{ cd m}^{-2}$ ist die Schwellenleuchtdichte annähernd konstant. Weiterhin zeigt er in seiner Arbeit den Zusammenhang zwischen Schwellenleuchtdichte und Sehwinkel auf (vgl. Abb. 2.10). Dabei werden drei Bereiche unterschieden. Im Ricco-Bereich ist die Schwellenleuchtdichte indirekt proportional zum quadratischen Sehwinkel ($L_S \sim 1/\varphi^2$). Im Übergangsbereich, dem Piper-Bereich ist die Schwellenleuchtdichte indirekt proportional zum Sehwinkel ($L_S \sim 1/\varphi$). Im Weber-Fechner Bereich ist die Schwellenleuchtdichte konstant ($L_S = \text{konst.}$) [Aul98].

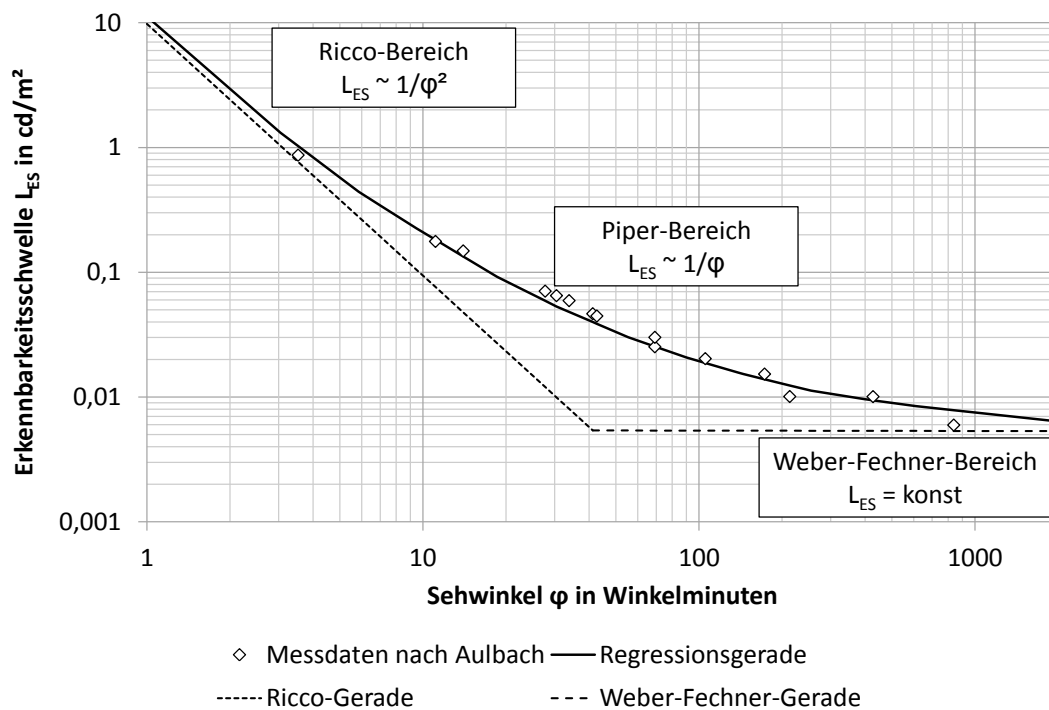


Abbildung 2.10: Abhängigkeit der Schwellenleuchtdichte von der Objektgröße nach AULBACH (aus [Aul98])

Ein identischer oder ähnlicher Zusammenhang könnte auch für die Schwellenleuchtdichte für subjektive Störung gelten. Im weiteren Verlauf der Arbeit soll durch Untersuchungen ein Vergleich der Ergebnisse von AULBACH mit den hier erarbeiteten Resultaten ermöglicht werden.

FRANK beschäftigt sich im Rahmen seiner Dissertation und in einem Forschungsbericht mit der Fragestellung nach der optimalen Helligkeit für Verkehrszeichen [Fra94], [Fra95]. Er ermittelt in mehreren Studien die Erkennbarkeit von Straßenschildern in Abhängigkeit von der Leuchtdichte. Bei den Versuchen berücksichtigt er den Einfluss der Umfelleuchtdichte ($L_U = 0,01 \text{ cd m}^{-2}$ bis 10 cd m^{-2}), den Einfluss der Entfernung der Schilder zum Beobachter

($a=70$ m bis 200 m) und den Einfluss von Blendlichtquellen (mit/ohne Blendung durch Fernlicht bzw. $E_A = 0$ lx / $E_A = 6$ lx). Insgesamt werden 12 Probanden befragt, die mit starrem Blick ein Schild in Sehachse bewerten. In Tabelle 2.6 sind die maximal zulässigen Leuchtdichten für die verschiedenen Situationen dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in jeder Zeile die variierten Parameter und die im Versuch ermittelten maximal zulässigen Leuchtdichten fett gedruckt. Als maximale Leuchtdichte L wird der Wert herangezogen, ab dem im Versuch eine durchschnittliche Bewertung von „3: störend, Zeichen schlecht erkennbar“ auf einer unipolaren 9-stufigen deBoer Skala ermittelt wird.

Tabelle 2.6: Maximal zulässige Leuchtdichten in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren (aus [Fra95])

Umfeldleuchtdichte L_U	Abstand zum Testzeichen a	Beleuchtungsstärke am Auge E_A	Maximale Leuchtdichte L
0,01 cd m⁻²	70 m	0 lx	550 cd m⁻²
10 cd m⁻²	70 m	0 lx	3000 cd m⁻²
0,01 cd m ⁻²	70 m	0 lx	550 cd m⁻²
0,01 cd m ⁻²	200 m	0 lx	1100 cd m⁻²
0,01 cd m ⁻²	70 m	0 lx	550 cd m⁻²
0,01 cd m ⁻²	70 m	6 lx	1200 cd m⁻²

Die Ergebnisse in Tabelle 2.6 zeigen, dass die Entfernung des Sehobjekts, die Umfeldleuchtdichte und die Blendbeleuchtungsstärke am Auge Einfluss auf die maximal zulässigen Leuchtdichten haben.

JÜRGENS und LACHMAYER stellen Untersuchungen speziell zur Eigenblendung an retroreflektierenden Schildern an. Sie ermitteln die Rückstrahlwerte verschiedener retroreflektierender Materialien der Firma 3M vom Typ RA1, RA2 und RA3 (vgl. Kap. 2.2.3). Die höchsten Rückstrahlwerte erreichen die Folien vom Typ RA 3, entsprechend den hohen Anforderungen aus der Norm DIN 67520 [DIN67]. Es wird aufgezeigt, dass vor allem an den Positionen der Richtungstafeln, die sich in der Nähe des Zentrums des Fahrerblickfeldes ($H=0^\circ$, $V=0^\circ$) befinden, eine starke Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel α vorhanden ist. Im zentralen Blickfeld ergeben sich dementsprechend sehr große Spannweiten, also Unterschiede zwischen den maximalen und minimalen Rückstrahlwerten. Dieser Umstand ist auf schlecht reproduzierbare Maxima, die in Form von Spiegelungen auftreten, zurückzuführen. Die Spannweiten für Verkehrszeichen außerhalb des zentralen Blickfeldes liefern gleichmäßige Rückstrahlwerte mit Spannweiten von unter 10 % für den betrachteten Winkelbereich [Lac14b].

Außerdem untersuchen JÜRGENS und LACHMAYER die Blendbeleuchtungsstärken für eine Geradeausfahrt und eine Kurvensituation in Fahrerkopfhöhe für zwei unterschiedliche Scheinwerfer. Ein Scheinwerfer nutzt Leuchtdioden und der zweite eine Hochdruckentladungslampe (HID)

als Leuchtmittel. Er vergleicht die gemessenen Beleuchtungsstärken mit den Blendbeleuchtungsstärken aus der Norm R123 der UNECE am Punkt B50L ($E_{B50L} = 0,56 \text{ lx}$). Dabei weisen Verkehrszeichen am Straßenrand eine erstmalige Überschreitung der Blendbeleuchtungsstärke in 25 m Entfernung auf. Das absolute Maximum wird in 35 m Entfernung erreicht. Bei höheren Entfernungen ist eine Abnahme der Absolutwerte zu verzeichnen die durch das quadratische Entfernungsgesetz zu erklären sind. Diese Abnahme wird jedoch teilweise kompensiert, da sich der Lichtschwerpunkt in größeren Entfernungen näher am Schild befindet und somit höhere Beleuchtungsstärken auf das Schild treffen. Richtungstafeln, die sich im zentralen Blickfeld und damit auch im Lichtschwerpunkt befinden, überschreiten den Blendwert in jeder Entfernung. Auch für Kurvensituationen wird der zulässige Wert E_{B50L} überschritten. Bezieht man die reflektierte Beleuchtungsstärke am Auge des Fahrers auf die zulässige Blendbeleuchtungsstärke E_{B50L} , wird dieser Wert sowohl bei Richtungstafeln als auch bei Verkehrszeichen um bis zu 1300 % überschritten. Die Untersuchungen bestätigen damit objektiv das Auftreten von Eigenblendung an retroreflektierenden Schildern [Lac14b].

Meist wird der Begriff der Blendung auf direkt sichtbare Lichtquellen im Umfeld des Straßenverkehrs oder der Innenraumbeleuchtung verwendet. Im Folgenden sollen unterschiedliche Ansätze vorgestellt und bezüglich ihrer Anwendbarkeit geprüft werden.

In DIN EN 13201 werden Gütekriterien für die Straßenbeleuchtung definiert. Die psychologische Blendung wird in DIN EN 13201-2 in Form von Blendindexklassen berücksichtigt (D0 bis D6). Der Blendindex wird mit der maximalen Lichtstärke I in allen Richtungen um die Leuchte und der Projektion der leuchtenden Fläche der Leuchte A in der Ebene senkrecht zur Lichtstärke nach Gleichung 2.7 berechnet.

$$\text{Blendindex} = I \cdot A^{-0,5} \quad (2.7)$$

In DIN EN 13201 wird keine bestimmte Blendindexklasse vorgeschrieben. Diese bestimmt den Komfort der Beleuchtungsanlage und ist vom Planer in Abstimmung mit dem Betreiber der Anlage festzulegen [DIN13], [Ric05]. Einem Bericht von KSCHISCHENK zufolge führen die Blendungskennziffern bei gleicher Leuchte und gleichbleibender Beleuchtungsgeometrie z. T. zu gegensätzlichen Aussagen. Außerdem lässt sich die leuchtende Fläche schwer ermitteln und scheint als Kriterium der Blendungsbewertung nicht vorrangig geeignet [Ksc01].

HOPKINSON schildert in einem Bericht der *Illuminating Engineers Society* grundsätzliche Untersuchungen zur Bewertung der psychologischen Blendung (engl. discomfort glare). Dabei geht er speziell auf den Zusammenhang zwischen empirisch ermittelten Akzeptanzschwellen und einem rechnerisch ermittelten Blendungsfaktor ein. Der Blendfaktor bzw. Blendindex nach HOPKINSON $G_{Hopkinson}$ (siehe Gl. 2.8) berücksichtigt die mittlere Objektleuchtdichte (L_B), die

wahrgenommene Größe der Lichtquelle in Steradian (Q) und die Adaptationsleuchtdichte (L_A) [Hop57].

$$G_{Hopkinson} = \frac{L_B^{1,6} Q^{0,8}}{L_A^{1,0}} \quad (2.8)$$

Der Blendfaktor $G_{Hopkinson}$ basiert auf den Ergebnissen von empirischen Studien und entspricht der Blendungsbewertung der *Building Research Station*. Abbildung 2.11 zeigt den Zusammenhang des Blendfaktors nach Gleichung 2.8 (dargestellt auf der Abszisse) und des prozentualen Anteils der allgemeinen Bevölkerung, die das Störempfinden entsprechend dem angegebenen Niveau oder als weniger störend bewertet (dargestellt auf der Ordinate). Dabei werden die Bewertungsstufen gerade wahrnehmbar (just perceptible), gerade akzeptabel (just acceptable), die Grenze zwischen Komfort und Blendung (borderline between comfort and discomfort), gerade unkomfortabel (just uncomfortable) und gerade unerträglich (just intolerable) dargestellt. Die Angabe des prozentualen Anteils der allgemeinen Bevölkerung, die das Störempfinden auf dem gegebenen Niveau oder als weniger störend bewertet, basiert auf zwei empirischen Studien, mit einer Teilnehmerzahl von 6 bzw. 50 Personen. Die Akzeptanzschwelle, also die Grenze zwischen Komfort und Blendung (engl. *borderline between comfort and discomfort*) wird im Diagramm mit BCD abgekürzt. Das Diagramm zeigt, dass bei einem Blendfaktor von $G_{Hopkinson} = 100$ die Bewertung bei 80 % der Bevölkerung unterhalb oder gerade auf der Grenze zum Störempfinden (BCD) liegt. Ein Blendfaktor bzw. Blendindex von $G_{Hopkinson} = 100$ wird gleichzeitig der internationalen Beleuchtungskommission (CIE) als angemessener Grenzwert für Beleuchtungssituationen empfohlen [Hop57].

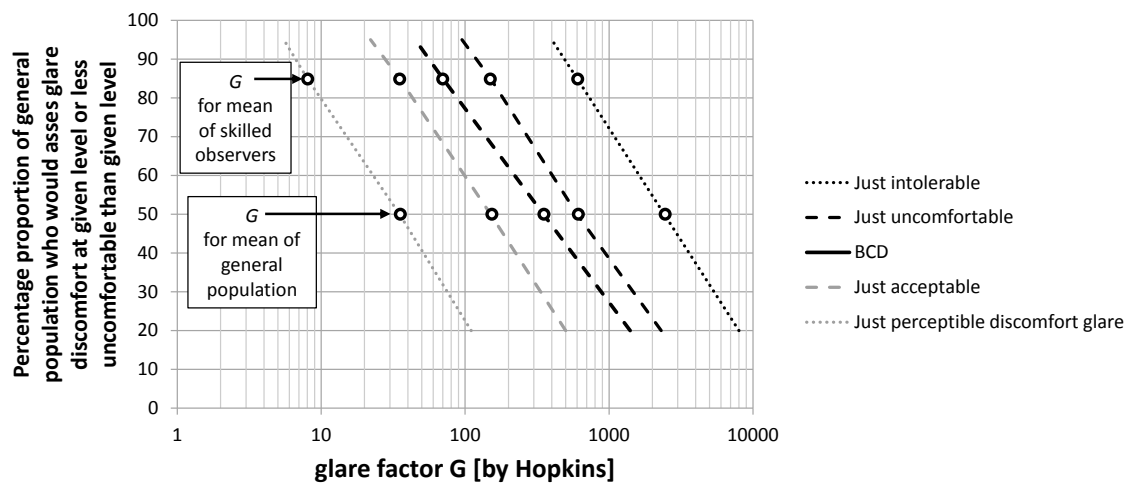


Abbildung 2.11: Zusammenhang zwischen empirisch ermittelten Akzeptanzschwellen und dem Blendfaktor nach Hopkins ([Hop57])

In einem Bericht von CLEAR werden unterschiedliche Modelle zur Ermittlung der Grenze zwischen Komfort und Diskomfort (BCD; engl. *borderline between comfort and discomfort*)

mit den empirisch ermittelten Daten von LUCKIESH & GUTH (L & G) verglichen, der BCD-Werte für spezielle im Versuch geltende Referenzbedingungen liefert [Luc49]. Insbesondere wird der Einfluss der Umgebungsleuchtdichte und der Objektgröße untersucht. Aus dem Bericht geht deutlich hervor, dass für jede Art der Blendungsbewertung die speziellen Randbedingungen und die fehlende analytische Beschreibung der psychologischen Blendempfindung zu großen Unterschieden führen. So wird beispielsweise die Umgebungsleuchtdichte teilweise unter Einbezug und teilweise unter Ausschluss der Objektleuchtdichte ermittelt. Weiterhin sind die Bewertungsmodelle ausschließlich auf Objekte bestimmter Größen anwendbar und nicht gleichzeitig für sehr kleine und große Objekte gültig. Deutlich werden diese Unterschiede beim Vergleich der Modelle in Abhängigkeit der Umgebungsleuchtdichte und der Größe (vgl. Abb. 2.12) [Cle12].

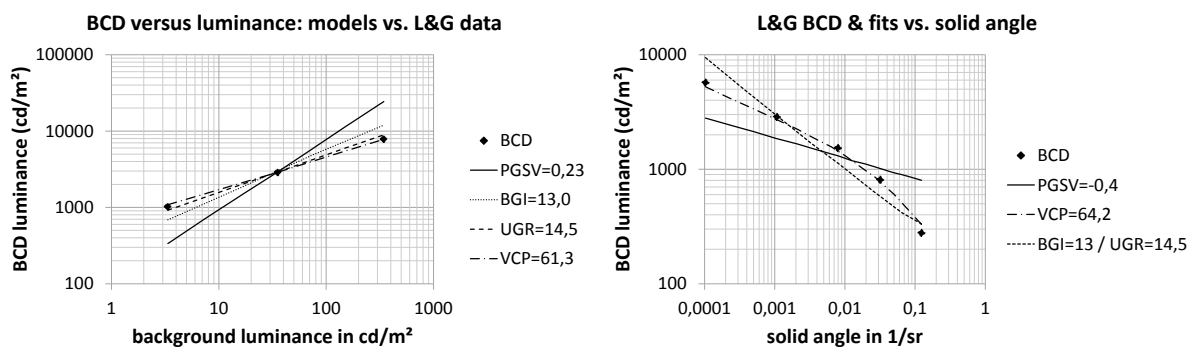


Abbildung 2.12: Vergleich der L & G Messwerte mit verschiedenen Blendbewertungsverfahren in Abhängigkeit der Umgebungsleuchtdichte (links) und der Objektgröße (rechts)(aus [Cle12])

Die Graphen der unterschiedlichen Blendungsbewertungsverfahren wurden entsprechend der besten Annäherung an die L & G Daten aufgetragen. Das heißt die dargestellten Geraden weisen den geringsten quadratischen Fehler zu den vorhandenen Messdaten auf. Der Vergleich zeigt, dass insgesamt nur wenige Verfahren zur Blendungsbewertung eine adäquate Korrelation mit den Datensätzen von L & G aufweisen und untereinander stark variieren (vgl. Abb. 2.12). Das Verfahren, welches am besten zu den Messdaten passt, wurde anhand derselben Daten entwickelt. Die Ableitung spiegelt sich wiederum in der guten Übereinstimmung des Bewertungsverfahrens mit den Messdaten wieder. Die Abweichungen zwischen den Verfahren (z. B. BCD vs. PGSV) sind auf die sehr speziellen Randbedingungen zurückzuführen, die bei jedem einzelnen Bewertungsverfahren zugrunde gelegt werden.

Die große Anzahl der Blendungsbewertungsverfahren (vgl. Abb. 2.12) und deren unterschiedliche Grenzwerte zeigen, dass eine Übernahme eines bestimmten Verfahrens für die Blendungsbewertung durch retroreflektierende Verkehrszeichen nicht zielführend ist. Für die Ermittlung der Grenzwerte zur Blendung durch Schilder sollte daher ein spezieller Versuchsaufbau herangezogen werden, der die individuellen Randbedingungen berücksichtigt.

3 Präzisierte Darstellung der Vorgehensweise

Der aktuelle Stand der Technik und die Einordnung der Problemstellung in den wissenschaftlichen Kontext zeigen, dass die Eigenblendung bei der Entwicklung und Bewertung von Scheinwerfersystemen noch nicht ausreichend berücksichtigt wird. Geeignete Bewertungsrichtlinien und Grenzwerte zur Vermeidung der Eigenblendung liegen ebenfalls nicht vor. Vor diesem Hintergrund soll die Eigenblendung bei Nebel und Schnee und die Eigenblendung an retroreflektierenden Verkehrszeichen bei Fahrten mit Fernlicht bzw. blendfreien Fernlichtassistenten untersucht werden (vgl. Kap. 2.2). Abbildung 3.1 zeigt die inhaltliche Grundstruktur und die methodischen Hauptelemente, die zur Bearbeitung der Aufgabenstellung herangezogen werden.

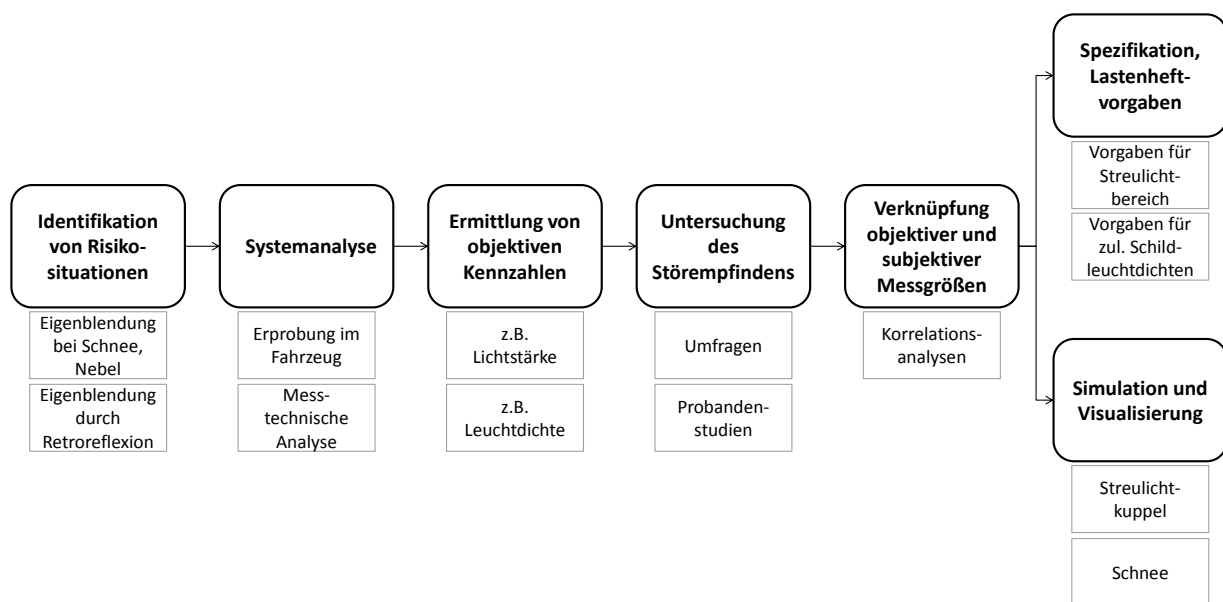


Abbildung 3.1: Vorgehensweise bei den Untersuchungen zur Eigenblendung

Im ersten Schritt werden die Risikosituationen für Eigenblendung identifiziert und theoretisch untersucht. Durch eine umfassende Systemanalyse sollen die Blendungssituationen und Scheinwerferlichtverteilungen durch eigene Erfahrungen, die Erfahrung von Experten und anhand messbarer Größen beschrieben werden. Sie umfasst Erprobungsfahrten (z. B. Fahrten mit blendfreien Fernlichtassistenten und Fahrten bei Nebel) und verschiedene messtechnische Untersuchungen. Messungen werden am Goniofotometer (z. B. Erfassung der Lichtstärkeverteilung im Streulichtbereich) und mit einer ortsauflösenden Leuchtdichtekamera (z. B.

Leuchtdichtevertelung in Nebelsituationen, Messung der Leuchtdichte von Verkehrszeichen) durchgeführt. Die Messungen bilden die Basis für die Ermittlung objektiver Kennzahlen, wie z. B. der mittleren / maximalen Leuchtdichte, Lichtstärke oder Lichtstrom. Die Untersuchung des Störempfindens erfolgt einerseits durch eine Umfrage zu den Erfahrungen, die die Teilnehmer im täglichen Fahrbetrieb mit der Eigenblendung gemacht haben. Andererseits wird das subjektive Störempfinden in den Risikosituationen anhand von Probandenstudien untersucht. Dabei werden sowohl qualitative Merkmale untersucht als auch objektive Grenzwerte ermittelt. Durch eine Korrelationsanalyse wird der Zusammenhang zwischen Störempfinden und messtechnisch erfassbaren bzw. im Versuch gezielt variierten Größen ermittelt. Die Visualisierung und Simulation im Nachtfahrsimulator liefert zudem Werkzeuge zur vergleichenden Bewertung von Lichtverteilungen im Streulichtbereich und bei Fahrten im Schnee. Abschließend können aus den gewonnenen Ergebnissen die entsprechenden Anforderungen bzw. Spezifikationen für die Bewertung und die Reduzierung der Eigenblendung abgeleitet werden.

In Abbildung 3.2 werden die Methoden der drei untersuchten Themengebiete (Eigenblendung durch Streulicht bei Nebel, Schnee und durch Retroreflexion an Schildern) nochmals detaillierter aufgezeigt. Die verschiedenen Themenschwerpunkte sind in der Methodik jeweils ähnlich und weisen daher auch viele vergleichbare Elemente auf, wie beispielsweise die Durchführung von Probandenstudien zur Ermittlung des subjektiven Störempfindens. Deutliche Unterschiede sind jedoch beim Aufbau der Versuchsstände und bei den speziellen Messverfahren zu verzeichnen. Eine genaue Beschreibung der einzelnen Methoden kann den Kapiteln 4 bis 7 entnommen werden. Durch die in Abbildung 3.2 dargestellten Methoden und deren Ergebnisauswertung ist es möglich, robuste, am menschlichen Störempfinden abgeleitete Vorgaben und Spezifikationen zu erarbeiten, und so das Risiko der Eigenblendung zu minimieren.

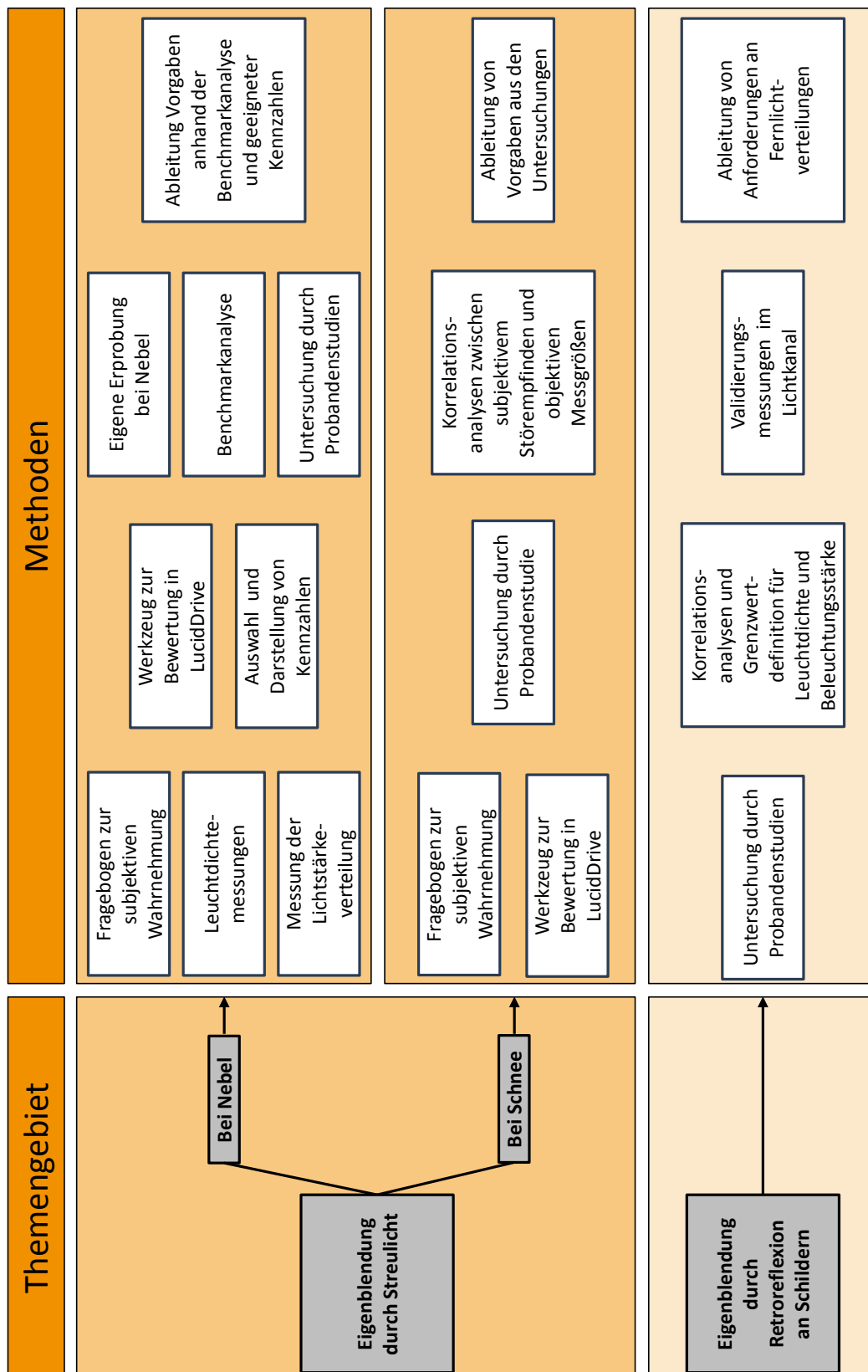


Abbildung 3.2: Themengebiet und Methodik bei den Untersuchungen zur Eigenblendung

4 Umfrage zur Bewertung von Scheinwerfersystemen und zur Eigenblendung

4.1 Ziele und Inhalte der Umfrage

Im Rahmen der Untersuchungen zum Thema Eigenblendung wurde eine Umfrage mit der Bezeichnung „Kunden- und funktionsorientierte Bewertung von Scheinwerfersystemen - Subjektive Wahrnehmung und Störempfinden“ durchgeführt. Die Ziele und Inhalte der Umfrage sollen im Folgenden dargestellt werden.

Das Ziel der Umfrage bestand darin, nähere Informationen zur Wahrnehmung von aktuell im Einsatz befindlichen Scheinwerfer- und Assistenzsystemen hinsichtlich Einsatzhäufigkeit, wahrgenommenem zusätzlichen Nutzen und vorhandenen Störeinflüssen zu erlangen.

Die Ergebnisse der Umfrage werden in Bezug auf folgende Fragestellungen dargestellt:

- In welchen Fahrsituationen ist ihnen ein Scheinwerfersystem besonders positiv/negativ aufgefallen?
- Wie werden Nebelscheinwerfer eingesetzt und wie wird der Zusatznutzen für den Fahrer empfunden?
- In welchem Zusammenhang tritt Eigenblendung bei Nebel und Schnee auf?
- Wie ist der Gesamteindruck von blendfreien Fernlichtassistenten (BFFLA) und welche Störeinflüsse gehen von BFFLA aus?

Nicht dargestellt werden die Fragen zu persönlichen Vorlieben der Studienteilnehmer in Bezug auf die im Scheinwerfersystem eingesetzte Lichtquelle und zum Bekanntheitsgrad/Nutzungsgrad verschiedener Assistenzsysteme. Außerdem wird auf die Darstellung der Fahrzeugnutzung (z. B. jährliche Fahrleistung, Fahrten bei Dunkelheit) verzichtet. Eine vollständige Auflistung des Fragenkatalogs ist im Anhang D zu finden.

4.2 Rahmenbedingungen und Teilnehmerkreis

Die Umfrage wurde in Form einer Onlinebefragung durchgeführt. Der Fragebogen umfasst insgesamt drei Abschnitte (1. Angaben zur Person; 2. Scheinwerfer/Assistenzsysteme allgemein;

3. Einsatz spezieller Lichtfunktionen und Störempfinden), der durchschnittlich in 10-20 Minuten beantwortet wurde. Bei der Erstellung des Fragebogens wurden die drei Aspekte der Objektivität (Durchführungs-, Auswertungs- und Interpretationsobjektivität) zugrunde gelegt (vgl. [Moo11]). Befragt wurden insgesamt 128 Personen verschiedenen Alters und Geschlechts (vgl. Abb. 4.1).

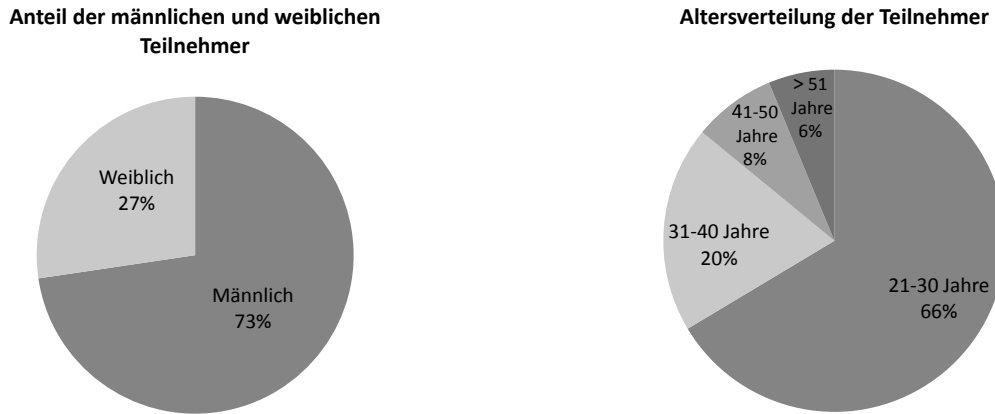


Abbildung 4.1: Geschlecht- und Altersverteilung der Befragten

Die Fragen zur Bewertung des BFFLA wurde nur von Personen beantwortet, die das System bereits selbst getestet haben. Dadurch verringert sich die Anzahl der Personen für diesen Teil der Umfrage auf 38. Die Befragten waren vorwiegend Mitarbeiter der BMW Group in München aus unterschiedlichen Fachabteilungen. Alle Angaben in Prozent beziehen sich jeweils auf die Gesamtanzahl der Befragten (128 bzw. 38). Fragen, bei denen Mehrfachnennungen möglich sind, werden kenntlich gemacht.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Positive und negative Erfahrungen mit Scheinwerfersystemen

Als besonders positiv wird bei Scheinwerfersystemen das dynamische Kurvenlicht, das Abbiegelicht, das Nebellicht, der Fernlichtassistent, der blendfreie Fernlichtassistent und das gezielte Anleuchten genannt. Der blendfreie Fernlichtassistent wird insgesamt 16 mal und damit nach dem dynamischen Kurvenlicht am zweithäufigsten besonders positiv hervorgehoben. Als Begründung wird beispielsweise „angenehmes“ Fahren und eine „dauerhaft gute Ausleuchtung der Fahrbahn ohne den Gegenverkehr zu blenden“ genannt.

Als besonders negativ werden verschiedene Situationen unter Angabe des Scheinwerfersystems genannt, wobei zwischen Systemen mit Halogen-, Hochdruckentladungslampen und Leuchtdioden unterschieden wird. Halogenscheinwerfer sind häufig in gewöhnlichen Fahrsituationen,

wie z. B. auf Autobahnen/Landstraßen, Straßen im Wald, bei Regen oder Schnee aufgrund schlechter Ausleuchtung oder einer geringen Reichweite negativ empfunden worden. Hochdruckentladungslampen werden vorwiegend wegen der Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge und der hohen Kosten kritisiert. LED-Systeme wurden beispielsweise bei Schneefall oder aufgrund ihrer inhomogenen Ausleuchtung („fleckig“) kritisiert. Das Nebellicht wurde negativ erwähnt, weil bei Fahrten im Nebel mit zugeschaltetem Nebellicht kein Vorteil bzw. Mehrwert erkennbar war. Der automatische Fernlichtassistent wurde wegen Fehlfunktionen beanstandet oder aufgrund von nicht automatisch erkannten Witterungsbedingungen (Nebel, Schnee). Zweimal wurde auch die Unruhe der Lichtverteilung beim Einsatz von BFFLA bemängelt, die durch Zu- und Abschaltvorgänge und den variablen Schattentunnel des maskierten Dauerfernlichts hervorgerufen wird.

4.3.2 Nutzungsverhalten und Zusatznutzen von Nebelscheinwerfern

Die Frage „Nutzen Sie Ihre Nebelscheinwerfer regelmäßig“ haben 35 % der Befragten mit Ja beantwortet. 47 % der Befragten haben mit Nein geantwortet, 17 % mit mein Fahrzeug hat keine Nebelscheinwerfer und 1 % hat sich enthalten. Das Nutzungsverhalten ist dabei sehr unterschiedlich wie Abbildung 4.2 zeigt. Demnach werden die Nebelscheinwerfer einerseits bei leichtem und dichtem Nebel, andererseits sowohl bei Regen, Schnee oder in Situationen ohne Nebel eingesetzt. Bei dieser Frage waren Mehrfachnennungen möglich.

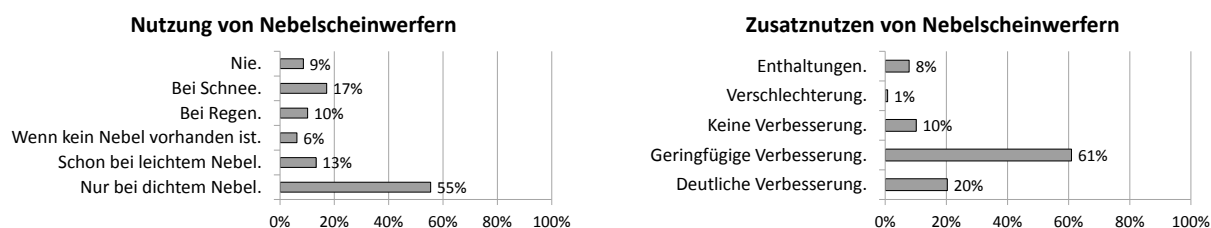


Abbildung 4.2: Umfrageergebnisse zur Nutzung von Nebelscheinwerfern

Der Einsatz der Nebelscheinwerfer und die Auswirkungen auf die Sichtbedingungen werden weitgehend als positiv gesehen. Über 80 % der Befragten erkennen eine geringfügige oder deutliche Verbesserung. Lediglich 10 % der Befragten empfinden beim Einsatz der Nebelscheinwerfer „Keine Verbesserung“ (vgl. Abb. 4.2).

4.3.3 Eigenblendung bei Nebel oder Schnee

Auf die Frage „Haben Sie bereits Fahrsituationen im Nebel oder bei Schnee erlebt, in denen Sie sich von Ihrem eigenen Scheinwerfer gestört gefühlt haben (z. B. Blendung durch Reflexion an Schneeflocken, Streulicht im Nebel)?“ haben 66 % der Befragten mit Ja geantwortet und 32 % mit Nein (2 % Enthaltung). In der Begründung wurde von 26 % der Personen, die mit Ja

geantwortet haben, angegeben, dass die Störung bei Nutzung des Abblendlichts aufgetreten ist. Dabei wurde sowohl die Eigenblendung bei Schneefall durch Reflexion an Schneeflocken als auch die Eigenblendung durch Streulicht bei Nebel mehrmals angesprochen.

4.3.4 Bewertung blendfreier Fernlichtassistenten

Der BFFLA wird von 89 % der Befragten als gut oder sehr gut empfunden, 11 % finden das System mittelmäßig. Die Bewertung „Schlecht“ wurde nicht vergeben. Als störend wird hauptsächlich eine zu langsame Reaktionszeit (34 %) sowie Eigenblendung an retroreflektierenden Schildern (24 %) genannt. Weiterhin werden noch andere störende Effekte wie beispielsweise „das Gefühl den anderen zu blenden“ oder „Irritationen durch schlagartiges Ansprechen“ genannt.

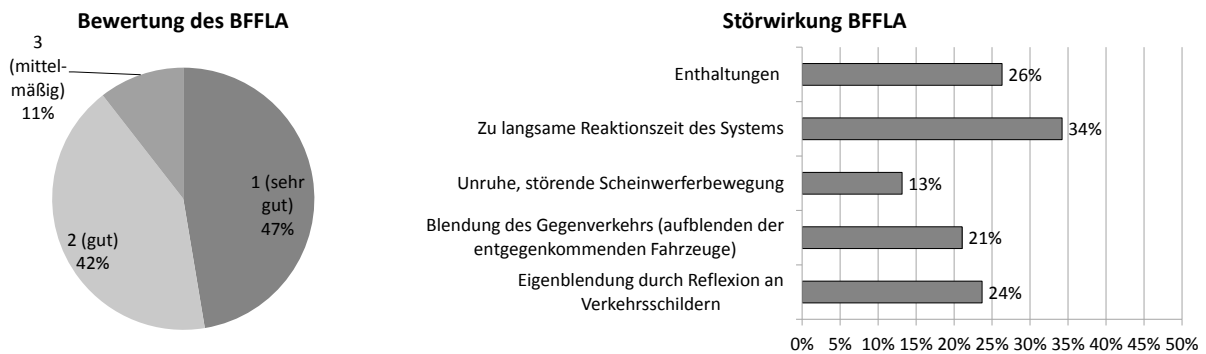


Abbildung 4.3: Umfrageergebnisse zur Bewertung blendfreier Fernlichtassistenten

4.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Umfrage zeigen, dass viele dynamische Lichtsysteme als sehr positiv und hilfreich empfunden werden. Gleichzeitig werden jedoch auch Schwächen wie die Eigenblendung, die Steigerung der Lichtleistung bei einigen Systemen oder die Kosten kritisiert. Daraus lassen sich Anforderungen an die (Weiter-)Entwicklung ableiten.

Die Ergebnisse zu besonders positiven und negativen Erfahrungen müssen unter dem Aspekt betrachtet werden, dass vorwiegend Personen befragt wurden, die häufig oder ausschließlich Fahrzeuge der Marke BMW oder Mini fahren und somit nur einen eingeschränkten Wettbewerbsvergleich haben. Ein allgemeingültiger Rückschluss auf negative Eigenschaften von Scheinwerfersystemen mit bestimmten Lichtquellen, lässt sich aus den Umfrageergebnissen nicht ableiten, da der subjektive Eindruck auch maßgeblich vom Gesamtsystem abhängig ist (Lichtstärkeverteilung, Gesamtlichtstrom, optisches Konzept), dieses jedoch von den Befragten

nicht detailliert beschrieben wurde. Dennoch liefern die Ergebnisse sinnvolle Ansatzpunkte für Optimierungsmaßnahmen und weitere Untersuchungen.

Die Zusatznebelscheinwerfer stellen für die Befragten ein sinnvolles Element am Fahrzeug dar, deren zusätzlicher Nutzen auch wertgeschätzt wird. Eine Erleichterung für den Fahrer würde eine automatische Erkennung der Wettersituation mit sich bringen. Durch eine automatische Aktivierung der Nebelscheinwerfer werden die Situationen vermieden, bei denen der Einsatz der Nebelscheinwerfer nicht notwendig ist. Dadurch kann Energie eingespart werden. Die automatische Aktivierung der Nebelscheinwerfer in Situationen, in denen es sinnvoll ist, hilft dem Fahrer, rechtzeitig die bestmögliche Ausleuchtung der Straße durch das Scheinwerfersystem sicherzustellen. Die Umfrage hat gezeigt, dass fast die Hälfte der Befragten die Nebelscheinwerfer nicht regelmäßig nutzen. Daher werden Ansätze zur Detektion von Nebelsituationen durch Kamerasysteme empfohlen, was grundsätzlich möglich und auch Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten ist. In naher Zukunft sind diese Systeme mit großer Wahrscheinlichkeit flächendeckend einsatzbereit [Ber13].

Die Gefahr der Eigenblendung wird auch aus den Umfrageergebnissen deutlich. Der hohe Anteil der Befragten, die sich bei Nebel oder Schnee durch Streulicht gestört fühlen, zeigt die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen und liefert eine validierte Motivation zum Forschungsgegenstand dieser Arbeit.

Auch die Eigenblendung durch blendfreie Fernlichtassistenten wird in der Umfrage bestätigt. Durch den Einsatz von sehr leistungsstarken Lichtquellen wie LEDs oder laseraktiviertem Leuchtstoff wird das Risiko der Eigenblendung noch weiter steigen. Ansätze zur Vermeidung der Eigenblendung müssen daher erarbeitet werden.

5 Untersuchungen zur Bewertung von Streulicht bei Nebel

5.1 Zielstellung und Methodenübersicht

Ziel der Untersuchungen ist es, objektive Erkenntnisse über die Entstehung, die Menge, die Verteilung und die Auswirkungen von Streulichtanteilen im Nebel zu erlangen. Im Mittelpunkt der messtechnischen Untersuchungen stehen die Hauptscheinwerfer im Abblendlichtbetrieb und die verschiedenen Ausprägungen des Streulichtbereichs, der in Kapitel 2.3 spezifiziert wurde. Durch den Aufbau eines Versuchsstandes im Labor sollen nebelähnliche Bedingungen reproduzierbar nachgebildet werden. Der Aufbau wird genutzt, um den Einfluss von Streulicht in unterschiedlichen Winkelbereichen auf das subjektive Störeempfinden in einer Probandenstudie zu ermitteln.

Bei den Untersuchungen kommen verschiedene Methoden zur Analyse und Bewertung von Streulicht bei Nebel zum Einsatz. Eine detaillierte Beschreibung der Methoden ist in den entsprechenden Unterkapiteln zu finden. Im Folgenden werden die Methoden zum besseren Verständnis in einer Übersicht aufgelistet:

- Messtechnische Erfassung und Auswertung von Nebelsituationen mit einer ortsauflösenden Leuchtdichtkamera.
- Messtechnische Erfassung und Auswertung einer Reihe von Abblendlichtverteilungen im Streulichtbereich am Goniofotometer.
- Untersuchung der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Streulichtreduzierung.
- Untersuchung des subjektiven Störeempfindens von Streulicht bei Nebel in einer Probandenstudie im Labor.

5.2 Messtechnische Erfassung und Auswertung von Nebelsituationen

5.2.1 Methode

Die messtechnische Erfassung von Nebelsituationen erfolgt durch Messungen mit einer ortsauflösenden Farb- und Leuchtdichtekamera der Firma TechnoTeam vom Typ *LMK 98-3 Color*. Die Kamera nutzt CCD-Sensoren und Vollglasfilter für die $V(\lambda)$ -Anpassung. Für die Normlichtart A wird damit ein Messfehler von weniger als 3% erreicht (vgl. Datenblatt Anhang C) [Bae06], [Krü05]. Bei den Messungen wurde das zugehörige Objektiv mit einer Brennweite von 16 mm verwendet. Mit einer Größe des CCD-Sensors von 8,90 mm Breite und 6,64 mm Höhe ergibt sich ein erfassbarer Winkelbereich von $\pm 16,1^\circ$ horizontal und $\pm 12,0^\circ$ vertikal. Die Auswertung erfolgte mit der zugehörigen Auswertesoftware *LMK LabSoft*. Die Aufnahmen wurden aus der Fahrer- bzw. Beifahrerperspektive gemacht. Um dies zu realisieren wurde die Kamera mit einer speziell für diesen Fall konstruierten Halterung an der Kopfstütze des Fahrer- bzw. Beifahrersitzes befestigt und in Fahrtrichtung ausgerichtet. Die Kameraposition stimmt bei diesem Aufbau mit der üblichen Kopf-Position des Fahrers/Beifahrers überein. Vergleichsmessungen werden in möglichst kurzen Abständen hintereinander durchgeführt, um den Einfluss von wechselnden Wetterbedingungen so gering wie möglich zu halten. Insgesamt werden zwei Fahrzeuge an unterschiedlichen Orten und Tagen untersucht. Zum Zeitpunkt beider Messungen war der Nebel dicht und gleichmäßig mit Sichtweiten von 100 bis 150 m und die Fahrbahn war trocken.

Untersucht werden zum einen verschiedene Lichtverteilungen eines adaptiven LED-Scheinwerfers (BMW 7er, Bj. 2012). Die Generierung der Lichtverteilung wird über die Änderung der Schalterstellung bzw. durch Aktivierung des Fernlichts im Fahrzeug realisiert. Die Lichtverteilungen entsprechen dem Serienstand des Fahrzeugs. Messzeitpunkt war der 21.11.2012 um 23:30 Uhr. Zum anderen wird ein LED-Scheinwerfer eines Mini Coopers (Bj. 2014) mit abnehmbaren Blenden über dem Scheinwerfer ausgestattet, welche das Streulicht nach oben hin abschatten. Das Fahrzeug hat eine ausgeprägte Streulichtcharakteristik. Die Scheinwerfer entsprechen nicht dem Serienstand des Fahrzeuges. Messzeitpunkt war der 04.02.2014 um 19:30 Uhr. Beide Messungen wurden im Großraum München in der Nähe von Aschheim durchgeführt. Die Darstellung der Messungen erfolgt in Falschfarbendarstellung und logarithmischer Skalierung.

5.2.2 Ergebnisse

Der Vergleich der ortsauflösenden Leuchtdichtemessung einer Schlechtwetterlicht-, Landstraßenlicht- und Fernlichtverteilung eines adaptiven LED-Scheinwerfers (BMW 7er, Bj. 2012) ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Der für die Auswertung herangezogene Streulichtbereich und der Randbereich der Lichtverteilung sind in der Abbildung jeweils durch Rechtecke markiert und mit einer Nummerierung gekennzeichnet (1: Streulichtbereich, 2: Randbereich).

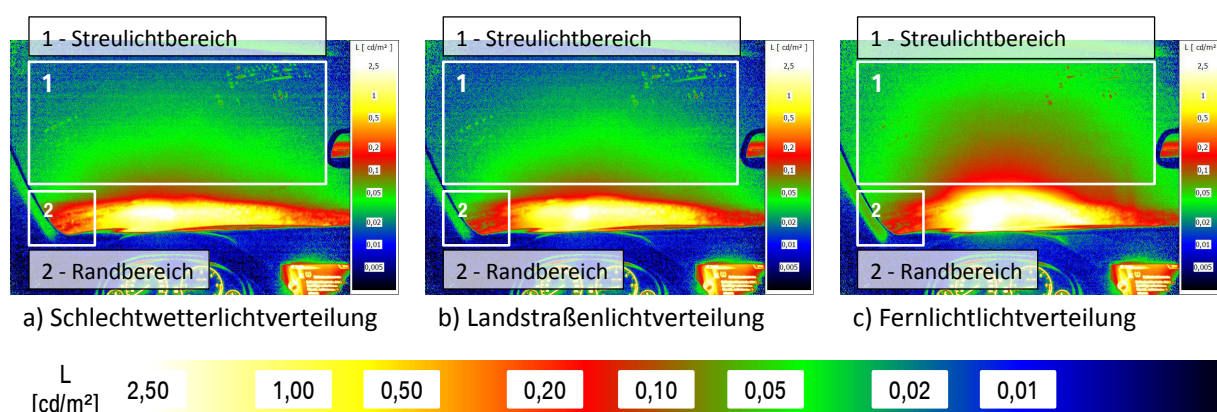


Abbildung 5.1: Vergleich von Schlechtwetterlicht, Landstraßenlicht und Fernlicht bei Nebel

Man erkennt zum einen, dass der Randbereich der Schlechtwetterlichtverteilung im Vergleich zur Landstraßen- und Fernlichtverteilung eine bessere Ausleuchtung erfährt (Bereich 2 in Abb. 5.1). Die Schlechtwetterlichtverteilung erzeugt eine mittlere Leuchtdichte von $0,133 \text{ cd m}^{-2}$ wohingegen die Landstraßenlichtverteilung lediglich einen Wert von $0,076 \text{ cd m}^{-2}$ erreicht. Auch die Maximalwerte der Leuchtdichte haben im Randbereich der Lichtverteilung ein ähnliches Verhältnis mit $0,593 \text{ cd m}^{-2}$ für die Schlechtwetterlichtverteilung und $0,276 \text{ cd m}^{-2}$ für die Landstraßenlichtverteilung.

Im Streulichtbereich (Bereich 1 in Abb. 5.1) ist beim Vergleich der Schlechtwetterlichtverteilung, die eine mittlere Leuchtdichte von $0,032 \text{ cd m}^{-2}$ aufweist, und der Landstraßenlichtverteilung, die eine mittlere Leuchtdichte von $0,031 \text{ cd m}^{-2}$ aufweist, kein deutlicher Unterschied festzustellen. Im Fernlichtbetrieb ist der Streulichtbereich deutlich aufgehellt und weist eine mittlere Leuchtdichte von $0,059 \text{ cd m}^{-2}$ auf.

Die Leuchtdichteverteilung innerhalb des Streulichtbereichs wird anhand des Grauerthistogramms in Abbildung 5.2 deutlich. Hier wird die Leuchtdichte auf der Abszisse und die Anzahl der Bildpunkte auf der Ordinate dargestellt.

In Abbildung 5.2 wird ein nahezu identischer Verlauf des Grauerthistogramms bei der Schlechtwetter- und Landstraßenlichtverteilung ausgewiesen. Deutliche Unterschiede ergeben sich im Vergleich zum Fernlicht. Das Maximum des Grauerthistogramms verschiebt sich beim Fernlicht hin zu höheren Leuchtdichtewerten (bei Schlechtwetter-/Landstraßenlicht

$\approx 0,02 \text{ cd m}^{-2}$, bei Fernlicht $\approx 0,04 \text{ cd m}^{-2}$). Die Leuchtdichtewerte konzentrieren sich bei der Schlechtwetter- und Landstraßenlichtverteilung vorwiegend auf einen Bereich von 0 bis $0,1 \text{ cd m}^{-2}$. Bei der Fernlichtverteilung liegen die Werte in einem Bereich von 0 bis $0,15 \text{ cd m}^{-2}$. Maximal werden Werte von $0,36 \text{ cd m}^{-2}$ erreicht.

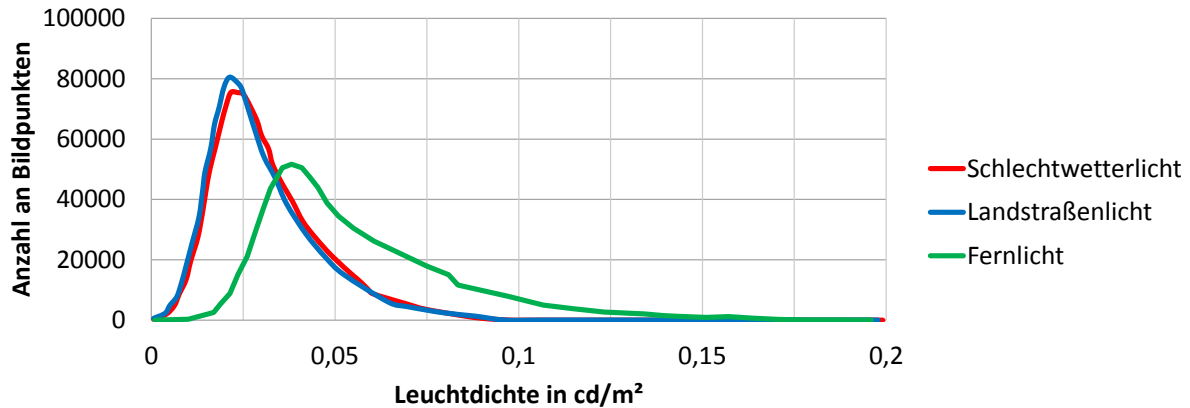


Abbildung 5.2: Grauwerthistogramm der Leuchtdichteaufnahmen im Streulichtbereich

Der Vergleich der ortsauflösenden Leuchtdichtemessung eines Abblendlichts eines LED-Scheinwerfers (Mini Cooper, Bj. 2014) mit und ohne Abschattung des Streulichts bei Nebel ist in Abbildung 5.3 a) und b) dargestellt. Abbildung 5.3 c) zeigt das Differenzbild der beiden Aufnahmen. Dieses wird mittels Subtraktion der Leuchtdichtematrix A und B berechnet. Es wird also jeweils der Leuchtdichtewert eines Bildpunktes aus Bild b) vom Leuchtdichtewert des entsprechenden Bildpunktes aus Bild a) abgezogen.

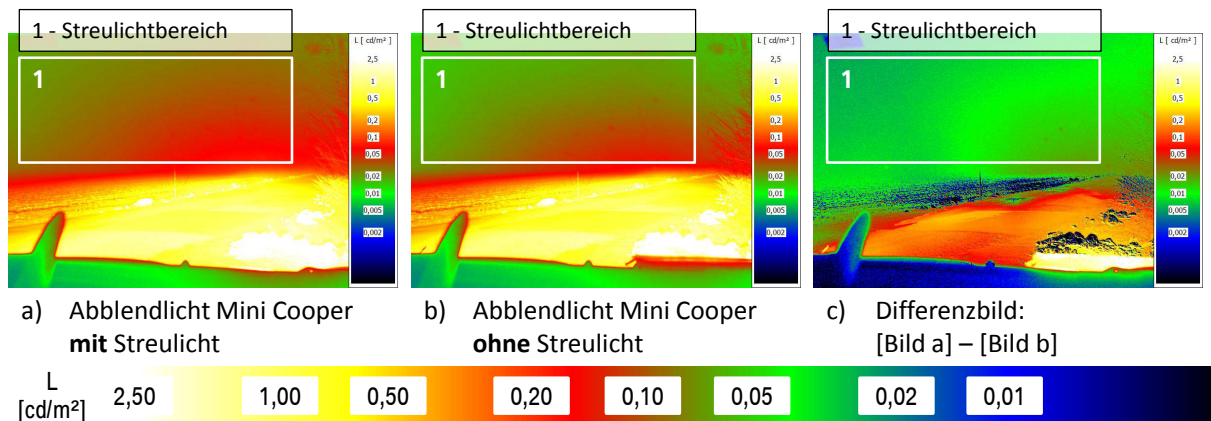


Abbildung 5.3: Vergleich einer Abblendlichtverteilung mit und ohne Streulichtabschattung

Das Differenzbild zeigt, dass die Umgebung im Streulichtbereich für die Messung a) „Abblendlicht Mini Cooper **mit** Streulicht“ um $0,05$ bis $0,1 \text{ cd m}^{-2}$ heller ist als für die Messung b) „Abblendlicht Mini Cooper **ohne** Streulicht“. Die Fahrbahnoberfläche selbst hat eine mittlere Helligkeit von $1,1 \text{ cd m}^{-2}$ für Abbildung 5.3 a) und $0,9 \text{ cd m}^{-2}$ für Abbildung 5.3 b).

5.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Untersuchungen belegen grundsätzlich die negativen Effekte von Streulicht bei Nebel, nämlich die Aufhellung der Nebeltröpfchen (Wasserpartikel) im Fahrersichtfeld, welche zu einer Kontrastminderung führt. Für die abgebildeten Situationen war es möglich, diese durch objektive Messwerte zu quantifizieren. Am besten werden die negativen Effekte von Streulicht durch die Messung der Fernlichtverteilung deutlich (Abb. 5.1 c), bei der eine sehr hohe Leuchtdichte über dem Horizont eine deutliche Sichtverschlechterung mit sich bringt. Eine Ableitung von Grenzwerten ist anhand der Messungen nicht möglich, da im realen Umfeld nie stationäre Bedingungen herrschen und die experimentellen Rahmenbedingungen wie Nebeldichte, Temperatur, etc. zum Versuchszeitpunkt nicht eindeutig spezifiziert werden konnten. Aufgrund der wechselhaften Bedingungen, die teilweise innerhalb von wenigen Minuten die Nebelverhältnisse stark veränderten, konnten keine Untersuchungen der subjektiven Störimpfindung im realen Umfeld stattfinden.

Die Verteilung der Leuchtdichte im Streulichtbereich ist bei der Schlechtwetterlichtverteilung nahezu identisch mit der Landstraßenlichtverteilung. Dies wird im Grauerthistogramm deutlich, in dem sich beide Kurven überlagern (vgl. Abb. 5.2). Der Vorteil der Schlechtwetterlichtverteilung gegenüber der Landstraßenlichtverteilung wird in Abbildung 5.1 a) und b) deutlich. Die Gründe sind eine bessere Ausleuchtung des Randbereichs im Fahrersichtfeld bei gleichbleibender Leuchtdichte im Streulichtbereich.

Aufgrund der niedrigen Fahrbahnleuchtdichte bei Nacht von ca. $1,1 \text{ cd m}^{-2}$ und typischen Umgebungsleuchtdichten von $0,01 \text{ cd m}^{-2}$ bis $0,03 \text{ cd m}^{-2}$ auf trockenen Landstraßen (vgl. [Fra94]), kann die Streuleuchtdichte, die bei der Messung in Abbildung 5.3 zu einer Aufhellung von bis zu $0,1 \text{ cd m}^{-2}$ geführt hat, einen erheblichen Einfluss auf die Objekterkennung haben.

Bei den Versuchsfahrten im Nebel, die vor den Leuchtdichtemessungen stattgefunden haben, ist subjektiv keine direkte störende Wirkung aufgetreten, obwohl beide Testfahrzeuge eine sehr ausgeprägte Streulichtverteilung mit vergleichsweise hohen Streulichtwerten aufweisen. Abbildung 5.4 zeigt die Lichtstärkeverteilungen der beiden Versuchsfahrzeuge im Vergleich. Das bedeutet, dass die anhand der Messungen belegte Kontrastreduzierung aufgrund der gleichmäßigen Verteilung der Streuleuchtdichte im Fahrersichtfeld keine Störwirkung verursachte. Der verminderte Kontrast war örtlich und zeitlich konstant und aufgrund der nicht vorhandenen Referenzlichtverteilung ohne Streulicht für den Fahrer nicht wahrnehmbar. Betrachtet man den Mini Cooper außerhalb des Fahrzeugs von der Seite, ist eine helle Streulichtkeule, also eine örtliche Inhomogenität, in senkrechter Richtung nach oben deutlich erkennbar. Diese ist auch in der Lichtverteilung in Abbildung 5.4 b) erkennbar, die im oberen Drittel der Lichtverteilung (zwischen $V=60^\circ$ und $V=100^\circ$) eine hohe Lichtstärke ausweist.

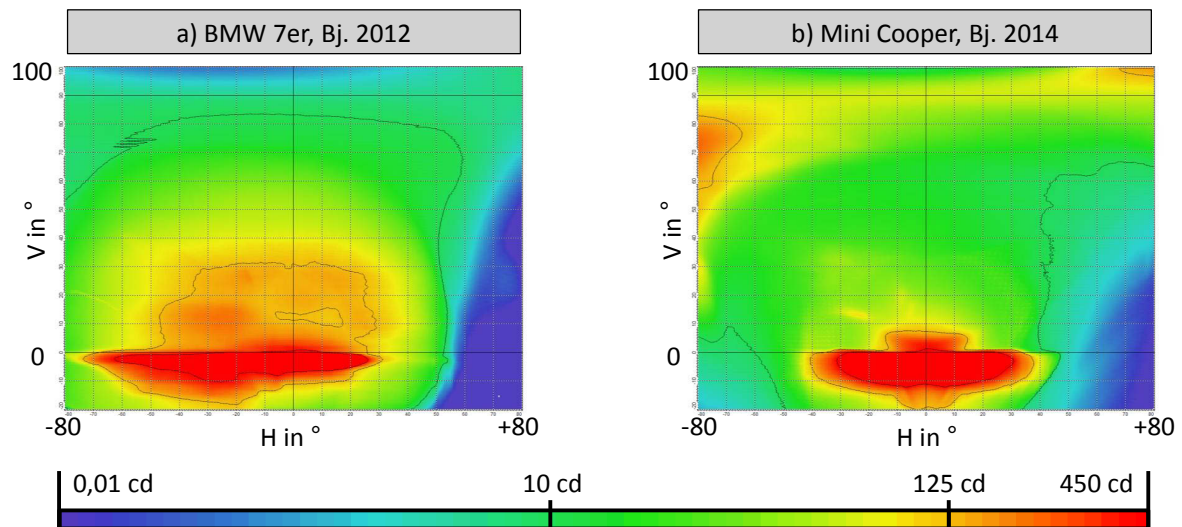


Abbildung 5.4: Streulichtverteilung der Versuchsfahrzeuge zur messtechnischen Erfassung von Nebelsituationen

Auch bei hoher Lichtstärke kann diese Wirkung vom Fahrzeugführer nur in einem direkten Vergleich wahrgenommen werden (z. B. beim Wechsel zwischen zwei Fahrzeugen). Andernfalls kann der Fahrer nicht unterscheiden, ob die schlechte Sicht maßgeblich durch die Witterungsbedingungen oder maßgeblich durch das Streulicht seines eigenen Scheinwerfers beeinflusst wird. Dies zeigt, dass die Risiken der Kontrastminderung besonders kritisch sind, da sie häufig nur im direkten Vergleich sichtbar werden, also eine verborgene Gefahr darstellen. Bei Nebel kann daher Eigenblendung und damit eine potentielle Verminderung der Erkennungswahrscheinlichkeit von Objekten auch dann entstehen, wenn der Fahrzeugführer keine subjektive Störung empfindet.

5.3 Messtechnische Bewertung einer Reihe von Abblendlichtverteilungen am Goniometer

5.3.1 Methode

Die Analyse von Abblendlichtverteilungen im Streulichtbereich erfolgt durch eine Messreihe an einem Goniometer der Firma Optronik vom Typ *SMS-10h*. Dieses besteht aus einem Gestell und mehreren Fotometern. Das Gestell ermöglicht einerseits die Montage und andererseits die Drehung eines Scheinwerfers um die horizontale Achse in einem Schwenkbereich von $\pm 200^\circ$ und einer Positioniergenauigkeit von $0,020^\circ$ und um die vertikale Achse in einem Schwenkbereich von $\pm 100^\circ$ mit einer Genauigkeit von $0,023^\circ$. Die Genauigkeit ist dem Prüfzertifikat, das bei der Kalibrierung erstellt wurde, entnommen worden. Die kleinstmögliche Winkel-Auflösung liegt bei $0,01^\circ$. Es verfügt über drei Fotometer in den Entfernungen 5 m, 10 m und 25 m zur Messung der Beleuchtungsstärke und Ermittlung der Lichtstärke. Bei allen Messungen wurde das Fotometer in einer Entfernung von 25 m verwendet. Die Messgenauigkeit bei einer Kalibrierung mit einer Lichtstärke-Normlampe der Normlichtart A ergibt eine Abweichung von maximal 0,02 %. [Ins07], [Ins13]

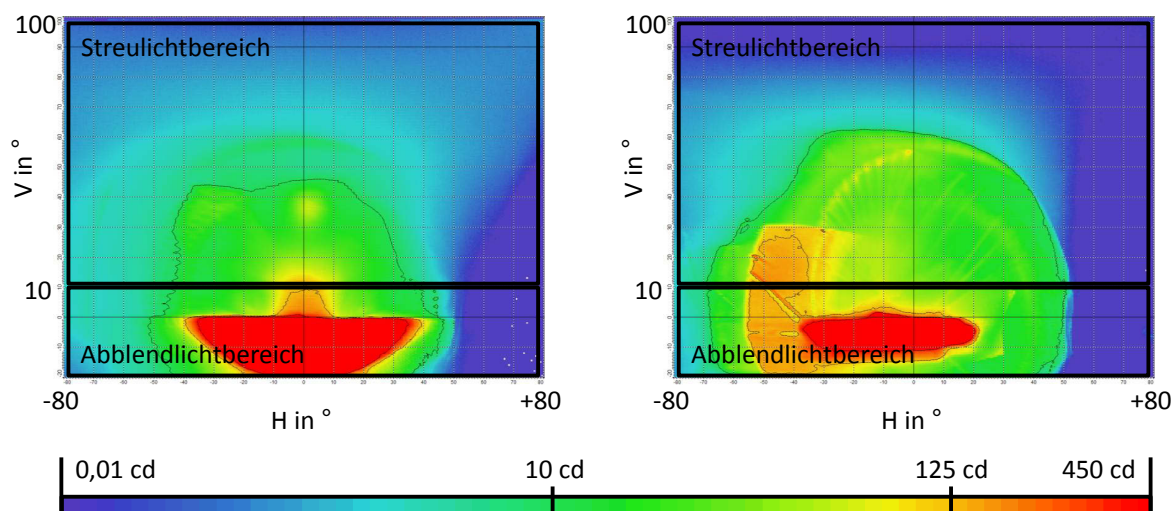


Abbildung 5.5: Beispiele für Rastermessung der Lichtstärkeverteilung am Goniometer (Abblendlicht mit erweitertem Streulichtbereich)

Erfasst wurden die Lichtstärkeverteilungen verschiedener Hauptcheinwerfer bei Abblendlichtbetrieb (vgl. Abb. 5.5). Die Messungen erfolgten in einem horizontalen Winkelbereich (H) von -80° bis $+80^\circ$ und einem vertikalen Winkelbereich (V) von -20° bis $+100^\circ$. Das Raster der Messung hat eine Schrittweite von $0,5^\circ$ in horizontaler und vertikaler Richtung. Die Darstellung der Lichtstärkeverteilung erfolgt in einer entzerrten Abwicklung des Lichtstärkeverteilungskörpers (LVK) in Falschfarben mit logarithmischer Skalierung in einem Bereich von $0,01$ bis 450 cd . Ab-

bildung 5.5 zeigt beispielhaft zwei Messungen aus der Reihe und teilt die Lichtstärkeverteilung in die Bereiche Abblendlicht- und Streulichtbereich.

Die Gegenüberstellung der Lichtstärkeverteilungen gibt Aufschluss über die charakteristischen Merkmale im Streulichtbereich. Anhand der Messdaten werden Kennzahlen für den Streulichtbereich ermittelt, die unterschiedliche Scheinwerfer-Technologien objektiv beschreiben. Diese Werte werden anschließend zum Aufstellen einer Rangordnung (Ermittlung eines Maßstabs) und Einordnung beliebiger Scheinwerfer herangezogen. Außerdem können die Lichtstärkeverteilungen und Kennzahlen für die weiteren Untersuchungen genutzt werden (z. B. Streulichtuntersuchung bei Schnee).

5.3.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyse von Abblendlichtverteilungen im Streulichtbereich dargestellt.

Klassifizierung der Streulichtverteilungen

Die Lichtverteilungen weisen im Streulichtbereich ($H=[-80; 80]$; $V=[10; 100]$; Winkelangabe in Grad) insgesamt große Unterschiede auf. Dies liegt vor allem an der unterschiedlichen geometrischen Gestaltung und der Ausführung der Oberflächen der untersuchten Scheinwerfer. Typische Ausprägungen des Streulichts, die eine Klasseneinteilung ermöglichen, sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Bezeichnung HAL bedeutet, dass es sich um einen Scheinwerfer mit Halogenglühlampentechnik handelt. Scheinwerfer, die mit dem Vorsatz LED gekennzeichnet sind verwenden LEDs als Leuchtmittel und HID ist bei Scheinwerfern mit Hochdruckentladungslampen vorangestellt. Auf die Unterschiede in der Abblendlichtverteilung im Winkelbereich von $V < 10^\circ$ wird an dieser Stelle nicht eingegangen. Eine vollständige grafische Übersicht der Lichtstärkeverteilungen aller 22 Scheinwerfer dieser Messreihe können Anhang E.1 entnommen werden.

Abbildung 5.6 zeigt vier typische Ausprägungen der Verteilung im Streulichtbereich (Klasse A, B, C, D). Klasse A zeigt eine Ausleuchtung des gesamten Streulichtbereichs ohne deutliche Inhomogenitäten. Dabei können durchaus Unterschiede in der Intensität auftreten, welche jedoch durch niedrige Gradienten gekennzeichnet sind. Klasse B zeigt eine Ausleuchtung des gesamten Streulichtbereichs und zusätzlich hohe Gradienten, also starke, örtlich nah beieinanderliegende Unterschiede der Lichtstärke. Diese sind in Abbildung 5.6 (B1, B2) sichelförmig im Bereich von $V=[10; 55]$ Grad bei Scheinwerfer HAL 01 (oben) bzw. punktförmig im Bereich $V=[50; 100]$ Grad bei Scheinwerfer LED 07 (unten) zu sehen. Klasse C zeigt einen geringen Streulichtanteil im Bereich $V=[10; 30]$ Grad und oberhalb von 30° einen verschwindend geringen Anteil. Klasse D zeigt eine Ausprägung, die vor allem bei Reflektorsystemen mit Halogenglühlampen aufgetreten ist. Im Bereich $V=[10; 30]$ Grad ist eine einseitige Streulichtanhäufung mit hohen Gradienten ($H > 30^\circ$ bei Rechtsanbau, $H < -30^\circ$ bei Linksanbau) zu erkennen.

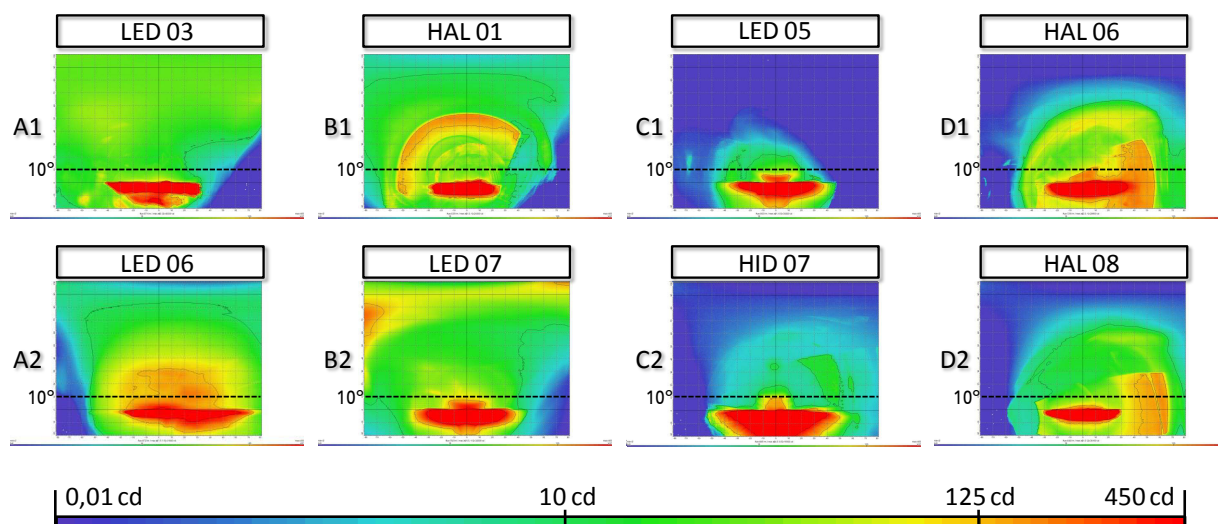


Abbildung 5.6: Einteilung der Lichtverteilung im Streulichtbereich nach charakteristischen Eigenschaften

Darstellung objektiver Kennzahlen

Neben der qualitativen Beschreibung der Lichtverteilung im Streulichtbereich können aus den Messdaten auch quantitative Kennzahlen ermittelt werden. Im Folgenden sind die Kennzahlen Maximalwert (MAX), 95 % Quantil (Q95) und arithmetischer Mittelwert (MW) der Lichtstärke im Streulichtbereich für alle Scheinwerfer dieser Messreihe in Abbildung 5.7 dargestellt. Neben den häufig in gesetzlichen Regelungen geforderten Maximalwerten (vgl. Kap. 2.5.1) bildet das 95 % Quantil eine gegenüber Ausreißern deutlich robustere Größe. Die Ergebnisdarstellung erfolgt dabei unabhängig von den vorher definierten Klassen.

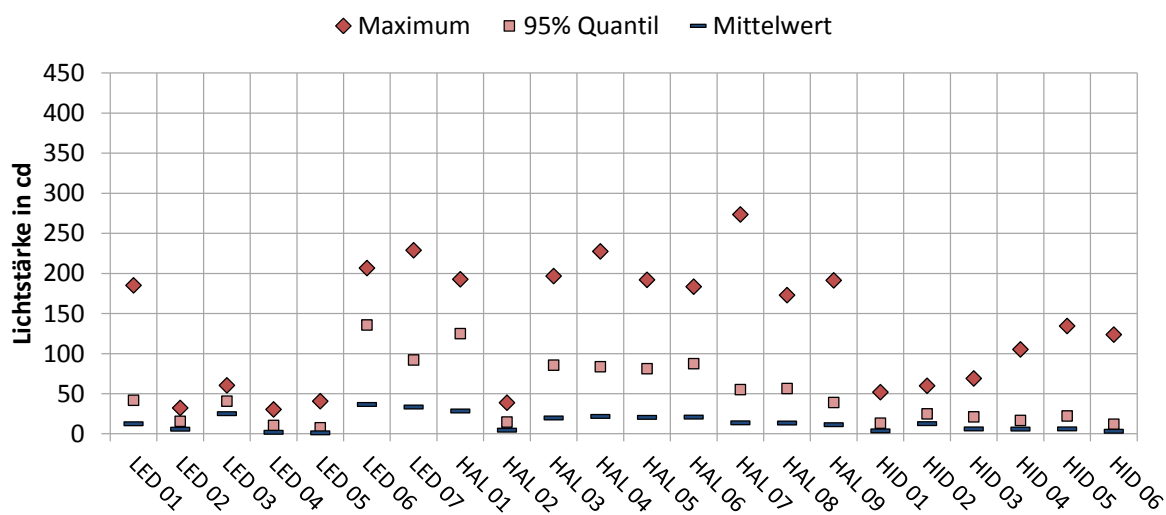


Abbildung 5.7: Übersicht der Kennzahlen Maximum (MAX), 95 % Quantil (Q95) und Mittelwert (MW) der Lichtstärke im Streulichtbereich

Insgesamt sehr niedrige Streulichtwerte (MAX, Q95 und MW) weisen die Scheinwerfer LED 02 und HAL 02 auf. Die Scheinwerfer LED 02, HAL 02, LED 03 und LED 04 sind dadurch gekennzeichnet, dass die drei Kennzahlen sehr nahe zusammen liegen, also keine große Streuung aufweisen. Besonders große Unterschiede zwischen Maximalwert und 95 % Quantil weisen beispielsweise die Scheinwerfer HAL 07 und LED 07 auf (vgl. Abb. 5.7).

Die unterschiedlichen Ergebnisse der Kennzahlen in Höhe und Streuung spiegeln die unterschiedliche Gestaltung der verwendeten Scheinwerfer in Bezug auf die Form der Abdeckscheibe (z. B. flach, steil) und die Gestaltung von Zierblenden (z. B. glänzend, matt) wieder. Obwohl Halogen-Glühlampen insgesamt einen deutlich niedrigeren Lichtstrom emittieren als HID-Lampen, weisen diese im Rahmen der Untersuchungen die höchsten Maximalwerte im Streulichtbereich auf. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Lichtquelle und den Kennzahlen kann daraus allerdings nicht abgeleitet werden, da nicht die Lichtquelle alleine die Entstehung von Streulicht beeinflusst, sondern das gesamte optische System und die bereits erwähnte Gestaltung des Scheinwerfers.

Im Folgenden wird der Lichtstrom im Streulichtbereich betrachtet, der aus den Messungen der Lichtstärke am Goniofotometer rechnerisch ermittelt wird (vgl. Abb. 5.8).

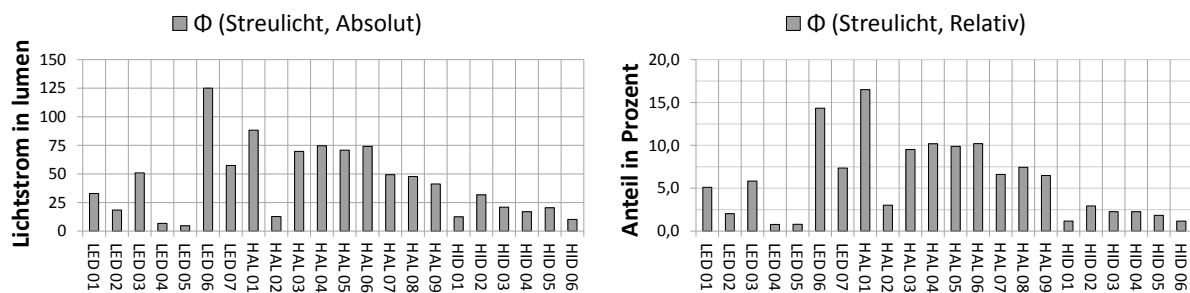


Abbildung 5.8: Absoluter und relativer Streulichtstrom für eine Reihe von Abblendlichtverteilungen

Abbildung 5.8 zeigt eine Übersicht des Lichtstroms im Streulichtbereich. Dieser wird einerseits als Absolutwert $\Phi_{\text{Streulicht, Absolut}}$ (links) und andererseits als Relativwert $\Phi_{\text{Streulicht, Relativ}}$ (rechts) dargestellt. Der relative Streulichtstrom wird nach Gleichung 5.1 berechnet. Der Gesamtlichtstrom $\Phi_{\text{Gesamt, Absolut}}$ ist der Lichtstrom im Bereich von $H=-80^\circ$ bis $H=80^\circ$ und von $V=-20^\circ$ bis $V=100^\circ$.

$$\Phi_{\text{Streulicht, Relativ}} = \frac{\Phi_{\text{Streulicht, Absolut}}}{\Phi_{\text{Gesamt, Absolut}}} \quad (5.1)$$

Auch hier ist die Streuung der Lichtstromwerte der untersuchten Scheinwerfer untereinander sehr hoch. Der Höchste Wert (125 lm) wird vom Scheinwerfer LED 06 erreicht. Auch anteilig am Gesamtlichtstrom betrachtet besitzt er mit über 14 % relativen Streulichtstrom einen sehr hohen Streulichtanteil. Maximal wird ein relativer Streulichtstrom von 16,5 % vom Scheinwerfer

HAL 01 erreicht (vgl. Abb. 5.8). Klassische Reflektorsysteme mit Halogenglühlampen weisen bei dieser Untersuchung sehr hohe Werte auf (z. B. HAL 01, HAL 03). Bei gleichzeitig niedrigem Gesamtlichtstrom ist dies ein Indikator für eine insgesamt niedrige Effizienz und ein besonders hohes Eigenblendungsrisiko.

Im Folgenden werden die Spannweiten S der einzelnen Kennzahlen K (K_{MAX} , Q_{95} , MW , $\Phi_{Streulicht, Absolut}$, $\Phi_{Streulicht, Relativ}$) vorgestellt. Auch hier wird auf eine Klasseneinteilung verzichtet. Dabei ist für jede Kennzahl der höchste Wert (K_{MAX}), der mittlere Wert (\bar{K}) und der niedrigste Wert (K_{MIN}) ermittelt worden. Die Spannweite berechnet sich nach Gleichung 5.2.

$$S_K = K_{MAX} - K_{MIN} \tag{5.2}$$

Die Spannweite wird in Abbildung 5.9 durch die Verbindung des höchsten und des niedrigsten Wertes dargestellt. Der mittlere Wert wird über das arithmetische Mittel der jeweiligen Kennzahl berechnet und liefert eine Aussage über ihren durchschnittlichen Wert. In dieser Übersicht wird die große Streuung aller Kennzahlen, deren maximale und minimale Ausprägung nochmals deutlich.

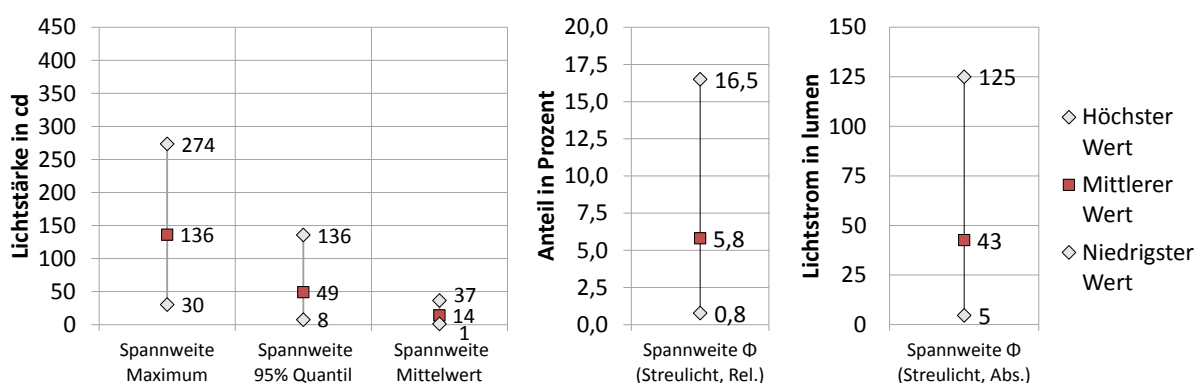


Abbildung 5.9: Darstellung der Spannweite der Kennzahlen für eine Reihe von Abblendlichtverteilungen

Die Spannweite beträgt für das ermittelte Maximum der Lichtstärke im Streulichtbereich einen Wert von 244 cd. Für das 95 % Quantil beträgt die Spannweite 128 cd und für den Mittelwert 36 cd. Der Streulichtstrom weist eine Spannweite von 15,7% relativ zum Gesamtlichtstrom und 120 lm absolut auf (vgl. Abb. 5.9).

Wirksamkeit von Maßnahmen zur Streulichtreduzierung

Eine zu große Menge Streulicht ist neben der Gefahr der Eigenblendung auch aus Effizienzgründen nicht sinnvoll. Es gibt unterschiedliche Maßnahmen, durch die der Streulichtanteil reduziert werden kann. Die Wirkung insgesamt und der Einfluss auf die Kennzahlen soll im Folgenden anhand von zwei konkreten Maßnahmen gezeigt werden:

- Scheinwerfer A: Veränderung der optischen Eigenschaften einer Zierblende (LED).
- Scheinwerfer B: Vorsatzblende für das Leuchtmittel (Halogenleuchte H4).

Die Veränderung der optischen Eigenschaften der Blende bei Scheinwerfer A soll eine Verbesserung der Streulichtcharakteristik mit sich bringen. Die hochglänzende Blende reflektiert einen Teil des ausgesendeten Lichts in den Streulichtbereich. Durch den Einsatz einer matten, genarbt Blende wird der direkt reflektierte Anteil des Lichts aufgrund des niedrigeren Reflektionsgrades reduziert. Die Narbung sorgt für eine gleichmäßige Verteilung des Streulichts und damit zur Reduzierung von Inhomogenitäten, welche bei klarer Sicht z. B. an Tunneldecken sichtbar werden können. Die zwei Scheinwerfervarianten und die entsprechende Lichtstärkeverteilung sind in Abbildung 5.10 dargestellt.

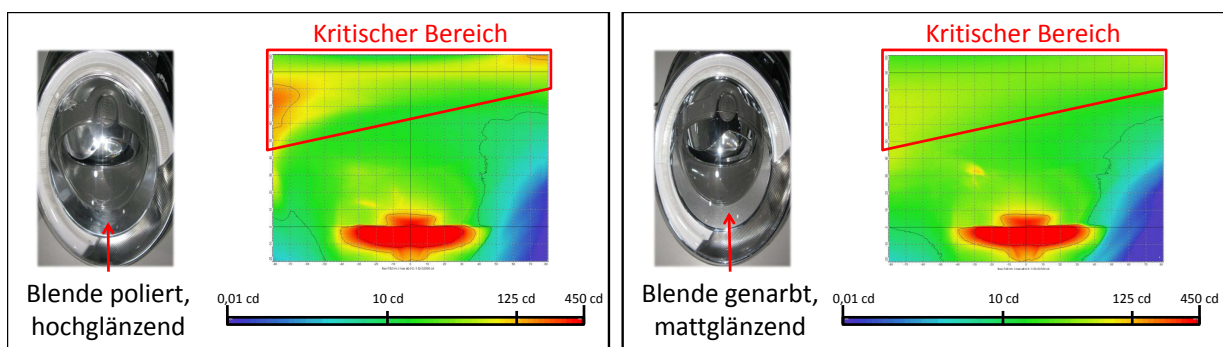


Abbildung 5.10: Vergleich der Streulichtverteilung eines Scheinwerfers mit einer glatten, hochglänzenden und einer genarbt, mattglänzenden Zierblende

Im Falschfarbenbild (vgl. Abb. 5.10) ist die Veränderung der Lichtstärkeverteilung im kritischen Bereich deutlich zu erkennen. Im Vergleich zur polierten Blende zeigt die matte Blende deutlich niedrigere Gradienten und Maximalwerte. Negative Auswirkungen auf die Hauptlichtverteilung sind nicht festzustellen.

Eine ähnliche Betrachtung soll nun für Scheinwerfer B erfolgen (vgl. Abb. 5.11).

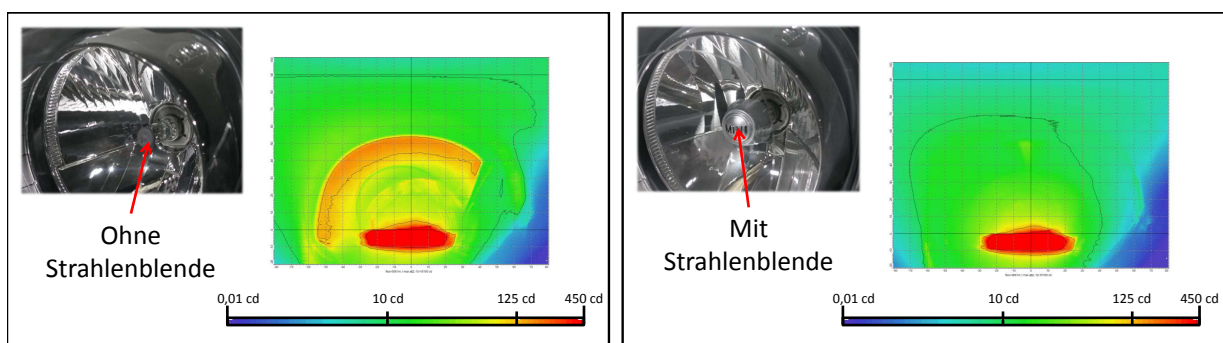


Abbildung 5.11: Vergleich der Streulichtverteilung eines Scheinwerfers mit und ohne Strahlenblende vor dem Leuchtmittel (H4-Lampe)

Bei Scheinwerfer B, ein Reflektorsystem mit H4 Lampe, wurde der Einsatz einer Vorsatzblende überprüft. Die Blende reduziert den Streulichtanteil deutlich und Inhomogenitäten werden nahezu vollständig vermieden (vgl. Abb. 5.11). Gleichzeitig wird jedoch auch ein Teil des Lichtstroms aus dem Abblendlichtbereich abgeschattet. Die Seitenausleuchtung wird dadurch deutlich schlechter als vorher.

Im Falschfarbenbild werden die Auswirkungen gut dargestellt (vgl. Abb. 5.11). Die sichelförmige Inhomogenität in der unteren Hälfte des Streulichtbereichs ist bei der Variante mit Strahlenblende nicht mehr zu erkennen. Die reduzierte Seitenausleuchtung ist in der Darstellung am Vergleich des linken, unteren Bildrandes zu sehen.

Beide Maßnahmen haben die Lichtstärkeverteilung im Streulichtbereich deutlich beeinflusst. Dies spiegelt sich auch in den Kennzahlen in Tabelle 5.1 wieder.

Tabelle 5.1: Kennzahlen im Streulichtbereich vor und nach der Optimierung

	MAX	Q95	MW	$\Phi_{Str.,Abs.}$
Scheinwerfer A _{vorher} : Polierte, hochglänzende Blende	229 cd	92 cd	33 cd	58 lm
Scheinwerfer A _{nachher} : Genarbte, matte Blende	107 cd	57 cd	28 cd	58 lm
Scheinwerfer B _{vorher} : Ohne Strahlenblende	193 cd	138 cd	35 cd	107 lm
Scheinwerfer B _{nachher} : Mit Strahlenblende	57 cd	26 cd	10 cd	30 lm

Durch die Anpassung der Zierblende wurde das Streulicht umverteilt und Inhomogenitäten reduziert. Dies zeigt sich daran, dass der Lichtstrom von Scheinwerfer A ($\Phi_{Str.,Abs.}$) bei beiden Blenden den gleichen Wert hat, Maximalwerte und 95 % Quantil hingegen deutlich sinken.

Die Strahlenblende hingegen reduziert den Streulichtstrom von Scheinwerfer B deutlich von 107 auf 30 lm. Gleiches gilt für die übrigen in Tabelle 5.1 dargestellten Werte. Allerdings bedingt der Einsatz der Blende auch eine Reduzierung der Seitenausleuchtung im Abblendlichtbereich.

5.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass große Unterschiede in der Lichtstärkeverteilung im Streulichtbereich existieren. Eine Einteilung in verschiedene Klassen (vgl. Kap. 5.3) zeigt, dass einige Charakteristika in gleicher oder ähnlicher Form wiederkehren. Sowohl homogene als auch inhomogene Verteilungscharakteristika sind zu entdecken. Die größten Risiken zur Eigenblendung bei Nebel gehen von den Kategorien A und B aus. Klasse A besitzt eine hohe Menge an Streulicht, welches sich im gesamten Fahrersichtfeld als überlagerte Streuleuchtdichte bemerkbar macht und so die Objektkontraste stark reduziert (vgl. [Ros99]). Klasse B weist deutliche Mengen an Streulicht auf, die inhomogen über den Streulichtbereich verteilt sind. Diese Inhomogenitäten können nach HUHNS und KIEL sowohl bei klaren als auch bei nebligen Sichtbedingungen störend wirken [Kie12], [Huh96].

Die messtechnischen Untersuchungen mittels Leuchtdichtkamera aus Kapitel 5.2 haben aufgezeigt, dass das Risiko der Eigenblendung unabhängig von einer bewusst wahrgenommenen Störwirkung existiert. Auch Streuleuchtdichten, die im Fahrersichtfeld homogen wirken, reduzieren die Objektkontraste und stellen somit ein Risiko dar. Der Fahrer empfindet jedoch in den meisten Fällen keine Störwirkung, da ihm eine Referenzlichtverteilung (ohne Streulicht) fehlt.

Auch wenn vorwiegend Scheinwerfer mit Halogenleuchtquellen hohe Streulichtwerte aufweisen, besteht kein direkter Zusammenhang zwischen den Kennzahlen und der Art der Lichtquelle. Ursächlich ist der Aufbau des Gesamtsystems (vgl. Kap. 2.3). Im Rahmen der Untersuchungen weisen die meisten Halogen-Scheinwerfer ähnliche, einfache Reflektorsysteme auf, was zu ähnlichen Verteilungen im Streulichtbereich führt. Hochglänzende Blenden, Direktabstrahlung der Lichtquelle und ungünstige Mehrfachreflexion ist hier die Ursache für die entsprechenden Streulichtverteilungen (vgl. [VH07]).

Die ermittelten Kennzahlen gelten für den gesamten Streulichtbereich und ermöglichen, in Kombination betrachtet, auch Rückschlüsse auf die Verteilung innerhalb des betrachteten Bereichs. Sie eignen sich zur Eingruppierung eines Scheinwerfersystems und legen den Maßstab für die Weiterentwicklung fest. Weiterhin lassen sich anhand der Maximalwerte auch die gesetzlichen Vorgaben überprüfen, wobei bei der Ermittlung der Messwerte auf ein einheitliches Messraster geachtet werden muss. Alle untersuchten Scheinwerfer erfüllen dabei die zulassungsrelevanten Anforderungen. Viele Scheinwerfer, die gemäß den Vorschriften der ECE zugelassen werden, weisen jedoch Streulichtwerte von über 125 cd auf. Damit wäre eine Zulassung, abgesehen von anderen Merkmalen der Lichtverteilungen, in Gebieten, in denen die Regelungen der FMVSS gelten, nicht möglich, da die Obergrenze im Streulichtbereich dort bei 125 cd liegt (vgl. Tab. 2.2 in Kap. 2.5.1) [FMV12].

Der Lichtstrom im Streulichtbereich eignet sich neben der Bewertung des Eigenblendungsrisikos auch als Indikator für die Effizienz des Scheinwerfersystems [Sch13]. Dieser Anteil der Lichtverteilung steht dem Fahrzeugführer nicht für die Fahrbahnausleuchtung zur Verfügung und erzeugt bei Nebel zudem eine Reduzierung des Kontrastes. Gerade bei Systemen mit niedrigem Gesamtlichtstrom ist das von Nachteil für den Fahrzeugführer.

Da eine Betrachtung einer einzelnen Kennzahl ein System nicht ausreichend beschreibt, liefert Abbildung 5.7 einen übersichtlichen Ansatz der Charakterisierung der Lichtstärkeverteilung anhand von drei Kennzahlen, nämlich dem Maximalwert, dem 95 %-Quantil und dem Mittelwert der Lichtstärke. Dabei zeigt der Abstand zwischen dem Maximalwert und dem 95 %-Quantil an, ob es sich bei den Maximalwerten um sogenannte Ausreißer handelt oder größere Bereiche mit hohen Werten zu identifizieren sind. Ist dieser Abstand sehr groß, weisen nur wenige Stellen der Lichtverteilung Werte, die nahe am Maximalwert liegen, auf. Liegen alle Werte nah zusammen, deutet dies auf eine homogene Lichtverteilung hin. Die endgültige Charakterisierung sollte noch die prozentuale Menge des Streulichtstroms am Gesamtlichtstrom beinhalten, um auch die Effizienz des Systems ausreichend zu berücksichtigen. Dies ist gerade bei Scheinwerfern mit

niedrigen Gesamtlichtströmen wichtig, bei denen sich eine Zu- oder Abnahme des Lichtstroms auf der Straße deutlicher auf die Fahrbahnausleuchtung auswirkt, als bei Systemen mit höheren Gesamtlichtströmen.

Die Maßnahmen zur Streulichtreduzierung zeigen in beiden Fällen, dass ungünstig ausgelegte Systeme durch geringe konstruktive Änderungen beeinflusst werden können. Allerdings haben beide Verfahren auch Nachteile. Tabelle 5.1 demonstriert, dass beispielsweise der Einsatz einer Strahlenblende auch den Gesamtlichtstrom verringert. Somit steht der Vorteil bei Nebel im Zielkonflikt mit einem Nachteil bei klarer Sicht. In diesem Fall ist eine individuelle Abwägung notwendig und man muss die Tatsache berücksichtigen, dass der Anteil der Unfälle bei Nebel weniger als 5 % der Gesamtunfälle ausmacht [Win11]. Die Veränderung der optischen Eigenschaften der Zierblende wiederum vermindert nicht den Streulichtanteil sondern verteilt das Streulicht um und reduziert die Maximalwerte. Da nach KLEINKES jedoch auch Inhomogenitäten, also lokale Ungleichmäßigkeiten in der Leuchtdichteverteilung, unnötige Blickzuwendungen verursachen können, ist die Maßnahme durchaus als positiv und wirksam zu bewerten [Kle03].

5.4 Probandenstudie zum Thema Auswirkungen von Streulicht bei Nebel

5.4.1 Ziel des Versuchs

Im Rahmen dieses Versuchs wurde eine Einrichtung im Labor aufgebaut, die die Untersuchung des Einflusses von Streulicht bei Nebel unter reproduzierbaren Bedingungen ermöglichte. Ziel dieses Versuchs war es, die Störwirkung unterschiedlicher Streulichtverteilungen bei Nebel zu untersuchen. Durch die Untersuchung sollen Erkenntnisse über die folgenden Zusammenhänge ermittelt werden:

1. Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Störempfinden und Ausbreitungsrichtung (Abstrahlwinkel) des Streulichts.
2. Erkenntnisse über den Einfluss der qualitativen Ausprägung einer Lichtverteilung im Streulichtbereich (z. B. Spot, gleichmäßige Verteilung) auf das Störempfinden.
3. Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Störempfinden und Streuleuchtdichte.

5.4.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau soll die Untersuchung von Streulicht bei reproduzierbaren, nebelähnlichen Bedingungen im Labor ermöglichen. Wichtigste Voraussetzung dafür ist eine wiederholgenau, zeitlich konstante Erzeugung von Nebel in einer realitätsnahen Umgebung. Im Folgenden werden der Aufbau des Versuchs und die erforderlichen technischen Maßnahmen zur Erzeugung der Versuchsbedingungen geschildert.

Abbildung 5.12 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der Probandenstudie in der Seitenansicht und aus der Vogelperspektive. Die wichtigsten Elemente sind mit Positionsnummern versehen und in der Zeichnung benannt.

Der Versuchsaufbau setzte sich aus einem Fahrzeug (BMW 5er, Pos. 1, Abb. 5.12) und einer Kammer, die sich vor dem Fahrzeug befand und an die Fahrerkabine angebunden war, zusammen. An der Rückwand der Kammer befand sich die statische Nachbildung einer Landstraßenszene (Pos. 9, Abb. 5.12). Außerdem waren auch die Komponenten zur Erzeugung der Lichtverteilungen und des Nebels in der Kammer untergebracht, wobei diese für die Probanden während des Versuchs nicht sichtbar waren. Alle Scheiben des Fahrzeugs, mit Ausnahme der Windschutzscheibe, waren mit einer lichtundurchlässigen Folie aus Kunststoff versehen, um einen potentiellen Lichteintritt von außen zu vermeiden. Die Außenwände der Nebelkammer (Pos. 5, Abb. 5.12) bestanden aus einer zweiteiligen Hülle. Im Inneren der Kammer bestand diese aus einer matten, nicht reflektierenden Schicht aus schwarzem Moltonstoff, der zur Vermeidung von Mehrfachreflexionen an den Seitenwänden oder der Decke

diente. Nach außen wurde die Kammer durch eine isolierende Kunststoffschicht abgeschirmt, um den Einfall von Licht und Luftströmungen zu verhindern.

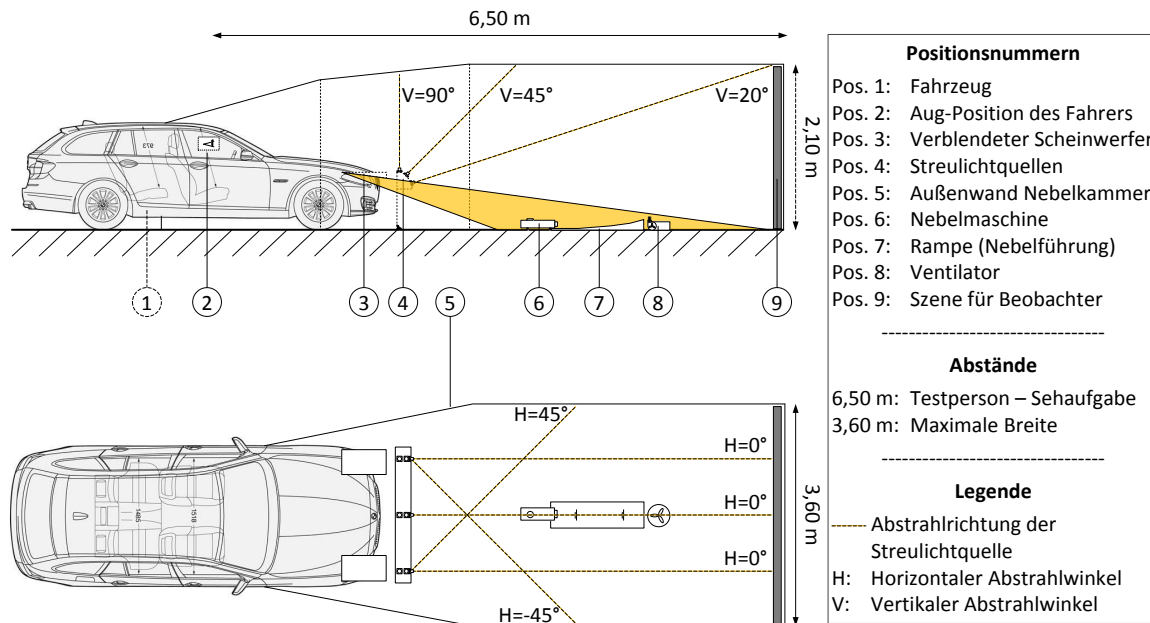


Abbildung 5.12: Skizze des Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Störempfindens durch Streulicht bei Nebel - Seitenansicht und Vogelperspektive

Die Testpersonen befanden sich im Fahrzeug auf dem Fahrersitz in einer Entfernung von 6,50 m zur Leinwand in einer Augenhöhe von 1,15 m. Die Leinwand selbst befand sich am Ende der Kammer und hatte eine Breite von 3,60 m und eine Höhe von 2,10 m. Die Personen auf der Fahrbahn befanden sich in einer Höhe von 0,75 m und hatten eine Fläche von ca. 0,35 m x 0,1 m, was einer 1,75 m großen Person in einer Entfernung von 32,50 m entspricht. Die Markierungen über den Personen befanden sich auf einer Höhe von 1,15 m und waren damit auf Höhe der Augen der Testpersonen. Die Scheinwerfer, sowie der Aufbau für die Streulichtquellen befand sich in einer Höhe von 0,63 m. Eine Übersicht der geometrischen Abmessungen des Versuchszustandes ist in Tabelle 5.2 aufgeführt.

Tabelle 5.2: Zusammenstellung der geometrischen Abmessungen des Versuchszustandes

Parameter	Wert
Abstand des Fahrers zur Szene	6,50 m
Abmessungen der Leinwand (B x H)	3,60 m x 2,10 m
Augenhöhe der Testperson	1,15 m
Höhe des Horizonts	1,15 m
Anbauhöhe der Scheinwerfer	0,63 m
Anbauhöhe der Streulichtquellen	0,63 m
Größe der Personen auf der Leinwand (in Realität)	0,35 m (1,75 m in 32,5 m Entfernung)

Zusätzliche Fotos, die den Versuchsaufbau von der Außenseite zeigen, können Anhang E.2 entnommen werden.

Die den Probanden dargebotene Szene (Pos. 9, Abb. 5.12) an der Rückwand der Nebelkammer zeigte eine Straßenszene, die einige Sehobjekte beinhaltete. Die Anordnung der Objekte in der Szene ist in Abbildung 5.13 nochmals dargestellt und wird im Folgenden erläutert. Zur besseren Darstellung sind die Objekte und Fahrbahnmarkierungen in Abbildung 5.13 in schwarz auf weißem Hintergrund dargestellt. Im Versuchsstand selbst war der Hintergrund schwarz und die Objekte waren weiß bzw. grau.

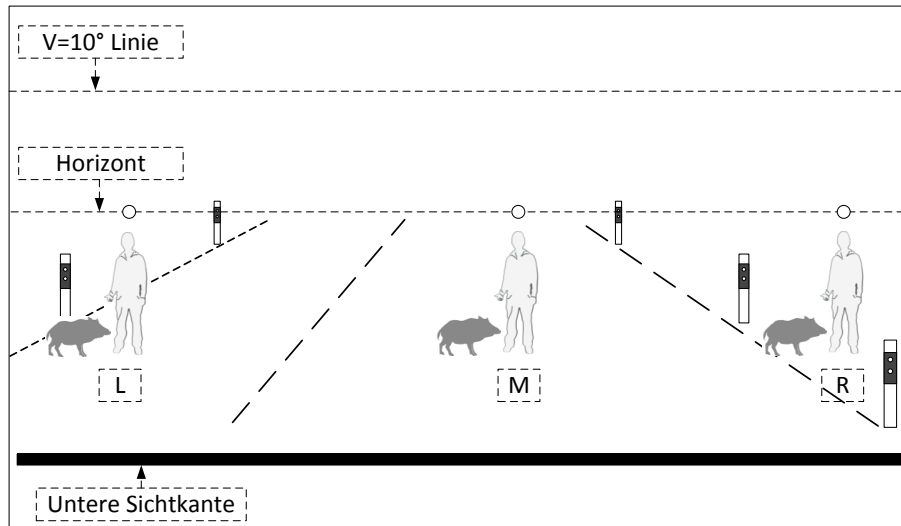


Abbildung 5.13: Skizze des Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Störepfindens durch Streulicht bei Nebel - Fahrersicht

Die Szene bestand aus einem schwarzen Hintergrund, einer durch Fahrbahnmarkierungen angedeuteten Landstraße und mehreren Objekten. Neben den Straßenmarkierungen waren Leitpfosten auf beiden Seiten der Fahrbahn und drei Objektpaare positioniert. Ein Objektpaar bestand aus einem hellgrauen Fußgänger und einem dunkelgrauen Wildschwein, die einen deutlichen Kontrast zum Hintergrund aufwiesen. Diese befanden sich auf der linken Fahrbahn (L), der rechten Fahrbahn in der Mitte der Leinwand (M) und am rechten Fahrbahnrand (R). Die Darüber angebrachten Punkte definierten drei Blickrichtungen (L, M, R) für den Probanden. Die untere Sichtkante war durch einen horizontal verlaufenden Balken markiert, der den Testpersonen die Einstellung der Sitzhöhe als untere Sichtkante vorgab.

Die Lichtverteilungen setzten sich aus einer Grundlichtverteilung und einer Streulichtverteilung zusammen, deren Aufbau im Folgenden erklärt wird. Die Grundlichtverteilung wurde durch die im Fahrzeug verbauten Hauptscheinwerfer (Pos. 3, Abb. 5.12) erzeugt, die mit einem Projektionssystem mit Hochdruckentladungslampen ausgestattet waren. Diese wurden im Abblendlichtmodus betrieben. Eine Blende über den Scheinwerfern verhinderte die Emission von Licht in den Streulichtbereich. Außerdem wurde die Rückwand der Kammer (Pos. 9, Abb. 5.12)

so nicht direkt beleuchtet. Durch die Grundlichtverteilung wurde eine Umgebungsleuchtdichte von $\approx 0,01 \text{ cd m}^{-2}$ erzeugt. Die Streulichtverteilungen wurden durch einen Aufbau mit 15 einzeln ansteuerbaren LED-Modulen generiert, der auf Höhe der Hauptscheinwerfer montiert war (Pos. 4, Abb. 5.12). Der Aufbau mit den einzelnen Streulichtquellen und deren Positionierung und Ausrichtung ist in Abbildung 5.14 dargestellt.

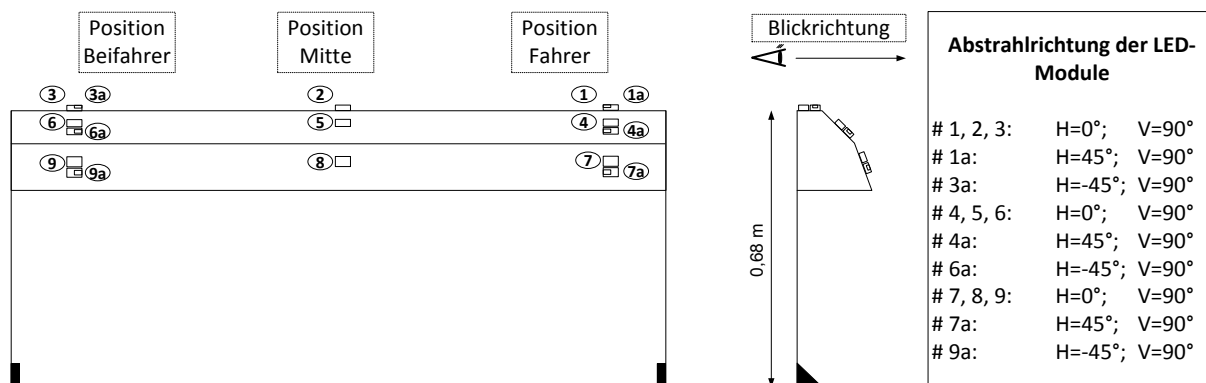


Abbildung 5.14: Anordnung der Streulichtquellen im Versuchsaufbau zum Thema Streulicht bei Nebel - Vorder- und Seitenansicht

Die maximale Lichtstärke eines Moduls betrug ca. 100 cd bei einem Lichtstrom von ca. 250 lm. Die einzelnen LED-Module unterscheiden sich in der Anbauposition und in den horizontalen und vertikalen Abstrahlwinkeln (H und V). Insgesamt werden drei Anbaupositionen (Fahrerseite, Mitte, Beifahrerseite), drei horizontale Abstrahlwinkel (-45°, 0°, 45°) und drei vertikale Abstrahlwinkel (20°, 45°, 90°) unterschieden. Die Ansteuerung der Streulichtquellen bestand aus einer Steuereinheit und einer Fernbedienung für den Probanden. Die 15 Module konnten damit einzeln oder in einer beliebigen, vorprogrammierten Kombinationen angesteuert werden. Dabei hat die Ansteuerung nur zwischen dem Zustand „An“ und „Aus“ unterschieden. Eine Dimmung war nicht vorgesehen. Folgende Schaltzustände wurden für den Versuch realisiert:

- Alle Positionen Einzeln (1, 1a, 2, ..., 9, 9a). Anzahl Schaltzustände: 15.
- Alle H=0°, V=10°-Module zusammen (1+2+3). Anzahl Schaltzustände: 1.
- Alle H=0°, V=45° Module zusammen (4+5+6). Anzahl Schaltzustände: 1.
- Alle H=0°, V=90° Module zusammen (7+8+9). Anzahl Schaltzustände: 1.
- Alle H=0° Module zusammen (1+2+3+4+5+6+7+8+9). Anzahl Schaltzustände: 1.

Zur Erzeugung von gleichmäßigen Nebelbedingungen diente ein Aufbau aus einer Nebelmaschine (Pos. 6, Abb. 5.12), einer Rampe als Luftführung (Pos. 7, Abb. 5.12) und einem Ventilator (Pos. 8, Abb. 5.12). Die Luftführung lenkte den künstlichen Nebel über den Ventilator, der in kurzer Zeit eine homogene Nebeldichte im Raum ermöglichte. Die Nebelmaschine der Firma *Eurolite* vom Typ N-10 Mini besaß ein Ausstoßvolumen von $50 \text{ m}^3 / \text{min}$. Als Nebelfluid kam das

Fluid Pro Smoke Super (ZR mix) vom Hersteller *Martin* zum Einsatz. Dieses hatte im Vergleich zu anderen Nebelfluiden eine ausreichend hohe Dichte und Standzeit.

Ausschlaggebend für den Erfolg der Studie war die Reproduzierbarkeit und die zeitliche Konstanz der Bedingungen in der Nebelkammer. Daher wurde in mehreren Testläufen der Leuchtdichteabfall der Streuleuchtdichte im Versuchsaufbau durch ortsauflösende Leuchtdichteaufnahmen ermittelt. Eine Halogenglühlampe (H7) diente als Lichtquelle während der Messung. Durch ein zeitlich klar definiertes Aktivieren der Nebelmaschine konnte die Nebeldichte über eine Dauer von 24 Minuten auf einem annähernd konstanten Niveau gehalten werden. Die relativen Schwankungen der Streuleuchtdichte lagen während des Messzeitraums in einem Bereich von $\pm 10\%$ (Wertetabelle und Diagramm in Anhang E.2). Der stärkste Abfall war zu Beginn des Testzeitraums zu verzeichnen. Der Anfangszeitraum wurde später in der Studie dazu verwendet, dem Probanden die nötigen Informationen zum Versuch zur Verfügung zu stellen und Übungsbeispiele zu präsentieren, um diese anfänglichen Schwankungen zu kompensieren. Als Ergebnis wurde festgelegt, dass für alle Probanden jeweils nach fünf Minuten Versuchsdauer erneut Nebel zugeführt werden muss.

Die Szene, die auf der Leinwand dargestellt war (Abb. 5.14), wird im Folgenden durch seine Leuchtdichtewerte bei eingeschalteter Grundlichtverteilung charakterisiert. Die Grundlichtverteilung diente den Probanden später als Referenz und war somit die Ausgangsposition der Bewertung. Tabelle 5.3 zeigt die Leuchtdichten für die Sehobjekte (Person L, M, R laut Abb. 5.13), deren direkte Umgebung, die Fahrbahnmarkierungen und die Interieur-Beleuchtung im Fahrzeug. Die Ermittlung der Leuchtdichtewerte erfolgte über eine Auswertung einer orts aufgelösten Leuchtdichteaufnahme aus Fahrerperspektive. Bei allen Messungen gilt die Toleranz von $\pm 10\%$, die aufgrund der zeitlichen Schwankungen der Nebeldichte auftreten kann.

Tabelle 5.3: Leuchtdichte der einzelnen Sehobjekte im Versuch zur Streulichtbewertung bei Nebel

Objektbezeichnung	mittlere Leuchtdichte in cd m^{-2}	maximale Leuchtdichte in cd m^{-2}
Person L	0,026	0,033
Umgebung (Person L)	0,022	0,028
Person M	0,034	0,039
Umgebung (Person M)	0,028	0,035
Person R	0,032	0,038
Umgebung (Person R)	0,027	0,034
Fahrbahnmarkierungen	0,036	0,051
Instrumententafel des Fahrzeugs	0,135	39,740
Fahrersichtfeld (ohne Interieur-Beleuchtung)	0,013	0,051

5.4.3 Versuchsablauf und Rahmenbedingungen

Der Versuch gliederte sich in zwei Abschnitte, in denen die Probanden unterschiedliche Streulichtverteilungen bei nebelähnlichen Bedingungen bezüglich ihrer Störwirkung beurteilten. Teil 1 des Versuchs untersuchte die Abhängigkeit der Störwirkung von der vertikalen und horizontalen Abstrahlrichtung der Streulichtquelle. Hier wurde jede der 15 Streulichtquellen einzeln bewertet. Teil 2 des Versuchs untersuchte den Unterschied zwischen zwei qualitativen Ausprägung der Lichtverteilung, nämlich einer spotähnlichen und einer breiten Ausprägung. Hier wurden die Streulichtquellen auf Fahrerseite einzeln ([1]; [4]; [7]) und in einer Dreier-Kombination ([1+2+3]; [4+5+6]; [7+8+9]), bei der jeweils die vertikal gleich gerichteten Streulichtquellen zeitgleich geschaltet sind, dargeboten.

Während des Versuchs saßen die Probanden auf dem Fahrersitz und stellten vor Beginn ihre Sitzposition so ein, dass die untere Sichtkante mit der Markierung auf der Leinwand übereinstimmte (vgl. Abb. 5.13). Die Testpersonen bewerteten jede Lichtverteilung in drei vorgegebenen Blickrichtungen, die durch Orientierungspunkte auf Augenhöhe über den Personen auf der Leinwand vorgegeben waren (L, M, R in Abb. 5.13). Vor jeder Streulichtverteilung wurde die Grundlichtverteilung ohne Streulichtanteile als Referenz gezeigt (vgl. Abb. 5.15 links). Somit war die Bezugslichtverteilung immer dieselbe. Die Reihenfolge der Streulichtverteilung war zufällig und für alle Probanden identisch. Wiederholungen dienten der Überprüfung der Reliabilität der Versuchsergebnisse. Übungsbeispiele standen beiden Teilversuchen voran. Diese wurden nicht in die Auswertung aufgenommen. Eine tabellarische Auflistung der Reihenfolge kann Tabelle E.1 in Anhang E.2 entnommen werden. Abbildung 5.15 zeigt die Referenzlichtverteilung (links) und daneben ein Beispiel einer zu bewertenden Streulichtverteilung (rechts) als Leuchtdichteaufnahme aus Fahrerperspektive.

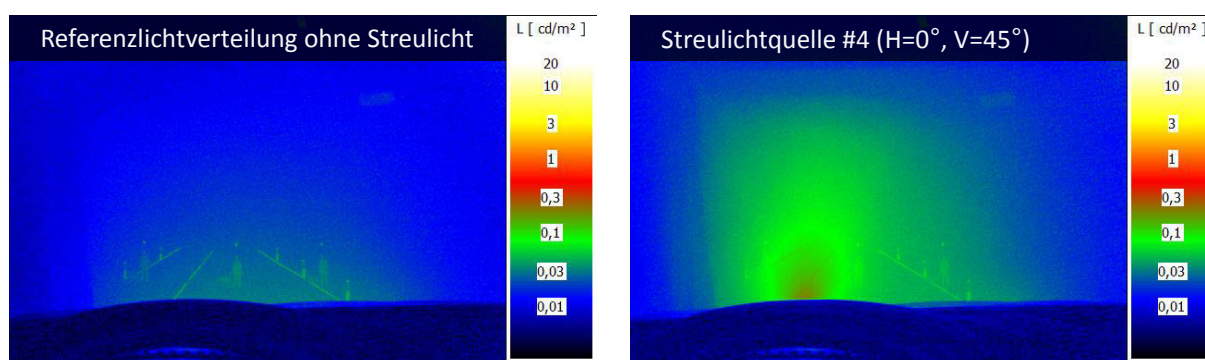


Abbildung 5.15: Leuchtdichteaufnahmen der Versuchsszene mit der Grundlichtverteilung (links) und der Lichtverteilung mit Streulichtquelle #4 ($H=0^\circ$, $V=45^\circ$)

Der Proband erhielt zu Beginn des Versuchs ein Informationsblatt, das eine Beschreibung des Versuchsablaufs, die Erklärung der Bewertungsskala und ein Beispiel beinhaltete. Dadurch wurde gewährleistet, dass jeder Proband dieselben Informationen erhielt und nicht durch den Versuchsleiter beeinflusst wurde. Anschließend hatte der Proband noch die Möglichkeit, bei

Unklarheiten Fragen zu stellen, wobei Fragen zum Aufbau und zur Intention des Versuchs nicht im Vorfeld beantwortet wurden.

Die Bewertung erfolgte auf einer vierstufigen, unipolaren Skala, die in ähnlicher Form bereits von HOPKINSON im Jahr 1940, von ADRIAN im Jahr 1970 oder von GÖCKE im Jahr 2013 für die Bewertung des subjektiven Störimpfindens eingesetzt wurden [Gel90], [Goc13]. Die Bewertungsskala bot die Möglichkeit, die Lichtverteilung in einem Bereich von „keiner Störwirkung“ bis zu einer „extremen“ bzw. „inakzeptablen Störwirkung“ einzuordnen. Im Einzelnen wurden die Bewertungsschritte nach Tabelle 5.4 festgelegt.

Tabelle 5.4: Bewertungsskala zum Versuch „Störung durch Streulicht bei Nebel“

Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4
Keine Störwirkung	Geringe Störwirkung	Deutliche Störwirkung	Inakzeptable Störwirkung

Das Probandenkollektiv bestand aus 43 Versuchsteilnehmern zwischen 21 und 55 Jahren. Das durchschnittliche Alter der Teilnehmer lag bei 29,5 Jahren. 39 Teilnehmer waren männlich und 4 weiblich und insgesamt trugen 21 Probanden eine Sehhilfe. Ein Großteil der Probanden waren Mitarbeiter der BMW Group, die unterschiedlichen Fachbereichen zugeordnet waren. Der Anteil der lichttechnischen Experten wurde dabei bewusst niedrig gehalten, um ein repräsentatives Ergebnis zu erzielen.

Im Folgenden werden die Rahmenbedingungen zum Versuch nochmals tabellarisch aufgeführt (vgl. Tab. 5.5).

Tabelle 5.5: Zusammenstellung der Rahmenbedingungen zum Versuch „Auswirkungen von Streulicht bei Nebel“

Übersicht der Rahmenbedingungen	
Anzahl der Bewertungen	58
davon Übungsbeispiele	16
davon Wiederholungen	21
Umgebungsleuchtdichte	$\approx 0,01 \text{ cd m}^{-2}$
Dauer des Versuches	30 Minuten
Anzahl Versuchspersonen	43
Alter der Probanden (Durchschnittsalter)	22–51 Jahre (29,5 Jahre)
Bewertungsskala	Unipolar, vier Stufen

5.4.4 Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Probandenstudie dargestellt. Neben der Wiederholgenauigkeit wird der Einfluss des Abstrahlwinkels der Streulichtquelle, der Vergleich einzelner und zusammenschalteter Streulichtquellen und die Abhängigkeit der Probandenbewertung vom Kontrast der Personen auf der Fahrbahn dargestellt.

Prüfung der Wiederholgenauigkeit

Die Reliabilität der Probandenbewertungen ist ein Indikator für gute, reproduzierbare Versuchsergebnisse. Daher wurden im Rahmen dieses Versuchs alle Lichtverteilungen doppelt bewertet. Die Prüfung der Wiederholgenauigkeit erfolgt durch die Ermittlung der Anzahl der Abweichungen N der Bewertung B der Testpersonen zwischen der ersten und zweiten Bewertung für alle im Versuch dargestellten Lichtverteilungen (Laufvariable i). Es wird ermittelt, wie viele Abweichungen insgesamt vorliegen (Gl. 5.3) und wie oft Abweichungen von zwei oder mehr Skalenstufen vorliegen (Gl. 5.4).

$$N_{|B(i,1)-B(i,2)|>0} \quad (5.3)$$

$$N_{|B(i,1)-B(i,2)|>1} \quad (5.4)$$

Gleichung 5.3 und 5.4 geben also die Anzahl der Bewertungen an, bei denen dieselbe Lichtverteilung vom selben Probanden unterschiedlich bewertet wird, also die Bewertung um mindestens eine bzw. zwei Skalenstufen abweicht. Insgesamt wurden 63 wiederholte Bewertungen für diesen Vergleich herangezogen (21 Streulichtverteilungen in drei Blickrichtungen). Die Werte R_1 und R_2 geben den prozentualen Anteil der Abweichungen mit einer bzw. zwei Skalenstufen an und berechnen sich nach Gleichung 5.5 und 5.6. Alle Probanden, die bei mehr als 40 % der wiederholten Lichtverteilungen eine Abweichung in der Bewertung aufweisen oder die bei mehr als 10 % der Bewertungen eine Differenz von zwei Bewertungsstufen oder mehr aufweisen, werden nicht in die Auswertung der Ergebnisse mit aufgenommen.

$$R_1 = \frac{N_{|B(i,1)-B(i,2)|>0}}{N_{gesamt}} > 0,4 \quad (5.5)$$

$$R_2 = \frac{N_{|B(i,1)-B(i,2)|>1}}{N_{gesamt}} > 0,1 \quad (5.6)$$

Unter der Annahme, dass Abweichungen von dieser Größenordnung nicht auf eine natürliche Streuung der Bewertung zurückzuführen sind, werden zwei mögliche Ursachen dafür in Betracht gezogen. Entweder sind Unregelmäßigkeiten der Versuchsbedingungen ein möglicher Grund für die starken Schwankungen oder der Proband hat insgesamt sehr inkonsistente oder

unentschlossene Bewertungsmaßstäbe angewendet. Die Anzahl der Beispiele, die eine Differenz größer 0 aufweisen, liegt zwischen 10 und 30 von insgesamt 63. Die Anzahl der Beispiele, die eine Differenz > 1 aufweisen, liegt zwischen 0 und 10 Beispielen. Nach Anwendung der genannten Ausschlusskriterien, wurden sechs Probanden ausgeschlossen und so die Anzahl der Probanden von ursprünglich 49 auf 43 reduziert. Der Ausschluss hat die Ergebnisse lediglich in ihrer Streuung und nicht in der Tendenz maßgeblich beeinflusst.

Eine weitere Prüfung der Wiederholgenauigkeit soll zeigen, ob der zeitliche Abstand zwischen den Wiederholungen einen Einfluss auf die Gesamtanzahl der Abweichungen hat (Gesamtanzahl der vorhandenen Abweichungen von allen Probanden). Abbildung 5.16 zeigt die Differenz der laufenden Nummer (also die Anzahl an Lichtverteilungen, die zwischen der Wiederholung liegen) auf der Abszisse und die Gesamtanzahl an Abweichungen der Bewertung (bei allen 43 Probanden) auf der Ordinate. Die Diagramme sind für alle drei Blickrichtungen dargestellt.

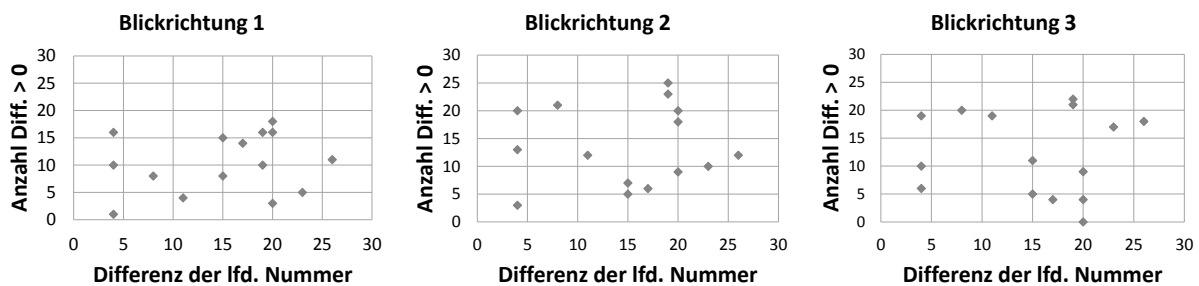


Abbildung 5.16: Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Abstand der wiederholten Beispiele und der Anzahl der Abweichungen bezogen auf alle Probanden

Ein qualitativer Zusammenhang würde auf sich stetig ändernde Versuchsbedingungen hinweisen, die die Streuung der Ergebnisse beeinflusst. Eine ungeordnete Verteilung hingegen deutet auf zufällige Schwankungen hin. In Abbildung 5.16 ist bei keiner der drei Blickrichtungen ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Abweichungen und der Differenz der laufenden Nummer zu erkennen. Auch die drei Blickrichtungen selbst weisen keine klar erkennbaren Parallelen auf.

Einfluss des Abstrahlwinkels der Streulichtquelle

Im Folgenden wird der Einfluss der Abstrahlrichtung der Streulichtquellen dargestellt. Die Diagramme zeigen jeweils den vertikalen Abstrahlwinkel auf der Abszisse und die mittlere Störbewertung auf der Ordinate. Als Fehlerindikator sind die 95%-Konfidenzintervalle angetragen.

Abbildung 5.17 zeigt die mittlere Probandenbewertung in Abhängigkeit der vertikalen Abstrahlrichtung für Blickrichtung M (Blick auf die rechte Fahrbahn, vgl. Abb. 5.13 in Kap. 5.4.2). Es werden die Daten für Streulicht auf der Fahrerseite (Streulichtquellen #1, #3 und #5), Streulicht in der Mitte (Streulichtquellen #2, #4 und #6) und Streulicht auf der Beifahrerseite (Streulichtquellen #3, #6 und #9) im Diagramm dargestellt.

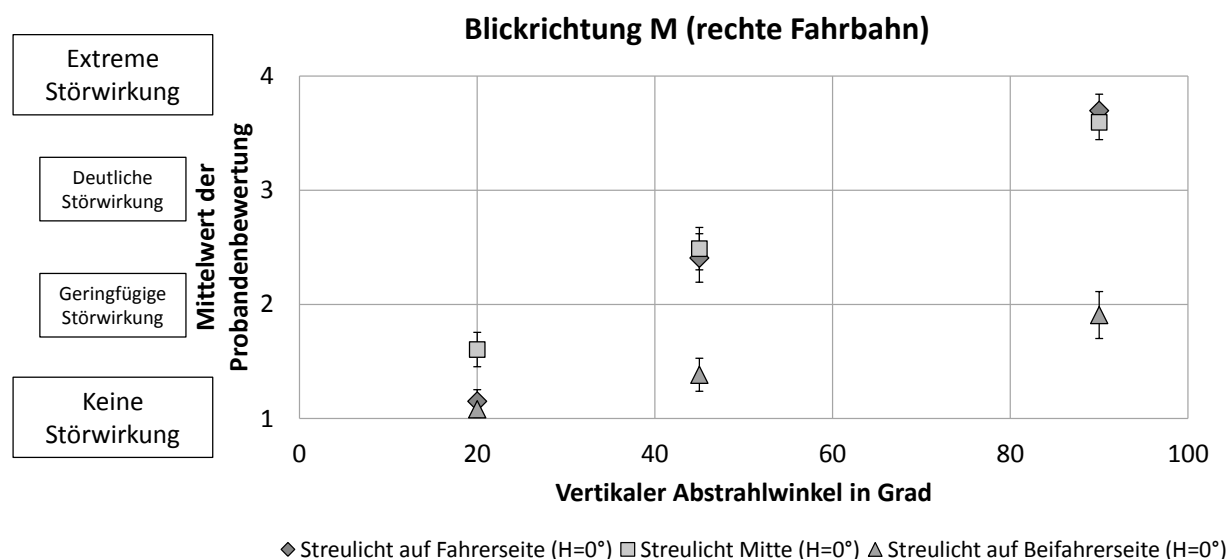


Abbildung 5.17: Mittlere Probandenbewertung in Abhängigkeit der vertikalen Abstrahlrichtung für Blickrichtung M

In Abbildung 5.17 weisen alle Datenreihen eine Zunahme der Störbewertung mit zunehmenden vertikalen Abstrahlwinkeln auf. Die größte Zunahme der Störbewertung und die höchsten Absolutwerte der Probandenbewertung sind bei Streulichtquellen auf der Fahrerseite und in der Mitte zu erkennen. Maximal wird ein Wert von 3,60 (Streulichtquelle Mitte) bzw. 3,70 (Streulichtquelle Fahrerseite) erreicht. Dies entspricht einer deutlichen bis extremen Störwirkung. Streulicht auf der Beifahrerseite erzeugt für die Blickrichtung M nur eine geringfügige Störwirkung. Die Werte der mittleren Probandenbewertung betragen maximal 1,90 für die Blickrichtung M. Ein Anstieg der Störbewertung mit zunehmenden vertikalen Winkeln ist auch hier zu beobachten.

Ein Anstieg der mittleren Probandenbewertung B (Anstieg der Störwirkung) mit zunehmenden vertikalen Abstrahlwinkeln der Streulichtquellen ist auch für die Blickrichtungen L und R zu erkennen. Es gilt stets $B(20^\circ) < B(45^\circ) < B(90^\circ)$. Bei Abstrahlwinkeln von $V=20^\circ$ liegt die Bewertung stets unterhalb der Stufe zwei, es wird also keine oder nur eine geringe Störwirkung erzeugt. Abstrahlwinkel von $V=90^\circ$ hingegen weisen, abhängig von der Kombination aus Blickrichtung und Position der Streulichtquelle unterschiedliche Werte auf. Streulicht, welches in Richtungen emittiert wird, die sich mit der Blickrichtung schneiden, weist dabei stets höhere Werte auf, als Streulicht, das in Richtungen ausgesendet wird, die sich nicht mit der Blickrichtung schneiden. Eine Gegenüberstellung der drei Blickrichtungen kann Abbildung E.4 in Anhang E.2 entnommen werden.

Ein ähnliches Verhalten ist auch bei den Streulichtquellen zu erkennen, die eine horizontale Abstrahlrichtung von $H=45^\circ$ (#1a, #4a, #7a) bzw. $H=-45^\circ$ (#3a, #6a, #9a) aufweisen. Abbildung 5.18 zeigt das Ergebnis der Probandenbewertung für diese Lichtquellen. Im linken Diagramm

sind die Streulichtquellen auf Höhe der Fahrerseite mit $H=45^\circ$ und im rechten Diagramm die Streulichtquellen auf Höhe der Beifahrerseite mit $H=-45^\circ$ dargestellt.

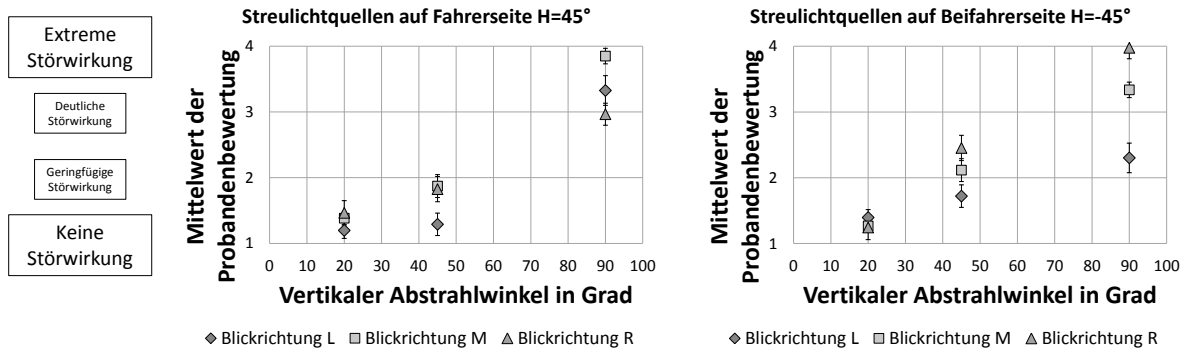


Abbildung 5.18: Mittlere Probandenbewertung für Streulichtquellen mit horizontalem Abstrahlwinkel von 45° bzw. -45°

Abbildung 5.18 zeigt im linken und rechten Diagramm bei allen Blickrichtungen einen Anstieg der Probandenbewertung mit zunehmenden vertikalen Abstrahlwinkeln. Dabei erzeugen Streulichtquellen auf der Fahrerseite bis zu einem Winkel $V=45^\circ$ nur eine geringfügige Störbewertung B der Probanden ($B < 2$). Bei einem Winkel von $V=90^\circ$ liegen die Bewertungen im Bereich einer deutlichen bis extremen Störbewertung. Streulichtquellen auf der Beifahrerseite hingegen erzeugen bereits bei einem Winkel von $V=45^\circ$ in der Blickrichtung M und L eine mittlere Probandenbewertung, die über eine geringfügige Störwirkung hinausgeht ($B > 2$). Bei einem Winkel $V=90^\circ$ erreicht die Blickrichtung L eine mittlere Bewertung $B=2,30$ wohingegen die Blickrichtung M ($B=3,34$) und R ($B=3,98$) deutlich höhere Bewertungen erhält.

Vergleich einzelner und zusammenschalteter Streulichtquellen

Im Folgenden werden die Ergebnisse des zweiten Teilversuchs dargestellt. Hier wurden spotähnliche Lichtverteilungen (Streulichtquelle #1 ($V=90^\circ$), #4 ($V=45^\circ$) oder #5 ($V=20^\circ$) jeweils einzeln) und Lichtverteilungen mit einer breiten Ausleuchtung (Streulichtquellen #1+#2+#3 ($V=90^\circ$), #4+#5+#6 ($V=45^\circ$) oder #7+#8+#9 ($V=20^\circ$)) bewertet. Abbildung 5.19 zeigt den Vergleich zwischen spotähnlicher und breiter Lichtverteilung für die drei vorgegebenen Blickrichtungen (L, M, R). Die Kategorien auf der Abszisse zeigen den vertikalen Abstrahlwinkel der Streulichtquelle(n) an. Auf der Ordinate ist die mittlere Probandenbewertung dargestellt.

Die bisher bei allen Beispielen aufgezeigte Tendenz zu höheren Bewertungen bei größeren vertikalen Abstrahlwinkeln ist auch in Abbildung 5.19 bei allen drei Blickrichtungen zu erkennen. Dies gilt sowohl für die spotähnliche Lichtverteilung (dunkelgraue Datenreihen in Abb. 5.19) als auch für die breiten Lichtverteilungen (hellgraue Datenreihen in Abb. 5.19).

Ein Vergleich der drei Blickrichtungen (L, M, R) zeigt, dass die mittlere Probandenbewertung der breiten Lichtverteilungen deutlich weniger von der Blickrichtung abhängen als die der spotähnlichen Lichtverteilungen. Die Bewertung der breiten Lichtverteilung liegt bei einem

vertikalen Abstrahlwinkel von 20°, 45° und 90° auf einem ähnlichen Niveau bei allen drei Blickrichtungen (z. B. $B_{Blickr.L} = 2,52$, $B_{Blickr.M} = 2,53$ und $B_{Blickr.R} = 2,58$ für $V=45^\circ$). Bei der spotähnlichen Lichtverteilung hingegen ändert sich je nach Blickrichtung die mittlere Probandenbewertung B deutlich. Blickrichtung L weist bei der Lichtverteilung die höchste Störwirkung ($B_{max} = 3,73$ bei 90°) auf, Blickrichtung R die niedrigste ($B_{max} = 2,14$ bei 90°).

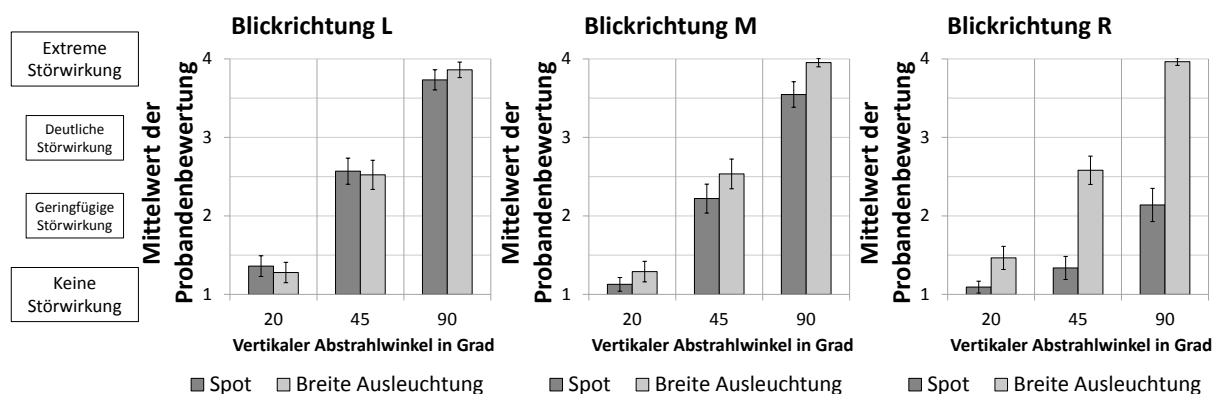


Abbildung 5.19: Vergleich der Probandenbewertung einer spotähnlichen Lichtverteilung (einzelne Streulichtquelle) im Vergleich zu einer breiten Ausleuchtung (drei nebeneinander angeordnete Streulichtquellen)

Der direkte Vergleich der mittleren Bewertung der spotähnlichen Lichtverteilungen mit den Bewertungen der breiten Lichtverteilungen zeigt in Blickrichtung L keine deutlichen Unterschiede. Die Konfidenzintervalle überschneiden sich für alle Abstrahlwinkel (vgl. Abb. 5.19, links). In Blickrichtung M sind geringe Unterschiede in der mittleren Probandenbewertung vorhanden. Die Konfidenzintervalle der Probandenbewertung bei $V=20^\circ$ und $V=45^\circ$ überschneiden sich jedoch auch hier (vgl. Abb. 5.19, Mitte). Bei Blickrichtung R wird die breite Ausleuchtung stets deutlich schlechter bewertet als die korrespondierende spotähnliche Lichtverteilung. Die Konfidenzintervalle überschneiden sich nicht (vgl. Abb. 5.19, rechts).

Abhängigkeit der Probandenbewertung vom Kontrast der Personen auf der Fahrbahn

Im Folgenden wird die mittlere Probandenbewertung in Abhängigkeit vom Weberkontrast der Person dargestellt, die sich in Blickrichtung auf der Fahrbahn befindet. Dabei werden alle Lichtverteilungen in die Betrachtung mit einbezogen. Bei der Berechnung des Kontrastes wurde die Leuchtdichte der Person selbst (L) und die ihrer direkten Umgebung (L_U) berücksichtigt. Straßenmarkierungen und Leitpfosten, die in der Nähe der Personen dargestellt waren, wurden nicht mit in die Berechnung der Umgebungsleuchtdichte einbezogen. Der Weberkontrast C_W wird nach Gleichung 5.7 berechnet.

$$C_W = \frac{(L - L_U)}{L_U} \quad (5.7)$$

Die für die Berechnung benötigten Messwerte wurden anhand von ortsauflösenden Leuchtdichteaufnahmen ermittelt. Dies war möglich, da jede Lichtverteilung im Versuchsaufbau aus Fahrerperspektive vermessen wurde.

Abbildung 5.20 zeigt den Zusammenhang zwischen Weberkontrast auf der Abszisse und mittlerer Probandenbewertung auf der Ordinate für die Blickrichtungen L, M und R der Probanden.

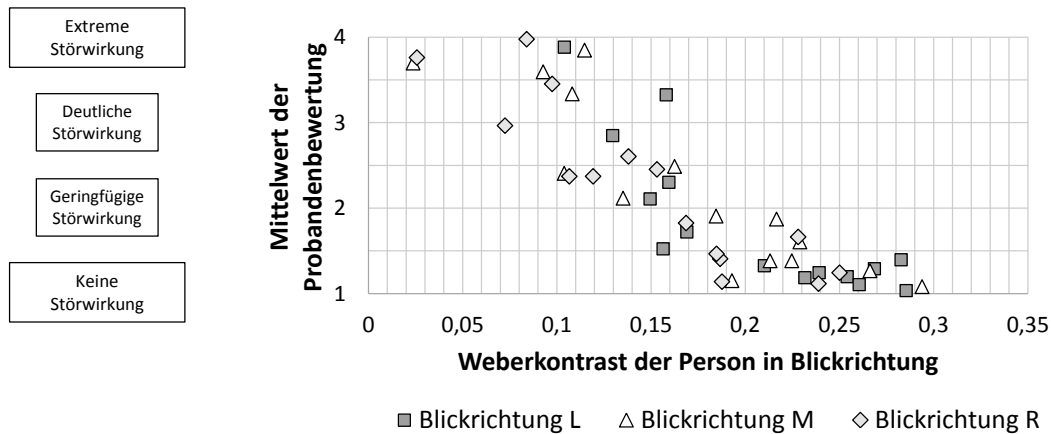


Abbildung 5.20: Mittlere Probandenbewertung der Streulichtverteilung in Abhängigkeit vom Weberkontrast der Person in Blickrichtung

Bei allen Blickrichtungen ist in Abbildung 5.20 eine Abnahme der mittleren Probandenbewertung mit zunehmendem Weberkontrast zu erkennen. Die Streulichtverteilungen werden also bei höheren Kontrasten als weniger störend bewertet. Im Bereich von $C_W = 0$ bis $C_W = 0,17$ nimmt die mittlere Probandenbewertung, ausgehend von einer deutlichen bis extremen Störwirkung ($3 < B < 4$), stetig ab. Alle Werte weisen in diesem Kontrastbereich mindestens eine geringfügige Störung auf ($B > 2$). Erst ab einem Kontrast von $C_W = 0,17$ wird keine oder nur eine geringfügige Störwirkung erzeugt. Die mittlere Probandenbewertung liegt also stets unterhalb eines Wertes von zwei auf der Bewertungsskala.

Im Vergleich zu den Ergebnissen aus Abbildung 5.20 konnte zwischen der mittleren Probandenbewertung und dem Kontrast von Objekten, die außerhalb der Blickrichtung liegen, kein Zusammenhang ermittelt werden.

Um dies zu belegen, zeigt Abbildung 5.21 die mittlere Probandenbewertung auf der Ordinate und den Kontrast der Objekte, die außerhalb der Blickrichtung liegen, auf der Abszisse. Ein eindeutiger Verlauf, wie eine Abnahme der Probandenbewertung mit zunehmendem Kontrast, wird in Abbildung 5.21 nicht sichtbar. Der geringe Einfluss der Objektkontraste im peripheren Sichtfeld zeigt sich beispielsweise daran, dass sich sowohl bei sehr niedrigen, als auch bei sehr hohen Objektkontrasten nahezu gleiche Störbewertungen ergeben. Bei einem annähernd konstanten Objektkontrast von 0,15 bis 0,16 ist außerdem zu sehen, dass die mittleren Probandenbewertungen mit Werten zwischen 1,14 und 3,98 fast die ganze Bewertungsskala abdecken

(vgl. Abb. 5.21).

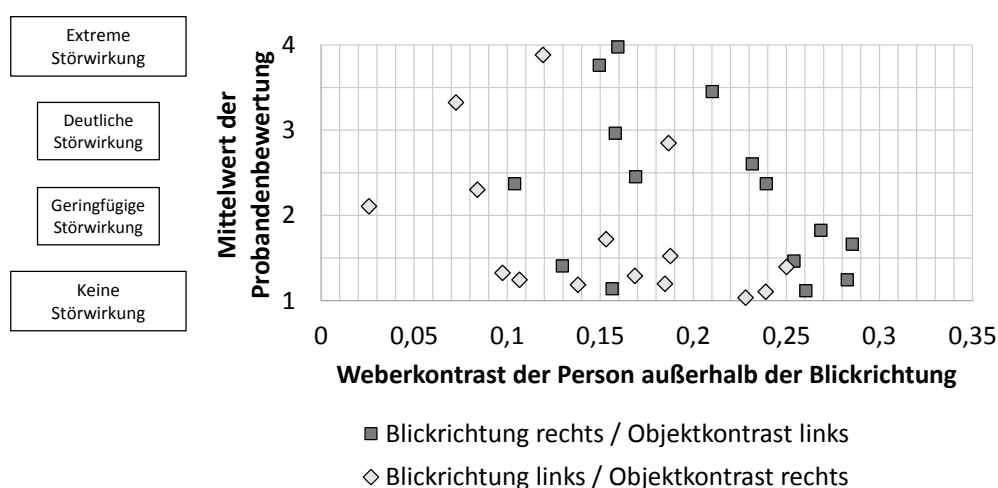


Abbildung 5.21: Mittlere Probandenbewertung der Streulichtverteilung in Abhängigkeit vom Weberkontrast der Person außerhalb der Blickrichtung

5.4.5 Diskussion der Ergebnisse

Ziel der Probandenstudie war es, Erkenntnisse über den Einfluss der Ausbreitungsrichtung von Streulicht, der qualitativen Ausprägung der Streulichtverteilung und der auftretenden Streuleuchtdichte auf das Störempfinden zu erlangen. Dies wurde durch den Aufbau eines Versuchsstandes im Labor ermöglicht, der die Voraussetzung zur Untersuchung in einer Probandenstudie unter realitätsnahen, konstanten und reproduzierbaren Bedingungen geschaffen hat.

Die hohe Wiederholgenauigkeit und die geringe Streuung bei der Bewertung identischer Lichtverteilungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten sind Indikatoren für konstante Versuchsbedingungen und eine klare, verständliche Aufgabenstellung für die Probanden. Der geringe Anteil der ausgeschlossenen Probanden nach Anwendung der Reliabilitätsregeln (Gl. 5.5 und 5.6) verringert die Streuung der mittleren Probandenbewertungen, hat jedoch keinen Einfluss auf die Tendenzen der Ergebnisse und die resultierenden Schlussfolgerungen. Es wurde außerdem gezeigt, dass der zeitliche Abstand zwischen zwei Wiederholungen im Versuch keine Tendenz aufweist, die auf einen Zusammenhang von Streuung der Ergebnisse und der Zeit schließen lassen (vgl. Abb. 5.16).

Die Untersuchung von Streulicht bei Nebel ist in aktuellen Forschungsarbeiten nur selten thematisiert worden (vgl. Kap. 2.5.2). Die hier dargestellten Ergebnisse bauen vor allem auf den Untersuchungen von ROSENHAHN auf, der in seiner Arbeit bereits Vorgaben für Scheinwerferlichtverteilungen bei Nebel gemacht hat [Ros99]. Die Simulation der Streuleuchtdichte in

unterschiedlichen vertikalen Winkelbereichen weisen die größten Streuleuchtdichten oberhalb des Horizonts für Winkel von $V=45^\circ$ auf. Im Bereich $V=90^\circ$ werden die geringsten Streuleuchtdichten berechnet (vgl. Kap.2.5.2 Abb. 2.8). Dies lässt die Annahme zu, dass Streulicht, welches in den Bereich um $V=90^\circ$ ausgesendet wird, nur eine sehr geringe Störwirkung mit sich bringt. Allerdings macht ROSENHAHN keine Aussage zur Störwirkung, er präsentiert lediglich die simulierten Leuchtdichteverteilungen [Ros99]. Der hier vorgestellte Versuchsaufbau ermöglichte eine direkte Untersuchung dieser These. Die ermittelte Störwirkung weist jedoch Unterschiede zu der vorher getroffenen Annahme auf. Bei einem Winkel von $V=20^\circ$ liegt die Bewertung stets zwischen eins und zwei. Es wurde also keine oder nur eine geringe Störwirkung der Streulichtquellen im Winkel von $V=20^\circ$ erzeugt. Mit Anstieg der vertikalen Winkel ist auch ein Anstieg der Probandenbewertung, also der Störwirkung zu beobachten, die ihr Maximum bei Abstrahlwinkeln von $V=90^\circ$ erreichen (vgl. Abb. 5.17 und Abb. 5.18). Damit ist die Störwirkung dort am größten wo bei ROSENHAHN die geringsten Streuleuchtdichten ermittelt wurden. Eine mögliche Ursache für die Abweichungen könnten die Streueigenschaften des Kunstnebels sein. Diese hatten nach visueller Prüfung einen ähnlichen Charakter zu realen Nebelbedingungen. In einem Artikel zur Bestimmung der Transparenz von Kunstnebel werden Tropfengrößen mit einem Durchmesser von 7,5 bis 22,2 μm angegeben, welche vergleichbar mit der Tropfengröße von Nebelpartikeln ist (Durchmesser von 2 bis 20 μm , vgl. Kap. 2.2.1 Tab. 2.1) [Zuy64]. Damit sind ähnliche Streueigenschaften des Kunstnebels zu erwarten. Die Simulation der Streuleuchtdichte kann jedoch nicht mit der Störwirkung gleichgesetzt werden. Einerseits verstärken räumliche Effekte die Störwirkung bei einem 90° -Abstrahlwinkel, da die Lichtquelle sehr nah erscheint. Andererseits wird bei der Simulation von Rosenhahn die Leuchtdichte nur entlang einer Schnittgeraden durch die Leuchtdichtekeule simuliert. Das menschliche Auge erfasst seinen Sehbereich jedoch dreidimensional bzw. in einem Blickfeld, so dass auch Bereiche neben der von ROSENHAHN angenommenen Sichtlinie erfasst werden und in die Bewertung mit einfließen.

Die im Versuch ermittelten Ergebnisse zeigen, dass die Winkel $V=45^\circ$ und $V=90^\circ$ eine besonders deutliche Störwirkung hervorgerufen haben. Für die praktische Anwendung bedeutet das, dass dieser Bereich bei der Entwicklung von Scheinwerfern besonders berücksichtigt werden sollte, um die Sicht bei Nebel zu optimieren. Das heißt zum einen sollte eine obligatorische messtechnische Erfassung der Lichtstärkeverteilung erfolgen und zum anderen ist eine Minimierung des ausgesendeten Streulichts in diesem Bereich anzustreben. Auch Bereiche unterhalb von 45° sollten entsprechend berücksichtigt werden, sind jedoch weniger kritisch zu betrachten. Zudem sollte das Streulicht in Winkelbereichen unterhalb von $V=10^\circ$ bei Lichtverteilungen, die unabhängig von den Witterungsbedingungen eingesetzt werden, nicht minimiert werden, um bei klarer Sicht eine ausreichende Schilderbeleuchtung zu gewährleisten.

In der Probandenstudie wurden auch qualitative Ausprägungen von Lichtverteilungen untersucht. Eine Nachbildung der unterschiedlichen Streulichtklassen (A, B, C, D), die aus den Messungen realer Scheinwerferlichtverteilungen (vgl. Kap. 5.3.2) hervorgeht, konnte im Versuch

in stark vereinfachter Form dargestellt werden. Realisiert wurde eine Unterscheidung zwischen spotähnlichen und breiten Lichtverteilungen. Durch die Vorgabe von verschiedenen Blickrichtungen bei der Bewertung der Streulichtverteilungen konnten anhand dieser qualitativen Unterschiede wertvolle Aussagen abgeleitet werden. Eine flächenhafte Streulichtverteilung verursachte im Versuch die gleiche Störwirkung wie eine spotähnliche Lichtverteilung, wenn die Intensität gleich ist und eine Überlagerung der Streuleuchtdichte mit dem Sehobjekt gegeben war (vgl. Abb. 5.19 Blickrichtung L). Überlagerte sich die Blickrichtung nicht mit der Streuleuchtdichte, waren die Sehobjekte besser zu erkennen und die Störwirkung war dadurch geringer (vgl. Abb. 5.19 Blickrichtung R, spotähnliche Lichtverteilung). Eine Kontrastminderung hat demnach einen stärkeren Einfluss auf die Störwirkung als Leuchtdichte-Gradienten im peripheren Sichtfeld. Die Blickrichtung des Fahrzeugführers hat also vor allem bei inhomogenen Streulichtverteilungen einen großen Einfluss auf die Störbewertung.

In allen drei Blickrichtungen hatte der Kontrast des Objektes, welches in Blickrichtung zu sehen war, Einfluss auf das Störimpfinden. Je niedriger der Kontrast des Sehobjektes aufgrund der überlagerten Streuleuchtdichte war, desto höher war die Störbewertung. Dies wird besonders deutlich in Abbildung 5.20 dargestellt. Der Kontrast von Objekten außerhalb der Blickrichtung hatte im Gegensatz dazu keinen eindeutigen Zusammenhang gezeigt (vgl. Abb. 5.21). Damit wurde grundsätzlich belegt, dass die Überlagerung der Streuleuchtdichte und die damit einhergehende Kontrastreduzierung bei Nebel störend wirkt. Eine Übertragung der Ergebnisse auf eine reale Situation ist jedoch schwierig, da dem Fahrer im Realfall der direkte Vergleich zu einer streulichtfreien Referenzlichtverteilung fehlt. Ohne Referenzlichtverteilung kann eine Störbewertung unter realen Umgebungsbedingungen daher bei gleicher Streuleuchtdichte geringer ausfallen als bei den in Kapitel 5.4.4 vorgestellten Ergebnissen, obwohl die Kontraste stark reduziert sind und somit die Objekterkennung negativ beeinflusst wird (vgl. Kap. 5.2.3). Wie groß der Störeinfluss des Streulichts im Vergleich zu anderen Einflussfaktoren (z. B. Blendung durch Gegenverkehr, Einfluss des Alters der Testpersonen) konnte im Rahmen dieses Versuchs nicht getestet werden.

Streulicht im indirekten Sichtfeld hat zwar keine deutliche Störung hervorgerufen, kann jedoch eine Objekterkennung erschweren und somit ein Risiko darstellen. Um zu vermeiden, dass beispielsweise Objekte im indirekten Sichtfeld (z. B. Fußgänger) übersehen werden, sollten bei der Anforderungsdefinition für Lichtverteilungen alle Blickrichtungen gleich gewichtet werden.

6 Untersuchungen zur Bewertung von Streulicht bei Schnee

6.1 Zielstellung und Methodenübersicht

Ziel der Untersuchungen ist es, den störenden Einfluss von Streulicht bei Schneefall zu charakterisieren. Weiterhin sollen Zusammenhänge zwischen objektiven Kennzahlen und dem subjektiven Störempfinden, das durch Streulicht bei Fahrten im Schnee ausgelöst wird, ermittelt werden.

Die Entwicklung einer virtuellen Schneeumgebung im Nachtfahrssimulator, die auf einer Umgebung der Simulationssoftware LucidDrive basiert, bildet die Basis für die Untersuchungen. In einer Probandenstudie im Simulator haben die Teilnehmer verschiedene Lichtstärkeverteilungen hinsichtlich ihrer durch Streulicht ausgelösten Störwirkung bewertet. Dabei wurden die dargebotenen Lichtstärkeverteilungen durch Leuchtdichteaufnahmen eindeutig charakterisiert. In einer Korrelationsanalyse wurde außerdem der Einfluss unterschiedlicher Parameter der Lichtstärkeverteilung auf das Störempfinden und der Zusammenhang zwischen objektiven Kennzahlen und dem Störempfinden ermittelt.

6.2 Probandenstudie zum Thema Auswirkungen von Streulicht bei Schnee

6.2.1 Ziel des Versuchs

In einem Versuch im Nachtfahrssimulator sollte unter realitätsnahen Randbedingungen der Einfluss von Streulicht bei Schnee auf das subjektive Störempfinden untersucht werden. Ziel beim Aufbau der virtuellen Strecke war es, eine möglichst realitätsnahe Abbildung einer Fahrsituation im Schnee und die Möglichkeit einer variablen Gestaltung der Lichtstärkeverteilung zu erzeugen. In der Probandenstudie sollte der Einfluss folgender Parameter auf das Störempfinden ermittelt werden:

1. Einfluss der Gesamtlichtverteilung messtechnisch erfasster Scheinwerferlichtverteilungen.
2. Einfluss der Streulichtintensität.

3. Einfluss der Farbtemperatur.
4. Einfluss der Ausbreitungsrichtung (vertikaler Abstrahlwinkel) des Streulichts.

6.2.2 Versuchsaufbau

Im Folgenden soll der Aufbau des Nachtfahrssimulators und der virtuellen Umgebung der Schneesimulation vorgestellt werden.

Aufbau des Nachtfahrssimulators

Der für die Studie eingesetzte Nachtfahrssimulator besteht aus einem Verbund von Rechnern, Projektoren und Leinwänden. Ein Master-Rechner übermittelt die Simulationsdaten über eine Netzwerkverbindung an drei Client-Rechner. Die Bildinformationen der Client-Rechner werden durch drei Projektoren auf drei ebene Wände abgebildet, die eine räumliche Darstellung mit einem Sehwinkel von bis zu 204° ermöglichen. Die Abmessungen und der Aufbau des Nachtfahrssimulators sind in Abbildung 6.1 dargestellt.

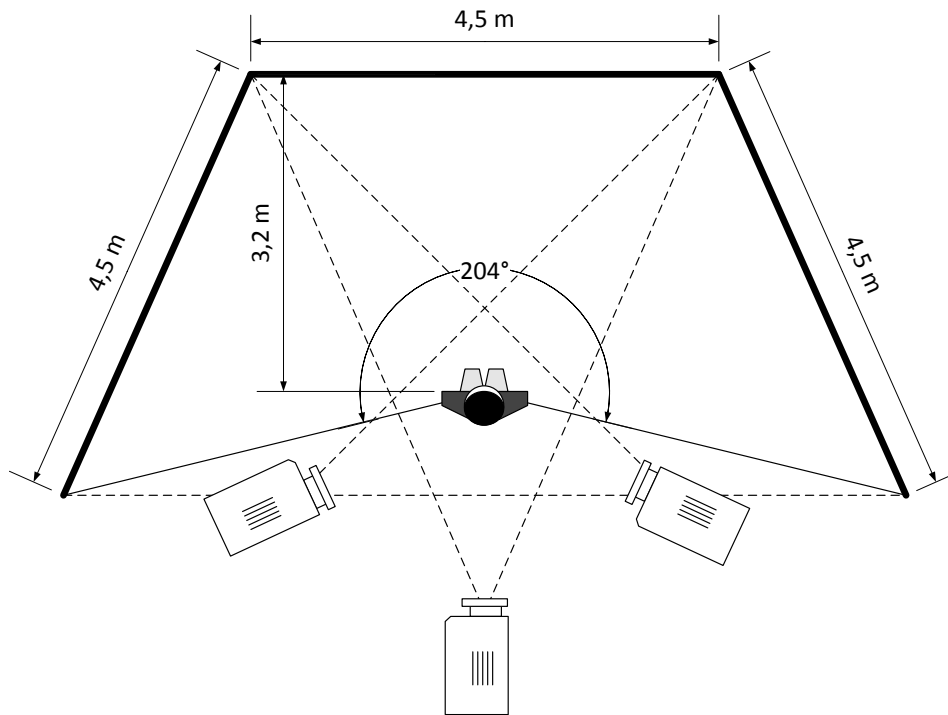


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung der räumlichen Anordnung von Projektoren, Wänden und der Versuchsperson im Nachtfahrssimulator (vgl. [Gra13])

Die realistische Darstellung der Lichtstrahlen bzw. der Objekt-Leuchtdichten erfolgt in der Simulationssoftware durch Strahlenverfolgung, das sog. Raytracing. Die Software LucidDrive nutzt hierfür die OpenGL (Offene Grafikbibliothek) und den Grafikkartenbeschleuniger. Mittels Texturen und der Nutzung einer bidirektionalen Reflektanzverteilung (BRDF) wird ein

photorealistisches Aussehen erreicht. Als Eingangsdaten werden Lichtstärkeverteilungen im ies-Datenformat (*.ies) eingebunden, die die Lichtstärkewerte für beliebige Abstrahlrichtungen enthalten können.

In der Probandenstudie wurde die Simulation der Schneefahrt im Maßstab 1:1 mit einer Auflösung von 1920 x 1080 Bildpunkten auf der mittleren Leinwand dargestellt. Auf die von der Testperson links liegende Wand wurden Informationen zum Versuch eingeblendet (z. B. Bewertungsskala), auf die rechts liegende Leinwand wurde ein schwarzer Hintergrund projiziert. Die Wände haben jeweils eine Höhe von 2,50 m und eine Breite von 4,45 m. Der Proband nahm in einer Sitzkiste, welche mit den wesentlichen Original-Komponenten eines Fahrzeuges ausgestattet war (z. B. Lenkrad, Armaturen, Schalthebel) in 3,20 m Entfernung zur Wand platz [Web13].

Aufbau der virtuellen Simulationsumgebung

Um die Störwirkung von Streulicht bei Schnee zu untersuchen, wurde ein Streckenabschnitt entworfen, der zur Beurteilung unterschiedlicher Lichtstärkeverteilungen bei Schnee herangezogen wird. Die Strecke bestand aus einem 200 m langen und gerade verlaufenden Landstraßenabschnitt (eine Fahrspur pro Richtung). Am Fahrbahnrand befanden sich Leitpfosten im Abstand von 50 m. Außerdem beinhaltete der Streckenabschnitt ein Verkehrszeichen am Fahrbahnrand und eines über der Fahrbahn. An mehreren Stellen auf der Fahrbahn und Gegenfahrbahn befanden sich zudem Grautafeln. Sowohl die Lage als auch die Anzahl der Grautafeln variierte im Laufe des Versuchs. Abbildung 6.2 zeigt den Streckenabschnitt schematisch in Vogelperspektive (links) und aus Fahrerperspektive (rechts).

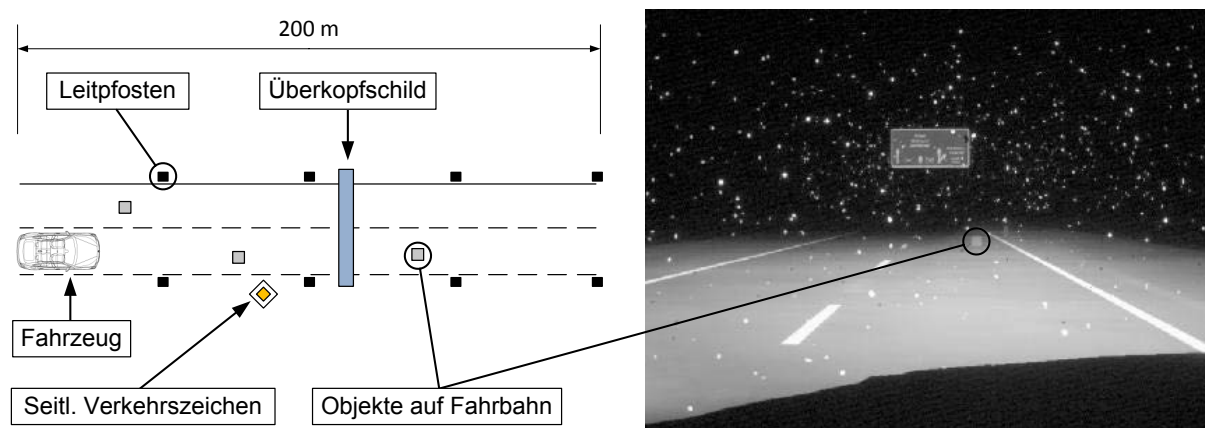


Abbildung 6.2: Schematische Darstellung der virtuellen Versuchsstrecke aus Vogelperspektive (links) und aus Fahrerperspektive (rechts)

Um die Wirkung einer Fahrt bei Schneefall nachzubilden, wurde eine Fahrbahnoberfläche mit geringen Kontrasten zu den Fahrbahnmarkierungen gewählt und auf die Darstellung von satten Farben verzichtet. Die Wirkung des Schneefalls wurde durch das Einbinden selbst modellierter

Schneeflocken erreicht (vgl. Abb. 6.2). Die Schneeflocken wurden durch kreisrunde Flächen angenähert, die in ungeordneter Winkellage frei im Raum verteilt waren und somit Streulicht der Scheinwerfer in Richtung des Fahrers reflektierten. Die Flächen wiesen dabei ein lambertsches Reflexionsverhalten auf. Die Schneeflockendichte betrug $5,56 \text{ Flocken/m}^3$. Auf eine detaillierte Beschreibung der Schneeflocken wird an dieser Stelle verzichtet. Diese kann in Kapitel 8.2 nachgelesen werden. Aufgrund der sehr rechenintensiven Darstellung wurden die Sequenzen in Form von kurzen Videos dargeboten. Die Probanden haben das Fahrzeug während des Versuchs daher nicht selbst durch Gaspedal und Lenkrad steuern können. Der Vorteil lag einerseits in der reduzierten Fehlerhäufigkeit (z. B. durch Programmabstürze, Ruckeleffekte) und andererseits in einer erhöhten Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen.

Im Versuch dargestellte Lichtverteilungen

Um die in Kapitel 6.2.1 aufgeführten Versuchsziele erreichen zu können, wurden im Versuch insgesamt 30 unterschiedliche Lichtverteilungen dargestellt, deren Simulationen teilweise auf messtechnisch erfassten Daten und teilweise auf digital modellierten Daten basierten. Die verwendeten Lichtstärkeverteilungen, die am Goniofotometer gemessen wurden, wiesen unterschiedliche Streulichtcharakteristika bzw. -klassen auf (vgl. Kap. 5.3.2), um zu ermitteln, ob sich diese Unterschiede auch in der Störbewertung widerspiegeln. Um den Einfluss des Streulichts unabhängig von der Grundlichtverteilung bewerten zu können, wurden die Beispiele jeweils mit und ohne Streulicht dargeboten. Die digital modellierten Streulichtverteilungen variierten bei gleichbleibender Grundlichtverteilung gezielt die Streulichtintensität, die Farbtemperatur und den vertikalen Abstrahlwinkel, um den Einfluss dieser Parameter beurteilen zu können.

Drei Lichtverteilungen, die im Versuch zum Einsatz kamen, sind als Beispiele in Abbildung 6.3 dargestellt. Im linken Beispiel ist eine aus Messungen am Goniofotometer abgeleitete Lichtverteilung inklusive Streulicht zu sehen. In der Mitte ist die um den Streulichtanteil bereinigte Lichtverteilung zu sehen (vgl. „LV A“ aus Tab. 6.1, Nr. 1/2). Rechts im Bild ist eine Streulichtverteilung zu sehen, die im Bereich von $V=15^\circ$ bis 25° eine gleichmäßige Lichtstärke von 500 cd aufweist (vgl. „Vert. Winkel V_2 “ aus Tab. 6.1, Nr. 18). Eine grafische Darstellung aller Lichtverteilungen ist in Anhang F in Abbildung F.1 und F.2 enthalten.

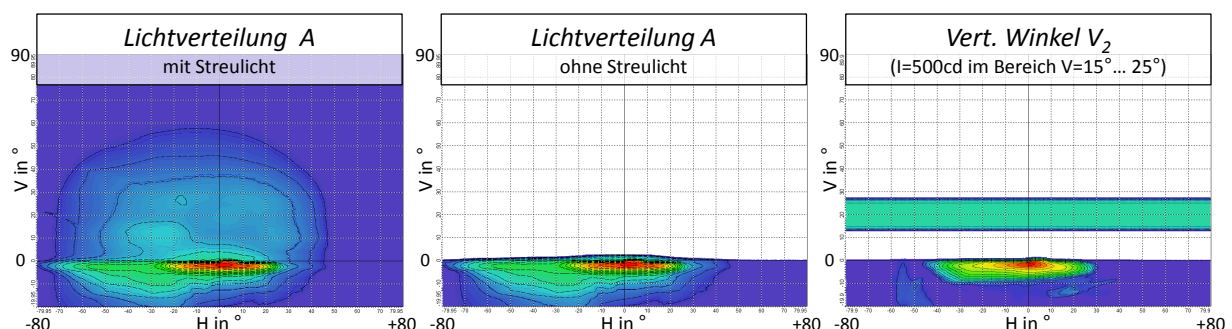


Abbildung 6.3: Beispiele von Lichtverteilungen aus dem Versuch Störwirkung durch Streulicht bei Schnee

Im Folgenden werden die einzelnen Lichtverteilungen anhand der in der Simulationssoftware hinterlegten Lichtstärkeverteilung und Farbtemperatur charakterisiert. Die hier beschriebenen und im Versuch verwendeten Lichtverteilungen (LV) sind in Tabelle 6.1 außerdem nochmal vollständig aufgeführt.

Sechs Lichtverteilungen entstammten den Messungen aus Kapitel 5.3 (LV A/B/C/D/E/F). Diese wurden jeweils in einer kaltweißen Farbtemperatur (6700 K) in zwei Varianten dargeboten. In der ersten Variante war der Streulichtbereich bis zu einem Winkel von $V=90^\circ$ enthalten (vgl. Abb. 6.3 links). In der zweiten Variante wurde oberhalb von $V=2,5^\circ$ kein Licht mehr emittiert (vgl. Abb. 6.3 Mitte).

Weiterhin wurden zwei reale Lichtverteilungen (Farbe 01, Farbe 02) in den Farbtemperaturen 5200 K, 5950 K und 6700 K, dargestellt.

Eine weitere Reihe von vier Lichtverteilungen besaß dieselbe Grundlichtverteilung in einem Winkelbereich von $V=-20^\circ$ bis $V=2,5^\circ$. Im Streulichtbereich wurde eine konstante Lichtstärke von 500 cd innerhalb eines definierten vertikalen Abstrahlwinkels emittiert. Somit bestand die Lichtverteilung jeweils aus der Grundlichtverteilung und einem schmalen Streulichtbereich V_i , der eine Ausdehnung von 10° hatte und mit „Vert. Winkel V_i “ bezeichnet wird ($V_1=2,5^\circ \dots 12,5^\circ$; $V_2=15^\circ \dots 25^\circ$; $V_3=35^\circ \dots 45^\circ$; $V_4=80^\circ \dots 90^\circ$; vgl. Abb. 6.3 rechts).

Eine weitere Reihe von Lichtverteilungen variierte die Lichtintensität im Streulichtbereich in fünf Intensitätsstufen ($I_1=100$ cd; $I_2=500$ cd; $I_3=1\,000$ cd; $I_4=5\,000$ cd; $I_5=10\,000$ cd; vgl. Abb. 6.3). Die fünf Stufen wurden für eine im vertikalen Winkelbereich von $2,5^\circ$ bis 90° (Int A) und für eine im vertikalen Winkelbereich von $2,5^\circ$ bis 15° (Int B) ausgeleuchtete Lichtverteilung angewendet.

Tabelle 6.1: Übersicht der im Versuch dargebotenen Lichtverteilungen

Nr.	Bez.	Beschreibung	Farbtemp.
Messtechnisch erfasste Daten			
1/2	LV A	Messdaten aus Goniofotometer mit (#1)/ohne (#2) Streulicht	6 700 K
3/4	LV B	Messdaten aus Goniofotometer mit (#3)/ohne (#4) Streulicht	6 700 K
5/6	LV C	Messdaten aus Goniofotometer mit (#5)/ohne (#6) Streulicht	6 700 K
7/8	LV D	Messdaten aus Goniofotometer mit (#7)/ohne (#8) Streulicht	6 700 K
9/10	LV E	Messdaten aus Goniofotometer mit (#9)/ohne (#10) Streulicht	6 700 K
11/12	LV F	Messdaten aus Goniofotometer mit (#11)/ohne (#12) Streulicht	6 700 K
Farbtemperatur			
13/14	Farbe 01	LV C in unterschiedlichen Farbtemperaturen	5 200 K/ 5 950 K
15/16	Farbe 02	LV A in unterschiedlichen Farbtemperaturen	5 200 K/ 5 950 K
Vertikaler Abstrahlwinkel			
17-20	Vert. Winkel V_i	Streulicht in definierten Winkelbereichen mit $I=500$ cd ($V_1=2,5^\circ \dots 12,5^\circ$; $V_2=15^\circ \dots 25^\circ$; $V_3=35^\circ \dots 45^\circ$; $V_4=80^\circ \dots 90^\circ$)	6 700 K
Streulichtintensität			
21-25	Int A	Streulicht im Bereich $V=2,5^\circ \dots 90^\circ$ in unterschiedlicher Intensität ($I_1=100$ cd; $I_2=500$ cd; $I_3=1\ 000$ cd; $I_4=5\ 000$ cd; $I_5=10\ 000$ cd)	6 700 K
26-30	Int B	Streulicht im Bereich $V=2,5^\circ \dots 15^\circ$ in unterschiedlicher Intensität ($I_1=100$ cd; $I_2=500$ cd; $I_3=1\ 000$ cd; $I_4=5\ 000$ cd; $I_5=10\ 000$ cd)	6 700 K

Fotometrische Beschreibung der virtuellen Umgebung

Zur fotometrischen Beschreibung der virtuellen Umgebung wurden im Nachtfahrssimulator Leuchtdichteaufnahmen aus Sicht der Testpersonen durchgeführt. Diese Aufnahme wurde an einer ausgewählten Stelle der Strecke mit einer ortsauflösenden Leuchtdichtekamera der Firma TechnoTeam vom Typ *LMK 98-3 Color* durchgeführt und für jede Lichtverteilung wiederholt. Der Farbort wurde durch ein Spektrometer der Firma Jeti vom Typ *spechos 1201* ermittelt.

Die Umgebungsleuchtdichte oberhalb des Horizonts betrug ca. $0,04 \text{ cd m}^{-2}$ bei allen Lichtverteilungen. Die Leuchtdichte der Schneeflocken erreichte je nach Intensität der Lichtstärkeverteilung, Entfernung und Relativlage zum Scheinwerfer Werte von maximal $12,5 \text{ cd m}^{-2}$. Die Leuchtdichte der Fahrbahn war stark abhängig von der Lichtstärkeverteilung. Da die Lichtstärken im Abblendlichtbereich teilweise sehr unterschiedliche Intensitätsmaxima aufwiesen, schwankten die Werte entsprechend. Im Mittel wurde eine Fahrbahnleuchtdichte von $L = 4 \dots 5 \text{ cd m}^{-2}$ ermittelt, wobei bei einigen Lichtverteilungen Maximalwerte von $L = 9 \dots 10 \text{ cd m}^{-2}$ an der hellsten Stelle der Fahrbahn gemessen wurden. Die Messung der Farbtemperatur der Lichtverteilungen auf einer virtuellen weißen Wand ergab Werte von $5\,200 \text{ K}$, $5\,950 \text{ K}$ und $6\,700 \text{ K}$ (vgl. Tab. 6.1).

Eine weitere Möglichkeit der fotometrischen Charakterisierung der einzelnen Lichtverteilungen ist die Anzahl der sichtbaren Schneeflocken im Streulichtbereich. In Abbildung 6.4 ist die Gesamtanzahl der Schneeflocken, die im Streulichtbereich eine Leuchtdichte von $L > 0,25 \text{ cd m}^{-2}$ aufweisen, grafisch dargestellt.

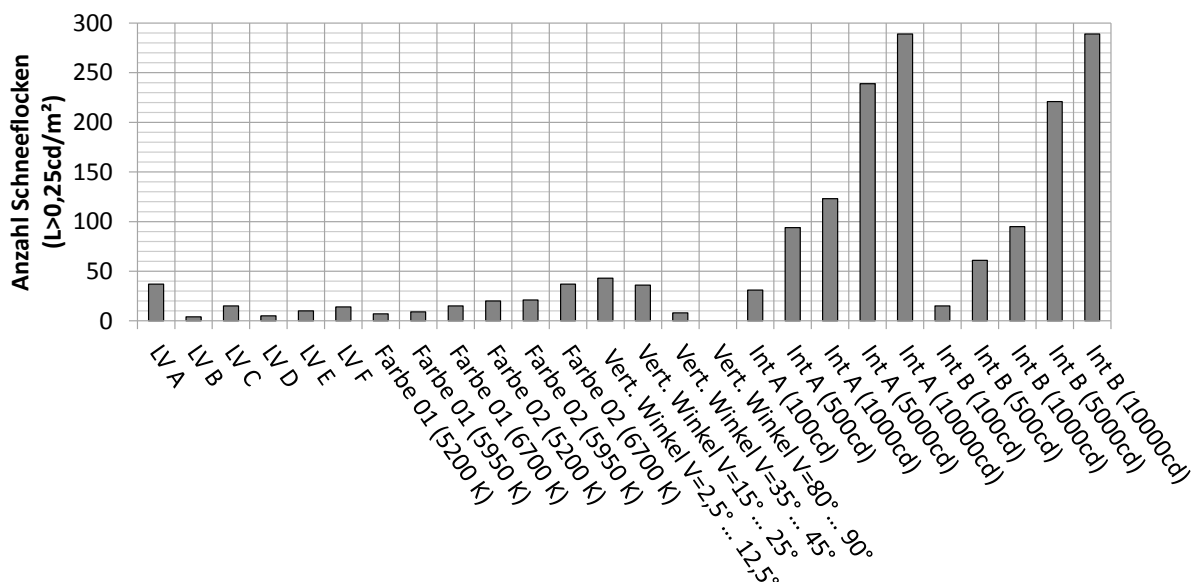


Abbildung 6.4: Anzahl der Schneeflocken mit einer Leuchtdichte von $L > 0,25 \text{ cd m}^{-2}$

Die Messung der Lichtverteilungen erfolgte in einem Standbild der virtuellen Umgebung aus Fahrerperspektive. Erfasst wurden alle Schneeflocken, die im Streulichtbereich eine mittlere Leuchtdichte von $L = 0,25 \text{ cd m}^{-2}$ oder höher aufwiesen. Da die Objekterkennung im Versuch und in realen Fahrsituationen von vielen Faktoren, wie z. B. dem Alter der Person, der Adaptationsleuchtdichte und der Objektgröße abhängt, wurde die Erkennbarkeitsschwelle anhand einzelner Testpersonen ermittelt und auf den Wert von $L = 0,25 \text{ cd m}^{-2}$ festgelegt.

Abbildung 6.4 zeigt, dass die Anzahl der sichtbaren Schneeflocken stark variiert, was auf die unterschiedlichen Lichtstärkeverteilungen zurückzuführen ist. Einzelne Lichtverteilungen weisen weniger als zehn Schneeflocken auf. Als maximale Anzahl werden fast 300 Schneeflocken bei den virtuell modellierten Lichtverteilungen gleichzeitig sichtbar. Anhand der virtuell modellierten Lichtverteilungen „Int A“ und „Int B“ wird deutlich, dass mit zunehmender Intensität der Lichtstärke bei gleichbleibender Verteilung die Anzahl der sichtbaren Schneeflocken zunimmt.

6.2.3 Versuchsablauf und Rahmenbedingungen

Der Versuch war so konzipiert, dass die Probanden die in Kapitel 6.2.2 vorgestellte virtuelle Strecke (vgl. Abb. 6.2) bei Schneefall mit allen Lichtverteilungen „befahren“ und deren Störwirkung bewerten konnten. Die Bewertung erfolgte anhand von Videosequenzen aus Fahrerperspektive ohne aktive Steuerung des Fahrzeugs durch die Testpersonen. Nachdem ein Streckenabschnitt mit einer Lichtverteilung dargeboten wurde, erfolgte die Bewertung der durch den Schneefall bzw. die Lichtverteilung hervorgerufenen Störwirkung. Um die Bewertungsaufgabe klar für die Testpersonen zu definieren, wurde vor dem Versuch darauf hingewiesen, dass nicht die allgemeine Fahrbahnausleuchtung, sondern nur der Einfluss und die Störung durch den Schneefall bzw. die Schneeflocken bewertet werden soll. Da die Probanden das Fahrzeug nicht selber steuern konnten, erhielten sie bei jeder Fahrt eine Aufgabe, welche die Konzentration und den Blick auf die Fahrbahn lenkte. Die Aufgabe bestand darin, die Anzahl von Objekten zu zählen, die sich auf der Fahrbahn befanden. Als Objekte wurden quadratische, kontrastarme Tafeln ausgewählt. Die Anzahl betrug mindestens eins und maximal fünf und variierte genau wie die Position der Objekte mehrmals im Laufe des Versuchs.

Vor Beginn des Versuchs beurteilte der Proband zur Übung acht Lichtverteilungen. Die Beispiele deckten ein breites Spektrum an Lichtverteilungen ab, in dem die extremen Ausprägungen (sehr viel bzw. sehr wenig Streulicht) abgedeckt wurden. Auch zwei Beispiele ohne Schnee wurden dargeboten. Anschließend startete der Versuch, bei dem jede der insgesamt 30 unterschiedlichen Lichtverteilungen je zweimal dargeboten wurde. Insgesamt gab der Proband damit 68 Bewertungen ab (inkl. Übungsbeispiele). Die Darbietung der Lichtverteilungen erfolgte für jeden Probanden in einer individuellen, zufälligen Reihenfolge. Die Versuchsdauer lag bei ca. 30 Minuten pro Person.

Der Proband erhielt zu Beginn des Versuchs Informationen zum Versuch, welche seitlich an die linke Wand des Fahrsimulators projiziert wurden (vgl. Abb. 6.1). Diese beinhalteten eine Beschreibung des Versuchsablaufs und die Erklärung der Bewertungsskala (vgl. Tab. 6.2).

Tabelle 6.2: Bewertungsskala zum Versuch „Störung durch Streulicht bei Schnee“

Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4
Keine Störwirkung	Geringe Störwirkung	Deutliche Störwirkung	Inakzeptable Störwirkung

Die Bewertung erfolgte auf einer vierstufigen, unipolaren Skala redundant zum Versuch „Streulichtbewertung bei Nebel“. Die Bewertungsskala gab die Möglichkeit, die Lichtverteilung in einem Bereich von keiner Störwirkung bis zu einer extremen bzw. inakzeptablen Störwirkung einzuordnen. Im Einzelnen wurden die Bewertungsschritte nach Tabelle 6.2 festgelegt.

Das Probandenkollektiv bestand aus 47 Versuchsteilnehmern im Alter von 21 bis 55 Jahren. Das Durchschnittliche Alter der Teilnehmer lag bei 30,6 Jahren. 36 Teilnehmer waren männlich und 11 weiblich und insgesamt trugen 19 Probanden eine Sehhilfe. Die Auswahl der Probanden erfolgte analog zu Kapitel 5.4.3.

Im Folgenden werden die Rahmenbedingungen zum Versuch nochmals tabellarisch aufgeführt (vgl. Tab. 6.3).

Tabelle 6.3: Zusammenstellung der Rahmenbedingungen zum Versuch „Auswirkungen von Streulicht bei Schnee“

Übersicht der Rahmenbedingungen	
Anzahl der Bewertungen	68
davon Übungsbeispiele	8
davon Wiederholungen	30
Umgebungsleuchtdichte	$\approx 0,04 \text{ cd m}^{-2}$
Mittlere Fahrbahnleuchtdichte	$\approx 4 \dots 5 \text{ cd m}^{-2}$
Dauer des Versuches	30 Minuten
Anzahl Versuchspersonen	47
Alter der Probanden (Durchschnittsalter)	22–55 Jahre (30,6 Jahre)
Bewertungsskala	Unipolar, vier Stufen

6.2.4 Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Probandenstudie vorgestellt. Die Darstellung umfasst zum einen die Auswertung der Lichtverteilungen, deren Simulationsdaten aus einer Messung am Goniofotometer entstammen. Zum anderen wird der Einfluss der Lichtfarbe, der Einfluss des vertikalen Abstrahlwinkels und der Einfluss der Intensität dargestellt. Der Großteil des Probandenkollektivs bewertete die Lichtverteilungen unter Ausnutzung der ganzen Bewertungsskala, wobei die Bewertungsstufe vier (inakzeptable Störwirkung) nur selten gebraucht wurde. Einzelne Testpersonen fühlten sich durch keine der dargebotenen Lichtverteilungen im Versuch deutlich gestört. Infolgedessen verwendeten diese Personen lediglich die Bewertungsstufen eins und zwei. Das Zählen der Sehobjekte auf der virtuellen Strecke diente dazu, die Konzentration der Testpersonen auf die Fahrbahn zu lenken und war als Aufgabe sehr einfach konzipiert. Abhängig von der Lichtverteilung haben mindestens 85 % der Probanden die Anzahl der Grautafeln korrekt gezählt. Im besten Fall waren es alle, also 100 % der Testpersonen. Ein Trend zu größeren Abweichungen bei höheren Streulichtanteilen konnte nicht festgestellt werden.

Vergleich messtechnisch erfasster Simulationsdaten mit und ohne Streulicht

Abbildung 6.5 zeigt das Ergebnis der Bewertung der Lichtverteilungen, deren Simulationsdaten durch Messung realer Scheinwerfer erfasst wurden, jeweils mit und ohne Streulicht. Als Vertrauensbereich wurde das 95 %-Konfidenzintervall als Fehlerindikator mit angetragen. Die Lichtverteilungen werden dabei alphabetisch von LV A bis LV F geordnet (vgl. Tab. 6.1).

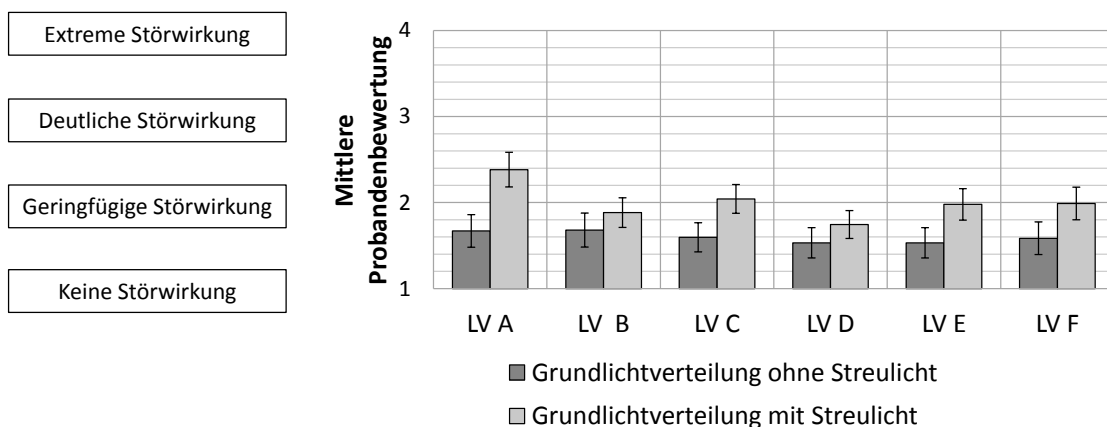


Abbildung 6.5: Ergebnis der Bewertung von messtechnisch erfassten Scheinwerferlichtverteilungen mit und ohne Streulicht

Unabhängig davon, ob Streulicht vorhanden ist oder nicht, erhält keine der Lichtverteilungen eine Bewertung, die im Mittelwert einen Wert von $B = 3$ (deutliche Störwirkung) erreicht. Die einzelnen Lichtverteilungen weisen eine unterschiedliche Bewertung auf. Deutlich wird, dass alle Lichtverteilungen mit Streulicht im Mittel stets schlechter bewertet werden als Verteilungen ohne Streulicht. Vergleicht man die Lichtverteilungen ohne Streulicht, erkennt man, dass

auch hier Unterschiede zu erkennen sind. Für beide Fälle (Lichtverteilungen mit und ohne Streulicht) wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt. Die Nullhypothese „ H_0 : alle Bewertungen sind gleich“ konnte auf einem Signifikanzniveau von 5% für die Lichtverteilungen ohne Streulicht nicht widerlegt werden ($p = 0,44245$), für die Lichtverteilungen mit Streulicht hingegen schon ($p = 5,79 \cdot 10^{-10}$). Damit sind die Unterschiede in der Bewertung signifikant abhängig von der Streulichtverteilung/-intensität. Eine Abhängigkeit der Störbewertung von der Grundlichtverteilung (Lichtverteilungen ohne Streulicht) konnte hingegen nicht gezeigt werden.

Einfluss der Farbtemperatur

In Abbildung 6.6 werden die Ergebnisse der Bewertung zweier Lichtverteilungen mit unterschiedlichen Farbtemperaturen dargestellt. Aufgezeigt werden die Probandenbewertungen für zwei Lichtverteilungen (Lichtverteilung Farbe 01 und 02), die jeweils in drei Farbtemperaturen dargestellt wurden. Als Vertrauensbereich wird auch hier das 95%-Konfidenzintervall als Fehlerindikator angetragen.

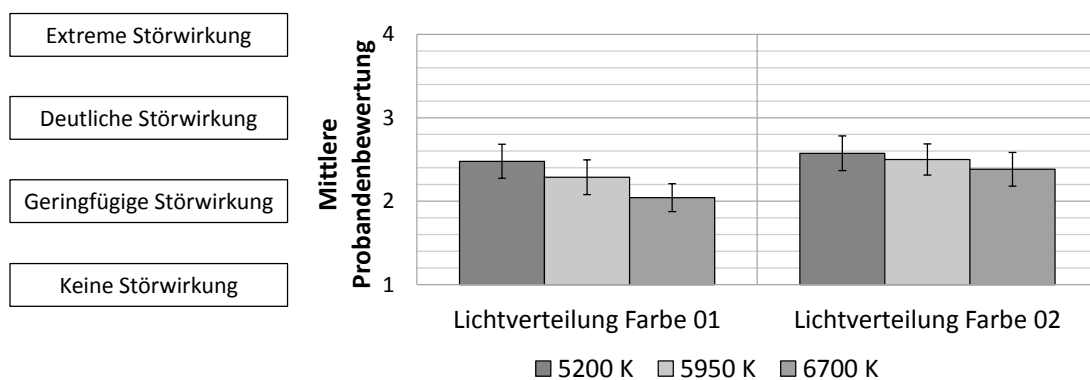


Abbildung 6.6: Ergebnis der Bewertung unterschiedlicher Farbtemperaturen für zwei Lichtverteilungen

Bei beiden Lichtverteilungen ist die gleiche Tendenz sichtbar. Je höher die Farbtemperatur ist, desto niedriger ist die mittlere Probandenbewertung, also die Störbewertung. Dieser Trend ist mit einer Gesamtdifferenz von 0,4 Skalenpunkten bei „Lichtverteilung Farbe 01“ deutlich stärker ausgeprägt als mit einer Gesamtdifferenz von 0,1 Skalenpunkten bei „Lichtverteilung Farbe 02“ (vgl. Abb. 6.6).

Sowohl für die Lichtverteilung „Farbe 01“ als auch für „Farbe 02“ wurden Unterschiede in der Störbewertung ermittelt, was anhand von Abbildung 6.6 bereits deutlich wird. Um die Signifikanz der Unterschiede zu ermitteln, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) für beide Beispiele durchgeführt. Dabei wird die Nullhypothese (H_0 : Alle Mittelwerte sind gleich bzw. $H_0: \bar{B}_{5200K} = \bar{B}_{5950K} = \bar{B}_{6700K}$) abgelehnt, wenn die Prüfgröße (F) größer als der kritische Wert (F_{krit}) ist. Das Ergebnis zeigt, dass die Schwankungen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit

von 5 % für die „Lichtverteilung Farbe 01“ auf die Änderung der Farbtemperatur zurückzuführen sind ($p = 8,05 \cdot 10^{-5}$). Im Gegensatz dazu sind die Schwankungen bei „Lichtverteilung Farbe 02“ nicht eindeutig auf den Einfluss der Farbtemperatur zurückzuführen ($p = 0,16487$). In Tabelle 6.4 werden die Ergebnisse der ANOVA aufgeführt.

Tabelle 6.4: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse für unterschiedliche Farbtemperaturen ($\alpha = 0,05$, $H_0: \bar{B}_{5200K} = \bar{B}_{5950K} = \bar{B}_{6700K}$)

	p-Wert	Prüfgröße (F)	kritischer Wert (F_{krit})	Nullhypothese (H_0)
Lichtverteilung Farbe 01	$8,05 \cdot 10^{-5}$	9,7526	3,0281	Ablehnung von H_0
Lichtverteilung Farbe 02	0,16487	1,8143	3,0281	Annahme von H_0

Die Messung der Leuchtdichte der Schneeflocken für die dargestellten Beispiele hat ergeben, dass sich mit einer Erhöhung der Farbtemperatur im Fahrsimulator um 750 K auch eine Erhöhung der Fahrbahn- und Schneeflockenleuchtdichte um 20 % bis 30 % einstellt. In Tabelle 6.5 sind für drei Schneeflocken die mittlere Leuchtdichtewerte und die mittlere prozentuale Änderung angegeben.

Tabelle 6.5: Leuchtdichte der Schneeflocken in Abhängigkeit der eingestellten Farbtemperatur

Farbtemperatur in K	L_{Farbe01} in cd m^{-2}	$\Delta L_{\text{Farbe01}}$ in %	L_{Farbe02} in cd m^{-2}	$\Delta L_{\text{Farbe02}}$ in %
5 200	1,42	0	4,04	00
5 950	1,75	24	4,89	21
6 700	2,24	54	6,42	52

Das bedeutet, dass eine Erhöhung der Farbtemperatur auch eine Erhöhung der Anzahl an Schneeflocken bedingt, die eine Leuchtdichte von mehr als $0,25 \text{ cd m}^{-2}$ aufweisen. Dies geht auch aus der in Kapitel 6.2.2 dargestellten Übersicht der Gesamtanzahl der sichtbaren Schneeflocken in Abbildung 6.4 hervor. Trotzdem sinkt die mittlere Probandenbewertung mit zunehmender Farbtemperatur (vgl. Abb. 6.6).

Einfluss des vertikalen Abstrahlwinkels

Abbildung 6.7 zeigt die mittlere Probandenbewertung in Abhängigkeit vom vertikalen Abstrahlwinkel. Dieser Zusammenhang wurde anhand von vier virtuellen Lichtverteilungen ermittelt, die bei gleicher Grundlichtverteilung einen schmalen Streulichtbereich mit unterschiedlichen vertikalen Abstrahlwinkeln ausleuchten (vgl. Tab. 6.1 „Vert. Winkel V_1, V_2, V_3 und V_4 “). Jeder Datenpunkt entspricht genau einer Lichtverteilung, die in einem vertikalen Winkelbereich mit einer Ausdehnung von 10° jeweils Streulicht mit einer virtuellen Lichtstärke von 500 cd emittiert. Als Wert für die Abszisse wird der Winkel V in Grad gewählt, der in der Mitte

des ausgeleuchteten Streulichtbereichs liegt. Damit wird eine Lichtverteilung, die im Bereich zwischen 35° und 45° Streulicht emittiert, im Diagramm dem Wert $V=40^\circ$ auf der Abszisse zugeordnet. Die Ordinate gibt die mittlere Probandenbewertung an und die Fehlerindikatoren entsprechen dem 95 %-Konfidenzintervall.

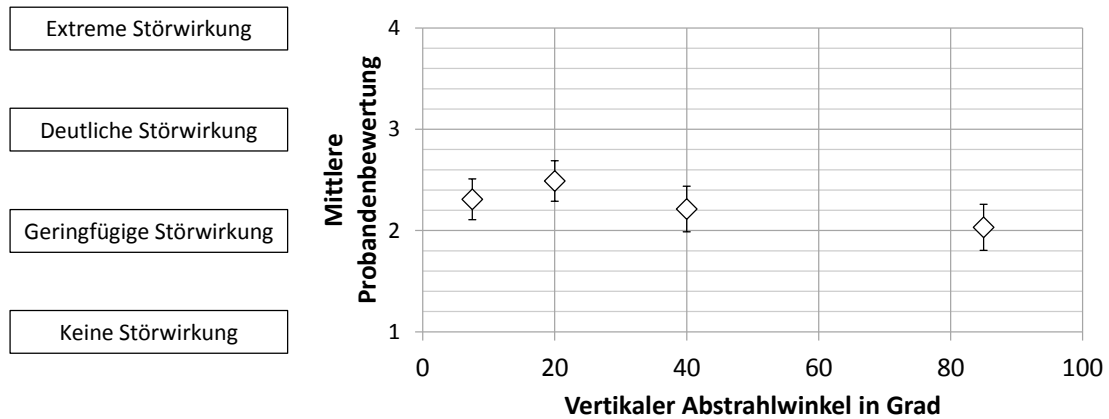


Abbildung 6.7: Ergebnis der Bewertung von Streulicht gleicher Intensität in verschiedenen vertikalen Winkelbereichen

Die mittleren Probandenbewertungen dieser Lichtverteilungen liegen zwischen zwei und drei, also zwischen einer geringfügigen und deutlichen Störwirkung. Betrachtet man den Verlauf der Probandenbewertungen über den vertikalen Abstrahlwinkel, sieht man, dass der Einfluss des Abstrahlwinkels im Vergleich zu den Ergebnissen der Untersuchungen aus Kapitel 5.4 (Streulichtbewertung bei Nebel) relativ gering ist. Die Bewertung ist bei Lichtverteilung V_2 ($V=20^\circ$) leicht höher als bei Lichtverteilung V_1 ($V=7,5^\circ$). Es ist also ein leichter Anstieg der mittleren Probandenbewertung zu erkennen. Für größere Abstrahlwinkel, also im Bereich von $V=20^\circ$ bis $V=85^\circ$ fällt die Bewertung wieder ab und erreicht bei $V=85^\circ$ (V_4) ihr Minimum. Das Verfahren der einfaktoriellen Varianzanalyse wurde auch für die vier hier dargestellten Lichtverteilungen angewendet. Die Prüfgröße F übersteigt dabei den kritischen Wert F_{krit} ($F = 6,1145$; $F_{krit} = 2,6289$). Da $F > F_{krit}$ wird die Nullhypothese, dass die Mittelwerte der Probandenbewertung der vier Lichtverteilungen gleich sind, mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % abgelehnt ($p = 0,00045$). Das bedeutet, dass die unterschiedliche Bewertung nicht nur auf die natürliche Streuung der Messwerte zurückzuführen ist, sondern der Abstrahlwinkel einen signifikanten Einfluss auf die Probandenbewertung hat.

Einfluss der Intensität der Lichtstärke im Streulichtbereich

Abbildung 6.8 zeigt die Lichtstärke auf der Abszisse in logarithmischer Darstellung und die mittlere Probandenbewertung auf der Ordinate. Die zwei Datenreihen bilden zwei Lichtverteilungen ab, die sich lediglich im Streulichtbereich unterscheiden. Der ausgeleuchtete Streulichtbereich befindet sich bei Lichtverteilung „Int A“ in einem vertikalen Winkelbereich von $V=2,5^\circ$ bis 90° bzw. bei „Int B“ in einem Bereich von $V=2,5^\circ$ bis 15° . Die Ausleuchtung im horizontalen

Bereich verläuft von $H=-80^\circ$ bis $+80^\circ$. Die Angabe des Bereichs ist in der Legende enthalten. Die Fehlerindikatoren entsprechen dem 95 %-Konfidenzintervall.

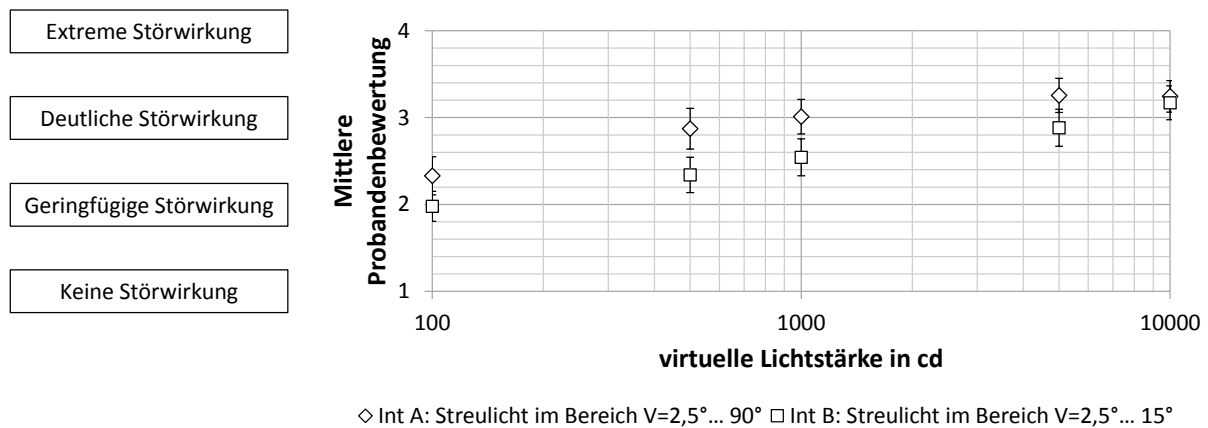


Abbildung 6.8: Ergebnis der Bewertung von zwei Lichtverteilungen mit variabler Intensität im Streulichtbereich

Die mittlere Störbewertung B der in Abbildung 6.8 dargestellten Lichtverteilungen liegt in einem Bereich von $B = 2$ und $B = 3,2$. Es ist erkennbar, dass beide Datenreihen mit zunehmender virtueller Lichtstärke (Intensität) auch kontinuierlich eine schlechtere Bewertung erhalten. Dabei liegt die Bewertung der Lichtverteilungen von Datenreihe „Int B: Streulicht im Bereich von $V=2,5^\circ \dots 15^\circ$ “ stets unter der Bewertung der Datenreihe „Int A: Streulicht im Bereich von $V=2,5^\circ \dots 90^\circ$ “. Wobei die letztgenannte Datenreihe keine Steigerung der Störbewertung beim Sprung von 5 000 auf 10 000 cd ausweist.

6.2.5 Diskussion der Ergebnisse

Die Unterschiede in der Bewertung der Streulichtverteilungen liefern einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis der Störfaktoren und zur Bewertung von Streulicht im Entwicklungsprozess von Scheinwerfern. Der Versuch bildete sowohl Lichtverteilungen ab, die keine oder nur eine geringe Störwirkung erzeugten, als auch Lichtverteilungen, die eine deutliche Störwirkung verursachten. Bei einigen Beispielen lag die virtuelle Lichtstärke mit 10 000 cd mehr als das 35-fache über dem Wert, der für eine Abblendlichtverteilung im Streulichtbereich zu erwarten ist. In der Analyse am Goniofotometer wurde eine maximale Lichtstärke von $I_{max,Streulicht} = 274$ cd gemessen (vgl. Kap. 5.3.2). Im Extremfall wurden so mittlere Störbewertungen von $B = 3,2$ erzielt. Für die meisten Probanden war demnach die Störwirkung zwar vorhanden, aber trotz der extrem hohen virtuellen Lichtstärke noch akzeptabel. Für eine reale Fahrsituation kann die Störwirkung jedoch noch deutlich höher sein. Die Ursache dafür wird auf Unterschiede zwischen der simulierten und einer realen Fahrsituation zurückgeführt, die die Störwirkung noch verstärken können. Im Unterschied zur realen Fahrsituation beinhaltet die virtuelle Simulationsumgebung nur eine gerade Streckenführung, eine konstante Anzahl an

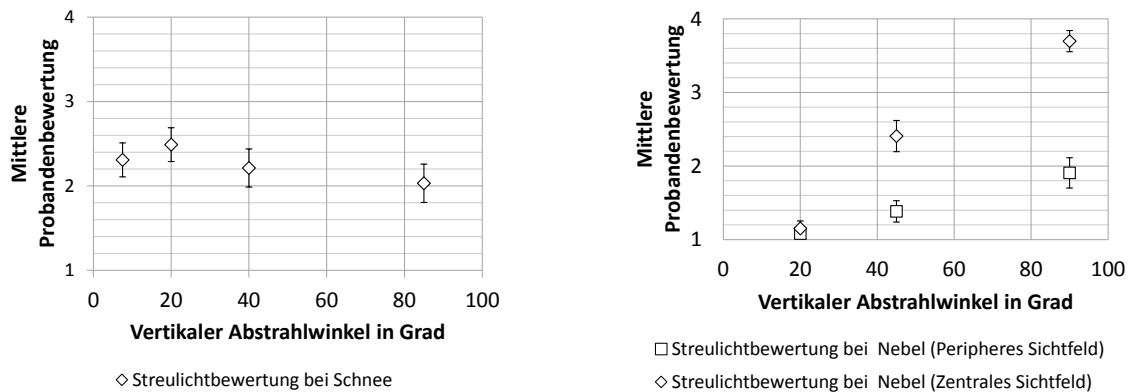
Schneeflocken pro m^3 und eine automatische Steuerung des Fahrzeugs. Die Fahraufgabe war entsprechend deutlich leichter, da weder ein Unfallrisiko noch eine erschwerte Steuerung des Fahrzeugs auf die Probanden einwirkte. Hinzu kommt, dass die Simulation nicht den Aufprall und das Schmelzen von Schneeflocken auf der Windschutzscheibe beinhaltete, was im realen Umfeld zusätzliche Reflexionen und eine Beeinträchtigung der Sichtverhältnisse mit sich bringt. Auch der Betrieb der Scheibenwischer wurde nicht nachgebildet. Diese Randbedingungen haben im Versuch zu einer deutlich entspannteren Grundhaltung der Probanden gegenüber einer realen Fahrsituation geführt. Diese spiegelt sich in der maximalen Störbewertung wieder. Die Relation der Bewertung der Lichtverteilungen zueinander behält jedoch seine Gültigkeit.

Die Gegenüberstellung realer Scheinwerfer mit und ohne Streulicht im Simulator hat zwei Dinge gezeigt (vgl. Abb. 6.5). Einerseits werden Scheinwerfer mit Streulicht stets schlechter bewertet als ohne Streulicht. Andererseits hat die Ausprägung der Streulichtverteilungen einen maßgeblichen Einfluss auf die Störbewertung. Demnach ruft eine schwache Ausprägung des Streulichtbereichs nur eine geringe Differenz zu den Referenzlichtverteilungen hervor, die um den Streulichtanteil bereinigt wurden. Weiterhin liefern die Bewertungen der realen Lichtverteilungen die Basis für eine Korrelationsanalyse mit unterschiedlichen objektiven Kennzahlen (siehe Kap. 6.3).

Die Abhängigkeit der Farbtemperatur auf die Störbewertung ist Gegenstand diverser Forschungsarbeiten (vgl. Kap. 2.5.3). Dabei gibt es unterschiedliche Aussagen bezüglich der Hellempfindung und der Störwirkung unterschiedlicher spektraler Verteilungen bzw. Lichtquellen. In der Zusammenfassung von VÖLKER zum Thema Blendung wird kein signifikanter Einfluss auf die physiologische Blendung ausgewiesen, wohl aber eine Steigerung der psychologischen Blendung mit zunehmender Farbtemperatur [Völ12]. Diese Aussage kann anhand der hier vorliegenden Versuchsergebnisse nicht bestätigt werden (vgl. Abb. 6.6). Die Tendenz ist bei beiden Lichtverteilungen dieses Versuchs (Farbe 01/02) gleich und weist eine Abnahme der Störbewertung mit zunehmender Farbtemperatur auf. Dies gilt, obwohl die Leuchtdichte der Schneeflocken bei einer Erhöhung der Farbtemperatur ebenfalls angestiegen ist (vgl. Tab. 6.5). Trotzdem sind die Unterschiede der mittleren Probandenbewertung in Abhängigkeit der Farbtemperatur für eine der zwei Lichtverteilungen signifikant. Eine mögliche Ursache für die scheinbar widersprüchlichen Aussagen von VÖLKER und den hier vorgestellten Ergebnissen liegt in der Kompensation der zunehmenden Störwirkung durch eine gleichzeitig (gefühl) bessere Ausleuchtung der Fahrbahn und der Umgebung (vgl. [Ham11]). Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Definition der Eigenblendung bei Schnee aus Kapitel 2.1 eine Beeinträchtigung der Konzentration und die Behinderung der Sicht beinhaltet. Damit weicht sie von üblichen Definitionen ab, welche Blendung als visuelle Störepfindung beschreiben, die durch zu hohe Leuchtdichten oder Leuchtdichteunterschiede im Gesichtsfeld ausgelöst wird [Pau07]. Man geht außerdem häufig nur von einer oder einer niedrigen Anzahl an Blendlichtquellen (z. B. Bewertung nach DIN 13201, [DIN13]) und nicht wie bei diesem Experiment von sehr vielen kleinen, nahezu punktförmigen Lichtreflexen im Sichtfeld aus. Ein direkter

Vergleich der Ergebnisse ist aufgrund unterschiedlicher Definitionen von Blendung daher auch nicht uneingeschränkt möglich.

Der Einfluss des vertikalen Abstrahlwinkels auf die Störbewertung weist im Versuch „Auswirkungen von Streulicht bei Schnee“ deutliche Unterschiede zu den Ergebnissen im Versuch „Auswirkungen von Streulicht bei Nebel“ auf (vgl. Kap. 5.4). In Abbildung 6.9 ist die Winkelabhängigkeit für beide Versuchsaufbauten nochmals gegenübergestellt.



a) Streulichtbewertung bei Schnee

b) Streulichtbewertung bei Nebel

Abbildung 6.9: Einfluss des vertikalen Abstrahlwinkels auf die mittlere Probandenbewertung im Versuch Streulichtbewertung bei Schnee und Nebel

Es wird deutlich, dass eine gegenläufige Tendenz vorliegt. Bei Nebel erzeugen vertikale Abstrahlwinkel ($V=90^\circ$) die größte Störwirkung wohingegen bei Schnee in diesem Bereich die geringste Störwirkung auftritt. Weiterhin sind die Probandenbewertungen bei Nebel für Streulicht im zentralen Sichtfeld absolut betrachtet deutlich höher als im Schneeversuch. Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass die Nebelkammer deutlich extremere Beispiele bzgl. Sichtweite und Störeffekt verwendete, wohingegen die virtuelle Schneefahrt im Fahr Simulator deutlich weniger überzeichnete Szenarien zur Untersuchung der Winkelabhängigkeit abbildete. Im peripheren Bereich erzeugen die Streuleuchtdichten auch geringere Störbewertungen, bleiben im Verlauf jedoch auch gegensätzlich zum Versuch mit Schnee.

Der negative Einfluss einer Erhöhung der Lichtstärke im Streulichtbereich auf die Probandenbewertung wurde in Kapitel 6.2.4 eindeutig bestätigt (vgl. Abb. 6.8). Außerdem kann man davon ausgehen, dass auch der Lichtstrom im Streulichtbereich einen Einfluss auf die Störbewertung hat. In Abbildung 6.8 liegt die mittlere Bewertung der Lichtverteilung „Int A“, die Streulicht in einem Raumwinkel Ω von 2,79 sr emittiert stets über der mittleren Bewertung von Lichtverteilung „Int B“, die Streulicht in einem Raumwinkel Ω von 0,09 sr emittiert. Bei gleicher Lichtstärke beider Verteilungen gilt:

$$\frac{\Omega_{Int A}}{\Omega_{Int B}} = \frac{\Phi_{Int A}}{\Phi_{Int B}} \quad (6.1)$$

Bei höherem Lichtstrom wurde also auch die Lichtverteilung schlechter bewertet. Dies kann als Indiz gesehen werden, dass ein höherer Lichtstrom auch eine höhere Störbewertung zur Folge hat. Eine allgemeingültige Aussage lässt sich jedoch anhand dieser Ergebnisse noch nicht ableiten.

Anders als bei Blendungssituationen durch einzelne Lichtquellen besteht die These, dass nicht die tatsächlich Leuchtdichte einzelner Schneeflocken ausschlaggebend für die Bewertung ist, sondern die Anzahl an sichtbaren Schneeflocken. Um diese Frage zu beantworten, wurden alle Lichtverteilungen durch Leuchtdichteaufnahmen in einem Standbild der virtuellen Schneeumgebung dokumentiert und ausgewertet. Um die These zu überprüfen, wird eine Korrelationsanalyse durchgeführt, die in Kapitel 6.3 ausführlich beschrieben wird.

6.3 Korrelationsanalyse

Im Folgenden sollen die Zusammenhänge zwischen der subjektiven Störbewertung und objektiven, messbaren Größen aufgezeigt werden. Dazu werden die Ergebnisse aus dem Versuch „Auswirkungen von Streulicht bei Schnee“ im Fahrsimulator für eine Korrelationsanalyse mit objektiven Kennzahlen herangezogen. Die Kennzahlen wurden einerseits anhand der messtechnisch erfassten Lichtstärkeverteilung realer Scheinwerfer am Goniofotometer und andererseits anhand orts aufgelöster Leuchtdichteaufnahmen der im Fahrsimulator dargestellten Szenen ermittelt. Die Korrelation objektiver Kennzahlen mit der mittleren Probandenbewertung (subjektive Störbewertung) dient als Maß für die Güte und Aussagekraft verschiedener Kennzahlen unter der Annahme, dass ein linearer Zusammenhang besteht. Als Indikator für die Korrelation wird das Bestimmtheitsmaß R^2 (quadratischer Korrelationskoeffizient nach Pearson) herangezogen.

Korrelation mit Messdaten aus dem Goniofotometer

Die in diesem Abschnitt dargestellten Kennzahlen wurden anhand von Messdaten ermittelt, die aus einem standardisierten Messverfahren für die Lichtstärkeverteilung am Goniofotometer stammen (vgl. Kap. 5.3). Als Bezugswerte werden ausschließlich die Ergebnisse der Bewertung realer Lichtverteilungen herangezogen. Die virtuell modellierten Lichtverteilungen werden hier nicht mit einbezogen. Die Differenz ΔB gibt den Unterschied zwischen der mittleren Störbewertung der Lichtverteilung „mit Streulicht“ abzüglich der mittleren Störbewertung der entsprechenden Lichtverteilung „ohne Streulicht“ an (vgl. LV A bis LV F in Tab. 6.1). Die Korrelation der Differenz der mittleren Probandenbewertungen dieser sechs Lichtverteilungen wird für verschiedene Kennzahlen betrachtet. Dazu zählt einerseits das Maximum und der Mittelwert der Lichtstärke im Streulichtbereich ($I_{\text{Streulicht}}$), weil diese Werte häufig in der Gesetzgebung und den Regularien der wichtigsten Zulassungsräume verankert sind (vgl. [UNE12b], [FMV12]). Andererseits wird das 95 %-Quantil der Lichtstärke herangezogen, welches eine um Ausreißer bzw. kleine Hotspots bereinigte Kennzahl darstellt. Die Kennzahl gibt an, dass 95 %

der Messwerte unter dem ermittelten Wert liegen. Weiterhin sollen der absolute Streulichtstrom ($\Phi(\text{Str.}, \text{absolut})$) und der relative Streulichtstrom ($\Phi(\text{Str.}, \text{relativ})$), wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben, betrachtet werden, da ein Zusammenhang zwischen Störbewertung und Lichtstrom vermutet wird, der einerseits absolut, andererseits auch abhängig von der Grundlichtverteilung, also relativ möglich ist.

In Abbildung 6.10 wurde jeweils die Differenz der mittleren Probandenbewertung ΔB auf der Ordinate in Abhängigkeit der mittleren Lichtstärke im Streulichtbereich (links) und in Abhängigkeit des absoluten Lichtstroms im Streulichtbereich (rechts) auf der Abszisse angetragen. Die Kennzahlen weisen im Vergleich zu anderen Kennzahlen jeweils eine sehr hohe Korrelation auf.

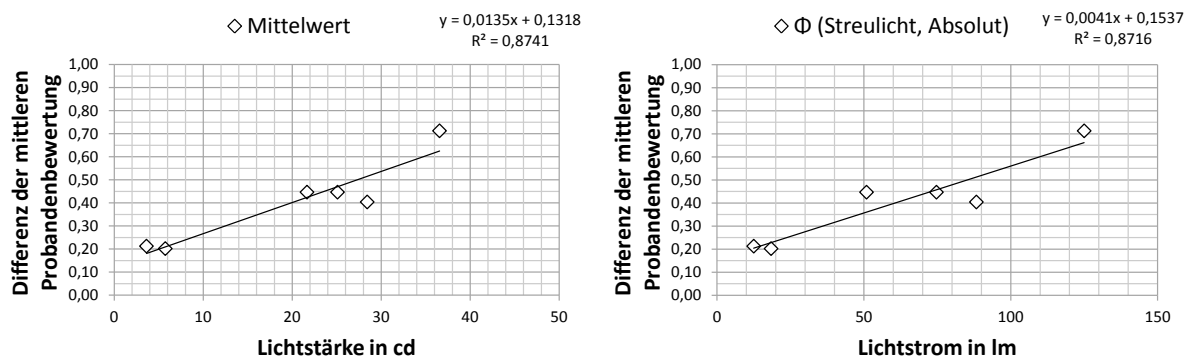


Abbildung 6.10: Differenz der mittleren Probandenbewertung (mit/ohne Streulicht) in Abhängigkeit des Mittelwerts der Lichtstärke im Streulichtbereich (links) bzw. des Lichtstroms (rechts)

Die Differenz der mittleren Probandenbewertung liegt zwischen $\Delta B = 0,20$ und $\Delta B = 0,71$ Skalenpunkten (vgl. Abb. 6.10). Der Mittelwert der Lichtstärke weist Werte zwischen 3,6 cd und 36,6 cd auf. Der absolute Lichtstrom liegt in einem Bereich von 12,5 lm und 125 lm. Die beiden Kennzahlen weisen unter den vorher Genannten das größte Bestimmtheitsmaß, also die beste Korrelation auf. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei 0,8741 für den Mittelwert und bei 0,8716 für den absoluten Streulichtstrom. Die Werte der übrigen Kennzahlen liegen stets darunter. Eine grafische Übersicht der Korrelationsanalyse mit den übrigen Kennzahlen ist in Anhang F.3 enthalten.

Eine Übersicht der Bestimmtheitsmaße zu den untersuchten Kennzahlen verdeutlicht die Rangfolge der Ergebnisse und ist in Tabelle 6.6 dargestellt. Hier ist nochmal zu erkennen, dass der Mittelwert von $I_{\text{Streulicht}}$ und $\Phi(\text{Str.}, \text{absolut})$ mit Werten von $R^2 > 0,85$ die beste Korrelation aufweisen. Mit Ausnahme des 90%-Quantils von $I_{\text{Streulicht}}$ weisen die übrigen Kennzahlen im Vergleich zum Mittelwert von $I_{\text{Streulicht}}$ und zum absoluten Streulichtstrom alle einen deutlich geringeren Wert im Bestimmtheitsmaß auf ($R^2 < 0,6702$). Den niedrigsten Wert weist der Median von $I_{\text{Streulicht}}$ mit $R^2 = 0,2649$ auf.

Tabelle 6.6: Bestimmtheitsmaß aus der Korrelationsanalyse von Kennzahlen mit der Differenz der mittleren Probandenbewertung ΔB

Kennzahl	Bestimmtheitsmaß R^2	Rang
Mittelwert von $I_{Streulicht}$	0,8741	1
$\Phi(Str., absolut)$	0,8716	2
90 %-Quantil von $I_{Streulicht}$	0,7975	3
95 %-Quantil von $I_{Streulicht}$	0,6702	4
$\Phi(Str., relativ)$	0,5569	5
Maximum von $I_{Streulicht}$	0,5054	6
Median von $I_{Streulicht}$	0,2649	7

Eine Betrachtung der Korrelation der absoluten mittleren Probandenbewertung B der Lichtverteilungen, die Streulicht aufweisen, mit den objektiven Kennzahlen hat in allen Fällen ein niedrigeres Bestimmtheitsmaß ergeben als bei der Betrachtung von ΔB . Das bestätigt die Vermutung, dass die Grundlichtverteilung auch Einfluss auf die Bewertung hat. Die Differenz ΔB zeigt genau den Unterschied in der Störbewertung auf, der durch das Streulicht erzeugt wird und ist daher besser geeignet. Dies wiederum spiegelt sich in der besseren Korrelation wieder, wenn die Differenz der mittleren Bewertung ΔB betrachtet wird. Wie stark der Einfluss der Grundlichtverteilung ist und von welchen Faktoren dieser bestimmt wird, wird nicht quantifiziert.

Korrelation mit Messdaten aus Leuchtdichteaufnahmen im Fahrsimulator

In Kapitel 6.2.5 wurde die These aufgestellt, dass nicht die maximale Leuchtdichte alleine, sondern die Anzahl an sichtbaren Schneeflocken maßgeblich die Störbewertung beeinflussen kann. Im Folgenden soll die Korrelation zwischen der Anzahl der sichtbaren Schneeflocken und der Probandenbewertung ermittelt werden und damit die These geprüft werden, dass nicht der Maximalwert der Leuchtdichte allein ausschlaggebend für die Störbewertung ist. Die Leuchtdichte der Schneeflocken wurde messtechnisch im Fahrsimulator ermittelt. Dazu wurde die Leuchtdichtekamera in Fahrerposition angebracht und jeweils an einer definierten Position der virtuellen Strecke ein Standbild der Szene aufgenommen, anhand dessen die Anzahl der Schneeflocken und deren mittlere Leuchtdichte ermittelt wird.

Am Beispiel der Lichtverteilung, die den gesamten Streulichtbereich mit unterschiedlichen Lichtstärke-Intensitäten gleichmäßig ausleuchtet (Int B aus Tabelle 6.1), wird deutlich, welchen Einfluss die virtuelle Lichtstärke auf die Anzahl und die Leuchtdichte der Schneeflocken hat. In Abbildung 6.11 sind zwei Histogramme für die mittlere Schneeflockenleuchtdichte dargestellt. Links wurde eine virtuelle Intensität von 100 cd und rechts eine Intensität von 10 000 cd eingesetzt. Außerdem ist neben der absoluten Häufigkeit die kumulative Summenhäufigkeit in Prozent auf der rechten Abszisse angetragen.

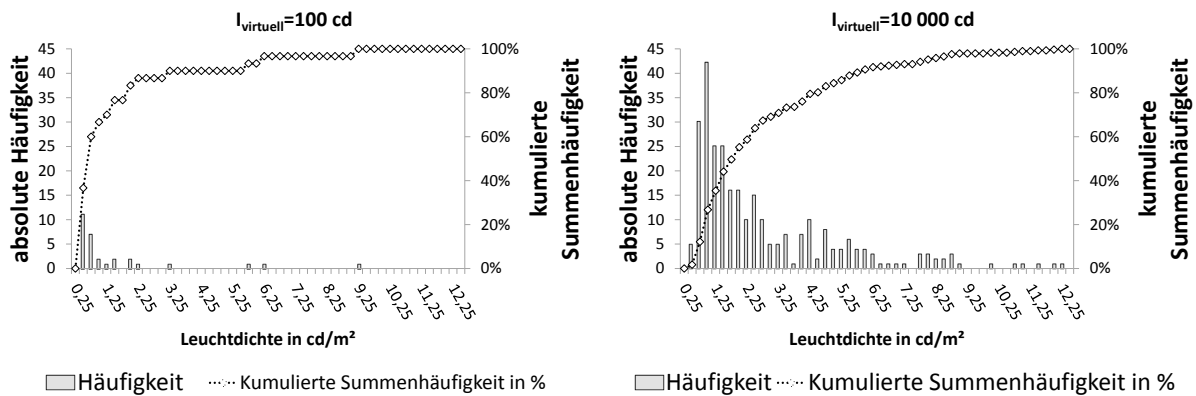


Abbildung 6.11: Histogramm für die mittlere Leuchtdichte der Schneeflocken für Lichtverteilung „Int B“ (100 und 10 000 cd)

In diesem Beispiel wurden alle Schneeflocken mit einer Leuchtdichte von mehr als $0,25 \text{ cd m}^{-2}$ gezählt. Die größte erfasste Leuchtdichte lag bei $12,5 \text{ cd m}^{-2}$. Vergleicht man das linke Diagramm (100 cd) mit dem rechten Diagramm (10 000 cd) in Abbildung 6.11, werden die Unterschiede der mittleren Leuchtdichten der Schneeflocken sichtbar. Einerseits erhöht sich mit zunehmender Lichtstärke die Gesamtanzahl an sichtbaren Schneeflocken, da aufgrund der höheren Beleuchtungsstärke auf den Schneeflocken auch die Leuchtdichte von weiter entfernt liegenden Flocken steigt und diese somit sichtbar werden. Bei einer Intensität von 100 cd werden so 30 Flocken detektiert und bei einer Intensität von 10 000 cd 288 Flocken. Andererseits steigt auch die absolute Helligkeit der nahe liegenden Flocken an. Je höher die Lichtstärke im Streulichtbereich ist, desto höher ist auch der Median der mittleren Schneeflocken-Leuchtdichte. Im rechten Bild ist also sowohl die Anzahl der Flocken höher als auch die Absolutwerte der Leuchtdichte (vgl. Abb. 6.11). Eine grafische Übersicht der Histogramme dieser Lichtverteilung mit den fünf Intensitätsstufen 100, 500, 1 000, 5 000 und 10 000 cd ist im Anhang F enthalten.

Um zu ermitteln, ob die Gesamtanzahl der sichtbaren Schneeflocken oder die maximale Leuchtdichte der Flocken die Blendungsbewertung stärker beeinflusst, wird im Folgenden der Zusammenhang zwischen den Kennzahlen „Anzahl der Schneeflocken $L > 0,25 \text{ cd m}^{-2}$ “ und „Maximum der Leuchtdichte der Schneeflocken“ und der mittleren Probandenbewertung dargestellt. Abbildung 6.12 zeigt diese Zusammenhänge für alle 30 im Versuch dargestellten Lichtverteilungen. Die maximalen Leuchtdichten und die Anzahl der Schneeflocken sind jeweils anhand von Standbildern der virtuellen Fahrszene im Fahrsimulator ermittelt worden und auf der Abszisse in logarithmischer Form dargestellt. Die Ordinate zeigt die mittlere Probandenbewertung.

Die mittlere Probandenbewertung aller im Versuch dargebotenen Lichtverteilungen weist mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,7821$ eine sehr hohe Korrelation mit dem Logarithmus der Anzahl der „sichtbaren“ Schneeflocken ($L > 0,25 \text{ cd m}^{-2}$) auf. Die Streuung ist niedrig und der Zusammenhang im linken Diagramm in Abbildung 6.12 deutlich zu erkennen. Der Logarithmus

des Maximums der Leuchtdichte der Schneeflocken weist hingegen mit ($R^2 = 0,5309$) eine deutlich niedrigere Korrelation auf. Auch die Streuung ist weitaus höher und die Tendenz somit nicht eindeutig.

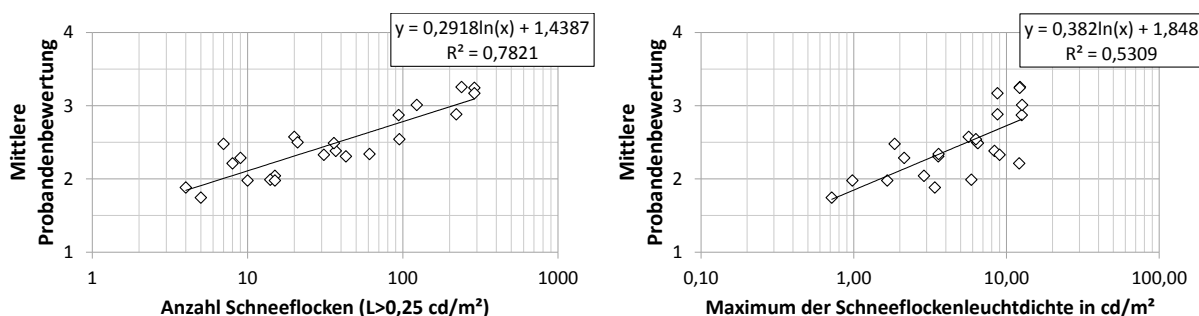


Abbildung 6.12: Mittlere Probandenbewertung in Abhängigkeit des Logarithmus der Anzahl der Schneeflocken $L > 0,25 \text{ cd m}^{-2}$ und des Logarithmus des Maximums der mittleren Schneeflockenleuchtdichte

Weiterhin wurde der Logarithmus des Medians der mittleren Schneeflockenleuchtdichte, also die Helligkeit, die von 50 % der Schneeflocken überschritten wird, untersucht. Dieser weist im Vergleich zu den zwei vorher genannten Kennzahlen die geringste Korrelation mit der mittleren Probandenbewertung auf ($R^2 = 0,2291$).

Die Korrelationsanalyse zeigt, dass anders als bei klassischen Blendungssituationen, die eine sehr starke Korrelation zur maximalen Leuchtdichte der Lichtquelle aufweisen, bei Schneefahrten der Logarithmus des Maximums der Schneeflockenleuchtdichte nur einen geringen Korrelationsgrad aufweist. Im Gegensatz dazu zeigt der Logarithmus der Anzahl der Schneeflocken mit $L > 0,25 \text{ cd m}^{-2}$ trotz der unterschiedlichen Ausprägungen der Lichtverteilungen im Hinblick auf Intensität, Verteilung und Lichtfarbe eine deutlich stärkere Korrelation. Damit eignet sich der Logarithmus der Anzahl der Schneeflocken mit $L > 0,25 \text{ cd m}^{-2}$ als ein robustes Bewertungskriterium für die Störwirkung bei Schneefahrten. In erster Linie sind daher auch nicht die Maxima bzw. Inhomogenitäten in der Streulichtverteilung ausschlaggebend für Störempfinden, da einzelne Maxima in der Lichtstärkeverteilung unter Umständen nur eine geringe Anzahl an Schneeflocken beleuchten. Dies muss vor allem berücksichtigt werden, wenn Streulicht bei der Entwicklung von Scheinwerfern nicht reduziert, sondern durch konstruktive Maßnahmen lediglich umverteilt wird (vgl. konstruktive Maßnahmen zur Streulichtreduzierung in Kap. 5.3.2).

7 Untersuchungen zur Eigenblendung durch retroreflektierende Verkehrszeichen

7.1 Zielstellung und Methodenübersicht

Ziel der Untersuchungen war es, die Eigenblendung des Fahrzeugführers an retroreflektierenden Verkehrszeichen beim Einsatz von Fernlichtsystemen zu untersuchen. Insbesondere sollen Leuchtdichtegrenzwerte für Verkehrszeichen in Abhängigkeit ihrer wahrgenommenen Größe in einem Versuchsaufbau ermittelt werden. Die Übertragbarkeit dieser Grenzwerte auf reale Verkehrssituationen soll anschließend anhand einer Betrachtung der Einflussfaktoren auf die Eigenblendung diskutiert und belegt werden.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde in zwei Probandenstudien das subjektive Störempfinden, also die psychologische Blendung, von retroreflektierenden Schildern mit unterschiedlicher Helligkeit, Farbe und in unterschiedlicher Distanz ermittelt. Die Studien fanden in einem speziell dafür konzipierten, statischen Versuchsaufbau im Labor statt. Dieser bildete modellhaft eine Landstraßenszene nach. Die Messung der Leuchtdichte der dargebotenen Schilderhelligkeiten erfolgte mittels der in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Leuchtdichtekamera *LMK-Color 98-3* der Firma TechnoTeam. Die Messwerte bildeten die Basis für die anschließende Blendungsbewertung. Durch eine Korrelationsanalyse wird der Zusammenhang zwischen der subjektiven Probandenbewertung und der Leuchtdichte der Schilder bestimmt. Daraus werden Leuchtdichtegrenzwerte abgeleitet, die den Zusammenhang zwischen Störschwelle und Schildgröße wiedergeben.

7.2 Probandenstudien zum Thema Schilderblendung

7.2.1 Ziel der Versuche

In einem statischen Versuchsaufbau im Labor sollte die Untersuchung der Eigenblendung an retroreflektierenden Schildern unter reproduzierbaren Bedingungen ermöglicht werden. Ziel der Studien war es, den Zusammenhang zwischen Störempfinden und Objektleuchtdichte zu ermitteln. Dabei wurden vorwiegend Verkehrszeichen, die am Fahrbahnrand positioniert sind, und Verkehrszeichen, die zentral über der Fahrbahn angebracht sind, untersucht. Anschließend

sollen Grenzwerte ermittelt werden, die die Grundlage für Anforderungen an zukünftige Scheinwerfersysteme liefern.

Der Versuchsaufbau sollte dabei so konzipiert werden, dass Leuchtdichte-Grenzwerte in Abhängigkeit von unterschiedlichen Verkehrszeichenentfernungen bzw. in Abhängigkeit der wahrgenommenen Größe der Schilder ermittelt werden können. Dabei sollten im Straßenverkehr übliche Schildgrößen und Entfernungen herangezogen werden. Durch unterschiedliche Arten von Verkehrszeichen sollte außerdem der Einfluss der Schildposition analysiert werden. Die Verkehrszeichen-Leuchtdichten sollten einen möglichst großen Bereich abdecken, der sowohl akzeptable als auch deutlich inakzeptable Schildhelligkeiten abdeckt. Der Einfluss der Farbe der Verkehrszeichen sollte ebenfalls überprüft werden, wobei die Farben mit besonders hohen Rückstrahlwerten zu bevorzugen sind, da diese das größte Risiko der Eigenblendung mit sich bringen.

7.2.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau zur Untersuchung des Störepfindens durch retroreflektierende Schilder war ein Umbau des Versuchszustandes aus Kapitel 5.4.2. Eine Skizze des Versuchsaufbaus der Probandenstudie aus der Vogelperspektive wird in Abbildung 7.1 dargestellt. Zusätzliche Fotos, die den Versuchsaufbau von der Außenseite zeigen, können Anhang E.2 entnommen werden. Abbildung 7.2 skizziert die nachgebildete Landstraßenszene aus der Fahrerperspektive. Die in der Szene eingezeichneten Schildnummern dienen als Orientierungshilfe für den Leser und waren im Versuch für den Probanden nicht sichtbar. Im Folgenden werden die wichtigsten Elemente beschrieben, die in Abbildung 7.1 und 7.2 mit Positionsnummern versehen und benannt sind.

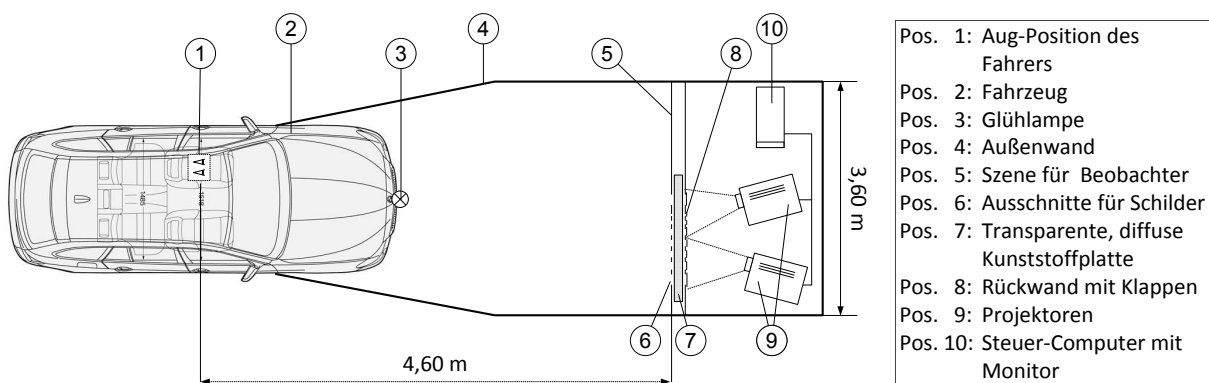


Abbildung 7.1: Skizze des Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Störepfindens durch retroreflektierende Verkehrszeichen - Vogelperspektive

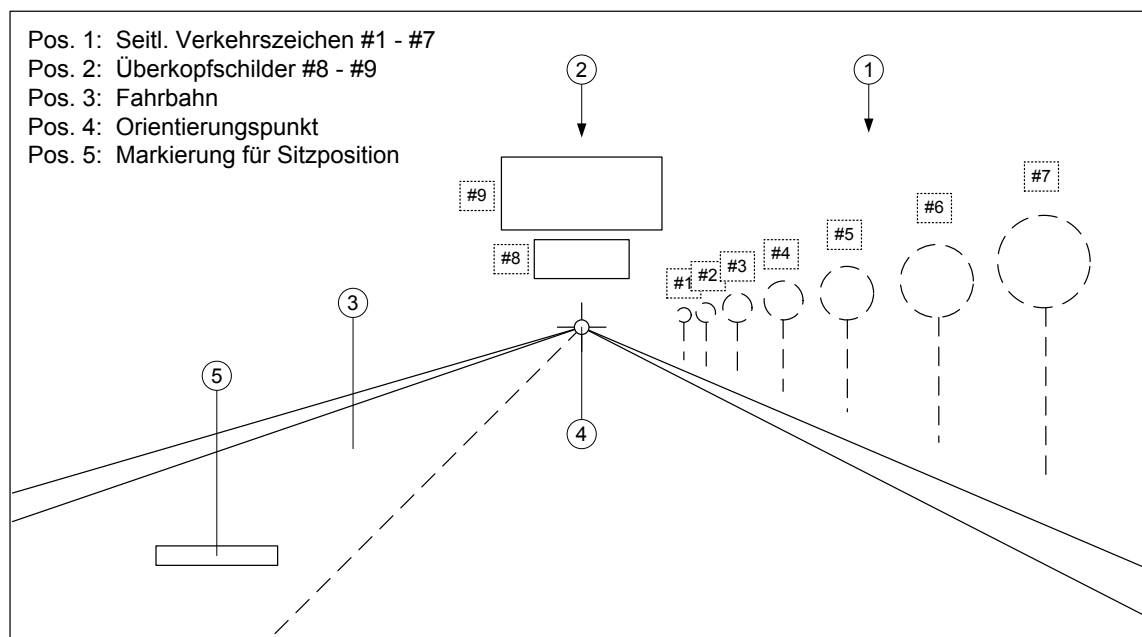


Abbildung 7.2: Skizze des Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Störempfindens durch retroreflektierende Verkehrszeichen - Fahrerperspektive

Das Fahrzeug (Abb. 7.1, Pos. 2), die Außenhaut des Versuchstands (Abb. 7.1, Pos. 4) und die Aug-Position der Probanden (Abb. 7.1, Pos. 1) entsprechen der Beschreibung aus Kapitel 5.4.2. Der Abstand zur Wand (Abb. 7.1, Pos. 5), an der die Straßenszene nachgebildet war, beträgt 4,60 m. Die Szene selbst (Abb. 7.2) ist auf einer rechteckigen Wand mit einer Größe von 3,60 m x 2,10 m dargestellt. Der Innenraum war mit matt-schwarzem Stoff verkleidet, um Reflexionen an den Außenwänden zu vermeiden. Hinter den Ausschnitten für die Verkehrsschilder (Abb. 7.1, Pos. 6) befand sich eine diffus streuende Kunststoffplatte (Abb. 7.1, Pos. 7), die erforderlich war, um eine gleichmäßige Ausleuchtung der Schilder zu gewährleisten. Hinter der Kunststoffplatte befand sich eine Abdeckung, die für jedes Schild eine separat verschließbare Klappe zur Verfügung stellte (Abb. 7.1, Pos. 8). Während des Versuchs wurde jeweils nur die Klappe des zu bewertenden Schildes geöffnet. Die übrigen Klappen verhinderten das Eindringen von Streulicht in die Öffnungen der benachbarten Schilder, so dass für den Probanden nur ein einziges beleuchtetes Schild wahrgenommen wurde.

Die Ausleuchtung der Verkehrszeichen erfolgte in einem Rückprojektionsverfahren durch zwei Projektoren, die hinter der Leinwand positioniert waren (Abb. 7.1, Pos. 9). Ein Projektor beleuchtete die zentral angeordneten Verkehrszeichen (Zeichen #1 bis #5, #8 und #9), während der zweite Projektor die außen angeordneten Verkehrszeichen (Zeichen #6 und #7) beleuchtete. Die Ansteuerung der Projektoren wurde durch einen handelsüblichen Computer realisiert (Abb. 7.1, Pos. 10). Dieser erzeugte die Ausleuchtung der Schilder in unterschiedlichen Helligkeitsstufen, die durch Überlagerung der Verkehrszeichenbeleuchtung mit digitalen Filtern erzeugt wurde. Für jedes Verkehrszeichen wurden acht verschiedene Leuchtdichten erzeugt. Um eine mög-

lichst real wirkende Versuchsumgebung zu präsentieren, wurde mittels der Beamer zusätzlich in schwarzer Schrift die Zahl 80 (wie z. B. bei einer Geschwindigkeitsbegrenzung) auf den seitlichen bzw. eine Richtungsanweisung in Form von drei Richtungssymbolen (»>») auf den zentralen Zeichen dargestellt. Die Verkehrszeichen waren im ersten Versuch weiß, im zweiten Versuch gelb (vgl. [Nie14], [Sch14]).

Eine Halogenlampe (Abb. 7.1, Pos. 3) erzeugte eine Umfeldleuchtdichte auf der Landstraßenszene von $0,02 \text{ cd m}^{-2}$. Die Helligkeit orientierte sich an realen Nachtverkehrssituationen die nach FRANK auf unbeleuchteten Straßen bei trockener Fahrbahn Umgebungsleuchtdichten von $0,01 \text{ cd m}^{-2}$ bis $0,03 \text{ cd m}^{-2}$ aufweisen [Fra94].

Die für die Konstruktion der Szene in Abbildung 7.2 zugrunde gelegten Straßenparameter beruhten auf den Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL) [For13]. Dargestellt wurde eine gerade Landstraße (Abb. 7.2, Pos. 3) mit einer Fahrbahnbreite von 3,50 m, sieben seitlich angebrachten Verkehrszeichen (Abb. 7.2, Pos. 1) und zwei Überkopfschildern (Abb. 7.2, Pos. 2). Die Positionierung der Schilder richtete sich dabei nach den Aufstellvorschriften der VwV-StVO [StVo09]. Am Horizont der Fahrbahn war auf Augenhöhe des Probanden ein Orientierungspunkt angebracht, welcher die bevorzugte Blickrichtung während des Versuchs vorgab (Abb. 7.2, Pos. 4). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird angenommen, dass sich der Fahrer 2,25 m links vom Seitenrand der eigenen Fahrbahn entfernt befand. Eine Übersicht über die zugrunde gelegten geometrischen Rahmenbedingungen kann Tabelle 7.1 entnommen werden.

Tabelle 7.1: Zusammenstellung der Annahmen zur Konstruktion der tatsächlichen Abmessungen der Szene im Versuchsaufbau

Parameter	Wert
Augenhöhe der Testperson	1,15 m
Höhe des Horizonts	1,15 m
Breite der Fahrspur	3,50 m
Breite des Seitenstreifens	0,50 m
Seitenabstand des Fahrers zur rechten Fahrbahnmarkierung	2,25 m
Seitenabstand des Verkehrszeichensockels zur Fahrbahn	1,50 m
Aufstellhöhe der Verkehrszeichenunterkante Schild #1 bis #7	2,00 m
Aufstellhöhe der Verkehrszeichenunterkante Schild #8 und #9	4,50 m
Durchmesser der seitlichen Verkehrszeichen	0,75 m
Anbauhöhe der Scheinwerfer	0,63 m
Entfernung des rechten Scheinwerfers zur rechten Fahrbahnmarkierung	1,15 m

Der Durchmesser der dargebotenen runden Verkehrszeichen entspricht bei einer realen Schildgröße von 0,75 m unterschiedlichen Beobachtungsentfernungen [For13]. Diese sind wiederum für die Berechnung der für die untersuchten Leuchtdichten erforderlichen Beleuchtungsstärken auf den Verkehrsschildern ausschlaggebend. Tabelle 7.2 gibt die tatsächlichen Durchmesser der Verkehrszeichen, die daraus resultierende fiktive Beobachtungsentfernung und die fiktiven minimalen horizontalen und vertikalen Anleuchtwinkel der Schilder (ausgehend vom rechts

angebauten Scheinwerfer) an. Für runde Verkehrszeichen werden mit dem Versuchsaufbau fiktive Entfernungen von 31 m bis 246 m abgedeckt. Da die Probanden während des Versuchs den Blick stets auf das beleuchtete Schild richteten, befand sich das Schild stets im zentralen Blickfeld, somit war der Beobachtungswinkel immer gleich.

Tabelle 7.2: Größe der seitlichen Verkehrszeichen, Beobachtungsentfernung und Anleuchtwinkel

Schild Nr. (#)	Durchmesser	Beobachtungsentfernung	vert. Anleuchtwinkel	horiz. Anleuchtwinkel
1	0,014 m	246 m	0,47°	0,62°
2	0,020 m	173 m	0,67°	0,89°
3	0,030 m	115 m	1,01°	1,34°
4	0,040 m	86 m	1,36°	1,80°
5	0,055 m	63 m	1,86°	2,47°
6	0,090 m	38 m	3,14°	4,15°
7	0,110 m	31 m	3,88°	5,13°

Die Breite der Überkopfschilder entsprach der angenommenen Fahrspurbreite von 3,5 m und einer Höhe von 1,8 m für Schild #8 und 2,1 m für Schild #9. In Tabelle 7.3 sind die gemessene Breite und Höhe der Schilder in der Szene sowie die daraus resultierende fiktive Beobachtungsentfernung und die fiktiven minimalen horizontalen und vertikalen Anleuchtwinkel der Schilder (ausgehend vom rechts angebauten Scheinwerfer) dargestellt.

Tabelle 7.3: Größe der Überkopf-Schilder, Beobachtungsentfernung und Anleuchtwinkel

Schild Nr. (#)	Breite	Höhe	Beobachtungsentfernung	vert. Anleuchtwinkel	horiz. Anleuchtwinkel
8	0,070 m	0,035 m	230 m	1,13°	0°
9	0,135 m	0,080 m	119 m	2,19°	0°

Die im Versuch dargestellten Leuchtdichten wurden mit einer Leuchtdichtekamera aus Fahrerperspektive für alle Beispiele erfasst. In Tabelle 7.4 sind die Flächenangaben der Schilder in der Beobachterszene und die entsprechenden Leuchtdichteintervalle der einzelnen Verkehrszeichen aufgeführt. Die Leuchtdichteintervalle wurden so gewählt, dass für jedes Verkehrszeichen sowohl keine als auch deutliche Störwirkungen erzielt werden konnten. Die Angabe der Schildgröße in Winkelminuten resultiert aus der tatsächlichen Größe und der Beobachterentfernung. Dabei wurden die Schildgrößen der rechteckigen Überkopfschilder durch flächengleiche runde Verkehrszeichen angenähert. Die Ermittlung der Leuchtdichte erfolgte mit der Software *LMK LabSoft*. Für jedes Verkehrszeichen wurde dabei eine Region gebildet. Die Region umfasste alle innerhalb eines Schild-Ausschnittes liegenden Bildpunkte, die einen Leuchtdichtewert von mehr als 2 cd m^{-2} aufweisen. Die Regionen wurden einmalig für die niedrigste Transparenzstufe ermittelt und dann für alle übrigen Transparenzstufen übernommen. So wurden Überstrahleffekte und damit scheinbare Größenänderungen der Schilder nicht in die Ermitt-

lung der Verkehrszeichenleuchtdichten einbezogen. Eine detaillierte Angabe der einzelnen Verkehrszeichenleuchtdichten kann Anhang G.1 entnommen werden. Bei den hier dargestellten Leuchtdichten wurde der Helligkeitsabfall der Projektoren über die Versuchsdauer bereits berücksichtigt und als Toleranz mit angegeben (vgl. Kap. 7.2.4).

Tabelle 7.4: Fläche, Schildgröße und Leuchtdichte gelber und weißer Verkehrszeichen

Schild Nr. (#)	Fläche in cm ²	Schildgröße in '	Leuchtdichte in cd m ⁻² (gelb)	Leuchtdichte in cd m ⁻² (weiß)
1	1,5	10	35 ± 1 bis 1177 ± 42	47 ± 4 bis 1077 ± 95
2	3,1	15	34 ± 1 bis 1128 ± 40	49 ± 4 bis 1135 ± 100
3	7,1	22	43 ± 2 bis 1429 ± 51	59 ± 5 bis 1533 ± 135
4	12,6	30	41 ± 1 bis 1367 ± 48	59 ± 5 bis 1539 ± 135
5	23,8	41	30 ± 1 bis 963 ± 34	44 ± 4 bis 1118 ± 98
6	63,6	67	47 ± 2 bis 1449 ± 57	51 ± 2 bis 1724 ± 77
7	95,0	82	49 ± 2 bis 1488 ± 59	57 ± 3 bis 1945 ± 86
8	24,5	42	47 ± 2 bis 1543 ± 55	68 ± 6 bis 1869 ± 165
9	108,0	88	42 ± 2 bis 1413 ± 50	66 ± 6 bis 1837 ± 162

7.2.3 Versuchsablauf und Rahmenbedingungen

Die Probanden bewerteten die Helligkeit von neun Schildern in einem statischen Versuchsaufbau (vgl. Kap. 7.2.2 und Abb. 7.1) hinsichtlich der subjektiven Störempfung. Sie befanden sich dabei auf dem Fahrersitz eines stehenden Fahrzeugs und bewerteten die wahrgenommene Helligkeit der Schilder, deren Position und Intensität in zufälliger Reihenfolge wechselte. Die Reihenfolge wurde vor dem Versuch randomisiert und war für alle Probanden identisch. Die Studie wurde für weiße sowie für gelbe Verkehrszeichen mit unterschiedlichen Probanden durchgeführt. Die Versuchsdauer betrug ca. 30 Minuten.

Während des Versuchs lag die Blickrichtung der Probanden auf der eigenen Fahrspur. Dazu wurde eine Markierung im Zentrum der Szene eingesetzt, die als Orientierungshilfe diente (vgl. Abb. 7.2). Um die Helligkeit der Verkehrszeichen zu bewerten, sollten die Probanden, wie im normalen Straßenverkehr auch, ihren Blick kurz in Richtung Schild richten. Anschließend sollte der Fokus wieder auf die Fahrbahn gerichtet werden.

Der Proband erhielt zu Beginn des Versuchs klar definierte Informationen zum Versuchsablauf und die Erklärung der Bewertungsskala. Hintergründe zum Aufbau oder Details zur Intention des Versuchs wurden nicht kommuniziert. Dadurch wurde gewährleistet, dass jeder Proband dieselben Informationen erhielt und nicht durch den Versuchsleiter beeinflusst wurde. Die Einführungsphase fand bereits bei Versuchsbedingungen statt, so dass der Proband die Möglichkeit zur Adaptation an die Umgebungshelligkeit hatte. Die Bewertung sollte dabei nur in

Bezug auf die Störwirkung, unabhängig von der Erkennbarkeit der Informationen auf den Schildern, erfolgen. Eine möglichst spontane Bewertung wurde dabei empfohlen.

Zu Beginn des Versuchs wurden zehn Übungstestzeichen dargeboten, um den Probanden auf die Aufgabe vorzubereiten. Außerdem gab es zehn Wiederholungen, so dass insgesamt 92 Verkehrszeichen bewertet wurden.

Die Bewertung erfolgte auf einer fünfstufigen unipolaren Skala, die sich rein auf die Störwirkung der Schildhelligkeiten bezog. Eine hohe Bewertung entsprach im Versuch einer hohen Störwirkung. In Tabelle 7.5 werden die Bewertungsstufen und ihre Bedeutung aufgelistet.

Tabelle 7.5: Bewertungsskala zum Versuch „Eigenblendung durch retroreflektierende Verkehrszeichen“

Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Nicht störend	Zwischenstufe	Gerade akzeptabel	Zwischenstufe	Deutlich störend

Zwischen den Versuchsdurchläufen wurden mit Hilfe einer Leuchtdichtekamera in unregelmäßigen Abständen Referenzmessungen der dargebotenen Leuchtdichten durchgeführt. Anhand der Messungen wurde überprüft, in welchem Maß die Leistung der Beamer schwankte und damit die dargebotenen Leuchtdichten der Verkehrszeichen variierten. Diese Variation wurde bereits in Kapitel 7.2.2 berücksichtigt.

Das Probandenkollektiv für Versuchsteil 1 (weiße Verkehrszeichen) bestand aus 41 Versuchsteilnehmern zwischen 20 und 57 Jahren. Das durchschnittliche Alter der Teilnehmer lag bei 26,1 Jahren. 29 Teilnehmer waren männlich und 12 weiblich. Insgesamt trugen 18 Probanden eine Brille als Sehhilfe.

Das Probandenkollektiv für Versuchsteil 2 (gelbe Verkehrszeichen) bestand aus 44 Versuchsteilnehmern zwischen 20 und 55 Jahren. Das durchschnittliche Alter der Teilnehmer lag bei 25,9 Jahren. 33 Teilnehmer waren männlich und 11 weiblich. Insgesamt trugen 17 Probanden eine Brille als Sehhilfe.

Beide Versuchsteile hatten sowohl hinsichtlich Alter als auch hinsichtlich Geschlechterverteilung und Anzahl an Probanden mit Sehhilfe nahezu identische Eigenschaften. Ein Großteil der Probanden waren bei beiden Versuchsteilen Mitarbeiter der BMW Group, die unterschiedlichen Fachbereichen zugeordnet waren. Der Anteil der lichttechnischen Experten wurde dabei bewusst niedrig gehalten, um ein repräsentatives Ergebnis zu erzielen.

Im Folgenden werden die Rahmenbedingungen zum Versuch nochmals in Tabellenform aufgeführt (Tab. 7.6). In Klammern ist angegeben, ob es sich um die Rahmenbedingungen beim Versuch mit weißen oder gelben Verkehrszeichen handelt.

Tabelle 7.6: Zusammenstellung der Rahmenbedingungen zum Versuch „Eigenblendung durch Verkehrszeichen“

Übersicht der Rahmenbedingungen	
Anzahl der Bewertungen	92
davon Übungsbeispiele	10
davon Wiederholungen	10
Umgebungsleuchtdichte	$\approx 0,02 \text{ cd m}^{-2}$
Minimale Verkehrszeichenleuchtdichte	44 cd m^{-2} (Weiß); 30 cd m^{-2} (Gelb)
Maximale Verkehrszeichenleuchtdichte	1945 cd m^{-2} (Weiß); 1543 cd m^{-2} (Gelb)
Dauer des Versuches	30 Minuten
Anzahl Versuchspersonen	41 (Weiß) / 43 (Gelb)
Alter der Probanden (Durchschnittsalter)	20–57 Jahre (26,1 Jahre) (Weiß) 20–55 Jahre (25,9 Jahre) (Gelb)
Bewertungsskala	Unipolar, fünf Stufen

7.2.4 Versuchsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Probandenstudie dargestellt, wobei zuerst die Schwankungen der Helligkeiten der Projektoren quantifiziert werden. Anschließend wird die Bewertung der Probanden in Abhängigkeit von der dargebotenen Leuchtdichte präsentiert. Im weiteren Verlauf wird schließlich ein Grenzwert für die Leuchtdichte auf Basis der Bewertung der Probanden abgeleitet.

Vertrauensbereich der Leuchtdichtemessungen:

Die Abweichungen der Helligkeit der Projektoren über den Versuchszeitraum wurde durch Messungen der Leuchtdichte einzelner Verkehrszeichen in unregelmäßigen Abständen ermittelt. Die Schwankungen, die beispielsweise auf unterschiedliche Betriebstemperaturen oder die Abnahme des Lampenlichtstroms der Projektoren zurückzuführen sind, werden bei der Ergebnisauswertung berücksichtigt. Die Leuchtdichten der Verkehrszeichen, die für weiße Verkehrszeichen vor dem Versuch und für gelbe Verkehrszeichen nach dem Versuch ermittelt wurden, werden daher um die Hälfte der prozentualen Schwankungen der Projektoren nach unten bzw. oben korrigiert. Die Schwankung selbst wird als Vertrauensbereich der Leuchtdichtewerte betrachtet und bei der Ermittlung der Grenzwerte entsprechend als Fehlerindikator eingetragen. In Tabelle 7.7 sind die prozentualen Schwankungen der Leuchtdichte für beide Versuchsteile aufgezeigt. Projektor 1 erzeugt die Ausleuchtung von Schild #1 bis #5, #8 und #9. Projektor 2 erzeugt die Ausleuchtung von Schild #6 und #7.

Tabelle 7.7: Prozentuale Schwankungen der Leuchtdichte der Verkehrszeichen

	Vertrauensbereich Projektor 1	Vertrauensbereich Projektor 2
Versuchsteil 1 (Weiß)	$\pm 9,7\%$	$\pm 4,7\%$
Versuchsteil 2 (Gelb)	$\pm 3,4\%$	$\pm 4,1\%$

Bewertung der einzelnen Verkehrszeichen und Korrelation mit Näherungsfunktionen:

Betrachtet man die einzelnen Verkehrszeichen stellt man fest, dass bei allen Zeichen mit zunehmender Leuchtdichte auch ein monoton zunehmender Anstieg der mittleren Probandenbewertung zu verzeichnen ist (vgl. Abb. 7.3).

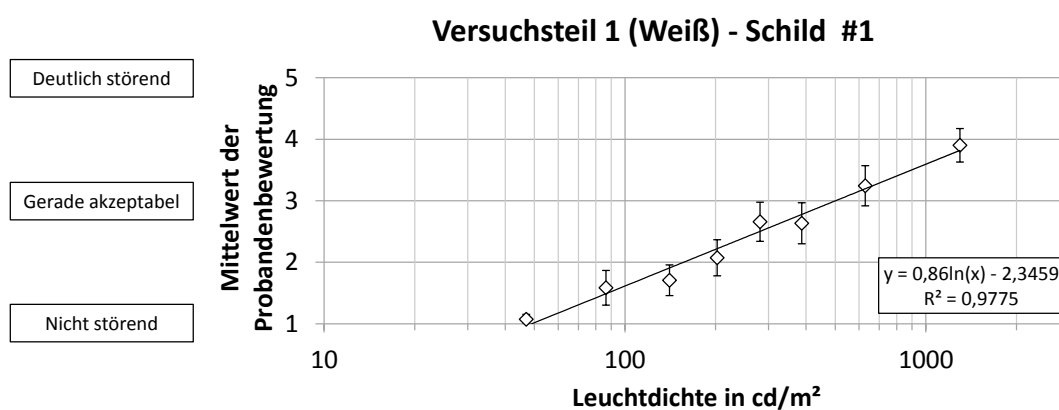


Abbildung 7.3: Zusammenhang der mittleren Probandenbewertung und der Leuchtdichte für Schild #1 (weiß)

Dies gilt sowohl für weiße als auch für gelbe Verkehrszeichen. Der Zusammenhang zwischen der Leuchtdichte der Verkehrszeichen und den Probandenbewertungen wird durch eine logarithmische Funktion angenähert. Das Bestimmtheitsmaß R^2 (quadratischer Korrelationskoeffizient nach Pearson) gibt dabei die Stärke des Zusammenhangs an. Dieser liegt bei 17 von 18 Zeichen oberhalb von 0,9. Mehr als 90 % der Variation der mittleren Probandenbewertung lässt sich also durch die Änderung der Leuchtdichte erklären [Köh95].

Vereinzelt ist zu beobachten, dass der Mittelwert der Probandenbewertung trotz steigender Leuchtdichte in einer direkt folgenden Transparenzstufe bzw. Leuchtdichtestufe, trotz höherer Leuchtdichte, niedriger ausfällt als die vorhergehende (in Abbildung 7.3 beim Sprung von ca. 300 auf 400 cd m^{-2}). Die Erklärung liegt in der Reihenfolge der Darbietung der Verkehrszeichen. Diese war zwar randomisiert, jedoch für alle Probanden gleich. Die Bewertungsreferenz der Probanden ist stets das vorher bewertete Schild. Ein Schild mittlerer Helligkeit wird demnach schlechter bewertet, wenn vorher ein sehr dunkles Schild bewertet wird. Wenn diesem Schild ein sehr helles Schild voransteht ist die Bewertung entsprechend besser.

Als Fehlerindikator für die Mittelwerte der Probandenbewertung ist der Vertrauensbereich in Form der 95 %-Konfidenzintervalle eingetragen. Dieses gibt den Bereich an, in dem der wahre (aber unbekannte) Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % liegt [Pap06]. Eine Übersicht über den Zusammenhang der Schildleuchtdichte und der Probandenbewertung für alle Verkehrszeichen des Versuchs kann Anhang G.2 entnommen werden. Dort sind außerdem die Bestimmtheitsmaße und die Gleichungen für die Näherungsfunktionen $B = w_i(L)$ für weiße Verkehrszeichen und $B = g_i(L)$ für gelbe Verkehrszeichen enthalten. B entspricht dabei dem Mittelwert der Probandenbewertung. Der Parameter i ist ein Laufindex, der die entsprechende Schildnummer bezeichnet.

Grenzwertanalyse:

Als maximal zulässige Leuchtdichte für Verkehrszeichen werden Probandenbewertungen ab einer mittleren Bewertungsstufe von drei, „gerade akzeptabel“, angesehen ($L_{Bl,3}$). Da an dieser Stelle noch keine Blendung auftritt, ist dieser Wert als konservative Untergrenze zu sehen. In der Ergebnisdarstellung wird daher ebenfalls die Bewertungsstufe vier als Grenzwert herangezogen ($L_{Bl,4}$), der bereits eine geringfügige Störwirkung anzeigt. Für die Ermittlung des Grenzwertes $L_{Bl,3}$ bzw. $L_{Bl,4}$ werden die logarithmischen Funktionen herangezogen, die den Zusammenhang zwischen Verkehrszeichenleuchtdichte und Probandenbewertung mit hoher Bestimmtheit voraussagen. Dazu wird die Bewertungsstufe drei bzw. vier als fester Wert in die Umkehrfunktion der Näherungsfunktion w_i^{-1} bzw. g_i^{-1} eingesetzt und so die entsprechende Leuchtdichte ermittelt (Gl. 7.1 und 7.2).

$$L_{Bl,3} = w_i^{-1}(3) \quad \text{bzw.} \quad L_{Bl,3} = g_i^{-1}(3) \quad (7.1)$$

$$L_{Bl,4} = w_i^{-1}(4) \quad \text{bzw.} \quad L_{Bl,4} = g_i^{-1}(4) \quad (7.2)$$

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Grenzwertermittlung für weiße (Abb. 7.4) und gelbe (Abb. 7.5) Verkehrszeichen dargestellt. Dabei ist auf der Abszisse jeweils die wahrgenommene Größe der Verkehrszeichen in Winkelminuten und auf der Ordinate die Schwellenleuchtdichte, welche die Blendungsgrenze definiert, nach Gleichung 7.1 und 7.2 angetragen. Eine Übersicht der Grenzwerte in tabellarischer Form kann zudem Anhang G.3 entnommen werden.

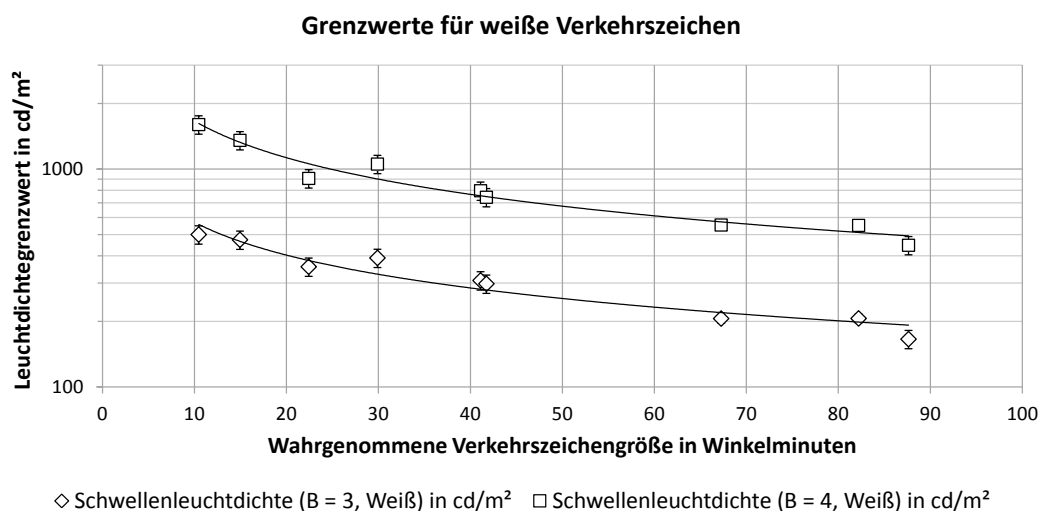


Abbildung 7.4: Leuchtdichtegrenzwert in Abhängigkeit von der Objektgröße für die Bewertungsstufe drei und vier für weiße Verkehrszeichen

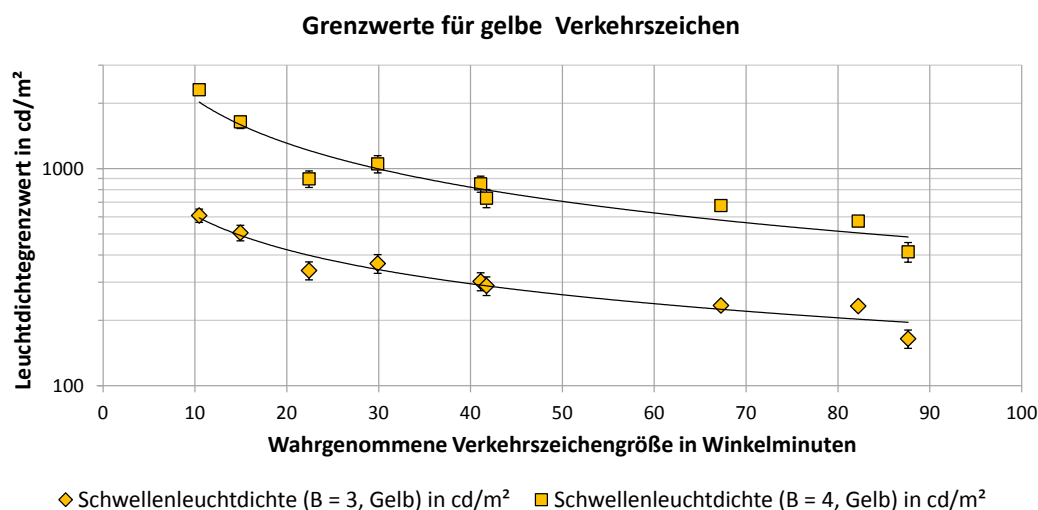


Abbildung 7.5: Leuchtdichtegrenzwert in Abhängigkeit von der Objektgröße für die Bewertungsstufe drei und vier für gelbe Verkehrszeichen

Die Diagramme zeigen, dass die wahrgenommene Größe der Schilder einen deutlichen Einfluss auf die Schwellenleuchtdichte hat. Mit zunehmender Größe der Verkehrszeichen nehmen die Leuchtdichtegrenzwerte ab. Die Probanden reagieren also empfindlicher auf größere Schilder. Dieser Verlauf ist unabhängig von der Farbe der Verkehrszeichen sowohl in Abbildung 7.4 als auch in Abbildung 7.5 zu beobachten. Bei Schildgrößen über 65 Winkelminuten sind die Änderungen der ermittelten Schwellenleuchtdichten nur noch sehr gering. Der stärkste Anstieg ist im Bereich von 10 bis 30 Winkelminuten zu beobachten. Alle Datenreihen können mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 > 0,9$ durch eine Potenz-Funktion angenähert werden. Eine Übersicht der in Abbildung 7.4 und 7.5 dargestellten Näherungsfunktionen und der Bestimm-

heitsmaße ist in Tabelle 7.8 enthalten. Dabei entspricht y dem Leuchtdichtegrenzwert in cd m^{-2} und x der wahrgenommenen Objektgröße in Winkelminuten.

Tabelle 7.8: Näherungsfunktionen und Bestimmtheitsmaße für die ermittelten Leuchtdichtegrenzwerte

Farbe	Leuchtdichteschwelle	Näherungsfunktion $f(x)$	Bestimmtheitsmaß R^2
Weiß	Bewertung > 3	$y = 1807,3 x^{-0,501}$	0,9288
Weiß	Bewertung > 4	$y = 6031,0 x^{-0,559}$	0,9530
Gelb	Bewertung > 3	$y = 2018,4 x^{-0,521}$	0,9350
Gelb	Bewertung > 4	$y = 9848,1 x^{-0,673}$	0,9153

Bei der Betrachtung der Grenzwerte in Abbildung 7.4 und 7.5 ist jeweils ein charakteristischer Sprung zwischen 22 Winkelminuten und 30 Winkelminuten zu beobachten, der dem eigentlichen Verlauf der Schwellenleuchtdichte scheinbar entgegen läuft. Die Blendungsgrenze scheint bei 22 Winkelminuten niedriger zu sein als bei 30 Winkelminuten. Der Grund hierfür liegt in der Reihenfolge der Darbietung der Schilder. Diese führt dazu, dass Schild #3 (22') als störender empfunden wird als Schild #4 (30'). Dies bewirkt ein entgegengesetzter Referenzeffekt bei Schild #3 und #4 bei Transparenzstufe sieben, der die Lage des Grenzwertes maßgeblich beeinflusst. Schild #3 (Transparenzstufe 7) geht im Versuch ein Zeichen mit der niedrigsten Helligkeitsstufe voraus, was eine hohe Bewertung indiziert, und Schild #4 (Transparenzstufe 7) geht ein Zeichen mit maximaler Intensität voraus, was eine niedrige Bewertung indiziert. Da aus technischen Gründen die Reihenfolge der Darbietung nicht für jeden einzelnen Probanden neu randomisiert werden konnte, tritt dieser Effekt in beiden Versuchsteilen, also bei weißen und gelben Verkehrszeichen, auf.

Einfluss der Farbe der Verkehrszeichen auf die Grenzwertermittlung:

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Untersuchung des Unterschieds der Schwellenleuchtdichte bei weißen und gelben Verkehrszeichen präsentiert werden. Dazu wird in Abbildung 7.6 der Verlauf der ermittelten Schwellenleuchtdichte der weißen und gelben Verkehrszeichen in einem Diagramm dargestellt. Eine Wertetabelle mit allen absoluten und prozentualen Abweichungen kann Tabelle G.3 in Anhang G.3 entnommen werden. Bezugswert bei der Berechnung der Prozentwerte ist jeweils die Schwellenleuchtdichte der weißen Verkehrszeichen.

Betrachtet man die Unterschiede zwischen den Grenzwerten für weiße und gelbe Verkehrszeichen in Abbildung 7.6 wird deutlich, dass der Unterschied in den meisten Fällen sehr gering ausfällt. Ein deutlicher Unterschied ist nur dann gegeben, wenn sich die Vertrauensbereiche eines Schildes in weiß und gelb nicht überschneiden (vgl. Abb. 7.6), da die Vertrauensbereiche die Helligkeitsschwankungen der Projektoren wiedergeben (vgl. Tab. 7.7). Das ist für $L_{Bl,3}$ nur bei Schild #1, 6 und 7 gegeben. Die Vertrauensbereiche überschneiden sich bei diesen Verkehrszeichen nicht. Für den Grenzwert $L_{Bl,4}$ ist für Schild

#1, 2 und 6 ein deutlicher Unterschied vorhanden. Bei den übrigen Schildern ist auch hier aufgrund der Überschneidung der Vertrauensbereiche kein klarer Unterschied zu erkennen.

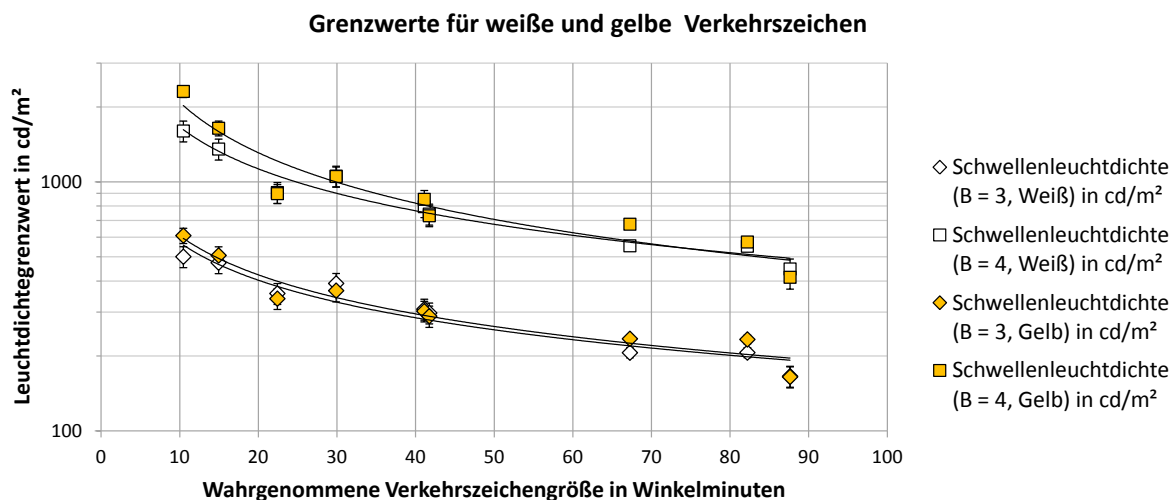


Abbildung 7.6: Unterschied der Schwellenleuchtdichte bei weißen und gelben Verkehrszeichen

7.2.5 Diskussion der Ergebnisse

Als Resultat der Probandenstudien sind Leuchtdichtegrenzwerte ermittelt worden, die die Grenze zwischen Komfort und Diskomfort der Probanden darstellt. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Studien diskutiert werden und in Bezug auf die Bedingungen im realen Straßenverkehr kritisch betrachtet werden.

Allgemeine Diskussion der Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Probandenstudie zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Störbewertung von der Verkehrszeichenleuchtdichte. Es wurde für alle im Versuch dargestellten Schilder eine steigende Störbewertung mit zunehmender Leuchtdichte ermittelt (vgl. Abb. 7.3). Ähnliche Ergebnisse liefern die Arbeiten von FRANK [Fra95], [Fra94]. JÜRGENS bewertet die Schilderblendung nicht anhand der Leuchtdichte, sondern anhand der Blendbeleuchtungsstärke am Auge [Lac14b]. Auch dieser Ansatz kann zur Beurteilung der Blendung eingesetzt werden. RAPHAEL hat jedoch nachgewiesen, dass die Leuchtdichte, unabhängig von der Beleuchtungsstärke am Auge, maßgeblichen Einfluss auf die Störempfindung hat, so dass die Leuchtdichte insgesamt besser zur Beurteilung der Schilderblendung geeignet ist, als die Beleuchtungsstärke am Auge [Rap07].

Die Ergebnisse geben ebenfalls Aufschluss über die Abhängigkeit der Schwellenleuchtdichte L_{BI} von der Verkehrszeichengröße. Als die für den Beobachter relevante Größe wird hierbei der Sehwinkel in Winkelminuten verwendet. Unabhängig von der Farbe der Verkehrszeichen reagieren

die Testpersonen umso sensitiver, je größer das Verkehrszeichen ist. Größer wahrgenommene Schilder verursachen also bei gleicher Leuchtdichte stärkere Blendung. Im Straßenverkehr bedeutet dies, dass die Schilderblendung bei Verkehrszeichen in kurzer Entfernung größer ist als in weiter Entfernung, wenn die Leuchtdichte des Verkehrszeichens gleich groß ist. Die Ergebnisse von AULBACH reihen sich dabei ohne Widerspruch in die Ergebnisse aus diesem Experiment ein. Aulbach ermittelt eine Schwellenleuchtdichte von 200 cd m^{-2} , ab der eine Formenerkennbarkeit verschiedener Testzeichen nicht mehr möglich ist, da sie überstrahlt werden [Aul92]. Dieser Wert entspricht in etwa der Störschwelle, die für Schilder ab einer Größe von ca. 65 Winkelminuten bei einer Probandenbewertung von 3 ermittelt wurde ($L_{Bl,3}$; vgl. Abb. 7.4 und 7.5). Auch die ermittelten Werte von FRANK bestätigen die hier durchgeführten Studien. Bei 70 m entfernten Schildern und einer Umgebungsleuchtdichte von $L_U = 0,01 \text{ cd m}^{-2}$ ermittelt FRANK eine Störschwelle von 550 cd m^{-2} (vgl. Kap. 2.5.4, Tab. 2.6). Im Rahmen dieses Versuchs entspricht das Schild #5, dessen wahrgenommene Größe einer Entfernung von 63 m entspricht. Der Wert liegt in etwa in der Mitte zwischen den Grenzwerten $L_{Bl,3} = 298 \text{ cd m}^{-2}$ und $L_{Bl,4} = 750 \text{ cd m}^{-2}$ (vgl. Tab.G.2) [Fra95].

Die Form oder die Position der Verkehrszeichen hatte im Rahmen dieses Experiments kaum Einfluss auf die Störbewertung. Dies wird am Vergleich von Schild #5 (Rundes Schild am Seitenrand) und #8 (rechteckiges Überkopfschild) deutlich. Beide sind nahezu flächengleich und weisen lediglich geringe Unterschiede der Schwellenleuchtdichte auf. Bei weißen Schildern beträgt dieser 10 cd m^{-2} für den Grenzwert $L_{Bl,3}$ und 53 cd m^{-2} für den Grenzwert $L_{Bl,4}$ auf (vgl. Tab G.2). Beide Abweichungen liegen innerhalb des Vertrauensbereichs der ermittelten Leuchtdichten, so dass hier nicht von einem deutlichen Unterschied gesprochen werden kann. Ausschlaggebend für die Positionsunabhängigkeit der Probandenbewertung ist das Verhalten des Fahrers im realen Straßenverkehr, das im Versuch angenähert wird. Da bei jedem Schild auch eine Blickzuwendung zur Erfassung der vorhandenen Informationen erforderlich ist spielt die eigentliche Position des Schildes bei der Bewertung keine maßgebliche Rolle mehr. Weil die Lage und die Form im Rahmen dieses Experiments jedoch nicht explizit untersucht wurden, können hieraus noch keine allgemeingültigen Schlussfolgerungen gezogen werden.

Ein klarer Einfluss der Farbe auf die Blendempfindlichkeit konnte nicht nachgewiesen werden. Die Grenzwerte für weiße und gelbe Verkehrszeichen liegen auf ähnlichem Niveau und unterscheiden sich lediglich für sehr kleine Schilder. Klare Tendenzen sind basierend auf den Untersuchungsergebnissen nicht erkennbar. Vergleicht man die Mindestanforderungen an die spezifischen Rückstrahlwerte R_A aus der Norm DIN 67520 (vgl. Kap. 2.2.3) stellt man außerdem fest, dass bei gleichem Folientyp, Anleuchtwinkel und Beobachtungswinkel die Anforderungen an weiße Verkehrszeichen stets höher sind als die Anforderungen an farbige Verkehrszeichen (z. B. gelb, blau). Dies gilt für alle Folientypen (z. B. Bauart RA1, RA2, RA3). Damit entsteht bei gleicher Beleuchtungsstärke bei weißen Schildern eine höhere Leuchtdichte und somit ein höheres Blendungsrisiko, als bei Schildern einer anderen Farbe [DIN67].

Bewertung der Ergebnisse bezogen auf Bedingungen im realen Straßenverkehr

Für die Umsetzung der Grenzwerte für Blendung in Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer ist eine abschließende Betrachtung der Versuchsergebnisse in Bezug auf die Anforderungen im realen Straßenverkehr erforderlich. Das Störimpfinden hängt dabei einerseits von der beobachtenden Person und andererseits von der tatsächlichen Leuchtdichte des Verkehrszeichens ab. Insgesamt lassen sich vier Hauptfaktoren erfassen, die Einfluss auf das Störimpfinden haben (vgl. [Nie14]). Eine Aufstellung dieser Faktoren ist in Tabelle 7.9 enthalten.

Tabelle 7.9: Haupteinflussfaktoren auf die Eigenblendung an retroreflektierenden Verkehrszeichen (vgl. [Nie14])

Scheinwerfer	Verkehrszeichen	Fahrer	Umgebung
Intensität der Lichtstärke	Art der Reflexionsfolie	Alter	Umgebungsleuchtdichte
Verteilung der Lichtstärke	Farbe der Reflexionsfolie	Adaptationszustand	zusätzliche Blendquellen
Spektrum der Lichtquelle	Größe der Zeichen	Geschlecht	Straßenart und Straßenführung
	Aufstellort	Sehhilfe	
	Alterung	Darbietungszeit	

Den größten Einfluss auf die am Schild entstehenden Leuchtdichten und damit auf die Blendung haben die Faktoren „Scheinwerfer“ und „Verkehrszeichen“. Die Beleuchtungsstärke eines Scheinwerfers kann bis zu 344 lx in 25 m Entfernung betragen (vgl. Kap. 2.5.1) und die retroreflektierenden Materialien weisen spezifische Rückstrahlwerte von mehr als $850 \text{ cd m}^{-2} \text{ lx}^{-1}$ auf (vgl. Kap. 2.2.3). Da die Schildleuchtdichten von der Beleuchtungsstärke, dem Reflexmaterial und der geometrischen Anordnung von Schild, Scheinwerfer und Beobachter abhängen, sind diese nicht von vornherein bekannt. Für eine Risikoabschätzung in einer frühen Entwicklungsphase ist es jedoch von Interesse, die zu erwartenden Leuchtdichten am Schild berechnen zu können, um eine Grenzwertüberschreitung früh zu erkennen. Die Leuchtdichte der Verkehrszeichen L_{VKZ} kann nach Gleichung 2.4 aus Kapitel 2.2.3 berechnet werden. Die zulässige senkrechte Beleuchtungsstärke auf dem Schild $E_{Bl,3}$ bzw. $E_{Bl,4}$, die gerade noch unterhalb der Grenzwerte liegt, kann durch Umformung von Gleichung 2.4 unter Berücksichtigung des Beobachtungswinkels α und des Anleuchtwinkels β_1 für jede Situation individuell nach Gleichung 7.3 berechnet werden.

$$E_{Bl} = \frac{L_{Bl} \cdot \cos(\alpha - \beta_1)}{R_A(\alpha, \beta_1)} \quad (7.3)$$

Im Folgenden werden die Grenzbeleuchtungsstärken für die in der Probandenstudie dargestellten seitlichen Verkehrszeichen vorgestellt. Die Relativlage zwischen Fahrer, Scheinwerfer und Schild bestimmt die Winkel α und β_1 und damit auch den zugrunde gelegten spezifischen

Rückstrahlwert. Diese muss bei der Berechnung der Grenzbeleuchtungsstärke daher stets berücksichtigt werden. Für den in der Probandenstudie dargestellten (nicht allgemeingültigen) Sonderfall wurde der vertikale Beobachtungs- und Anleuchtwinkel zur Berechnung herangezogen. Dabei wurden die Annahmen getroffen, dass der horizontale Anleuchtwinkel β_2 und der Verdrehwinkel ε vernachlässigt werden können. Die Arbeit von LACHMAYER und JÜRGENS bestätigen, dass diese Annahmen getroffen werden können. Bei einer Vermessung der Rückstrahlwerte von Folien des Typs RA3 der Firma 3M werden dem Reflexmaterial gleichmäßige Rückstrahlwerte in den relevanten Winkelbereichen bestätigt [Lac14b]. Die Rückstrahlwerte, die der Berechnung zugrunde gelegt werden, entstammen den Anforderungen aus DIN 67520 für die Klasse RA3A. Diese Klasse stellt die höchsten Anforderungen an die Reflexmaterialien und stellt damit den schlimmsten anzunehmenden Fall dar [DIN67]. Da in der Norm nur einzelne Beobachtungs- und Anleuchtwinkel definiert sind, wurden die Werte von R_A für die Berechnung auf Basis der in Realität vorliegenden Winkel linear interpoliert. Eine Übersicht der Werte, die der Berechnung der Grenz-Beleuchtungsstärke E_{Bl} zugrunde liegen kann Tabelle G.4 aus Anhang G.3 entnommen werden. Beispielhaft enthält Anhang G.4 noch ein Datenblatt eines Reflexmaterials der Firma 3M, welches die Anforderungen der Klasse RA3 erfüllt.

In Abbildung 7.7 werden die Grenzbeleuchtungsstärken für seitlich angebrachte Schilder in Abhängigkeit der Entfernung dargestellt. Die Position des Fahrers und der Scheinwerfer ist zu den Versuchsbedingungen aus Tab. 7.1 identisch.

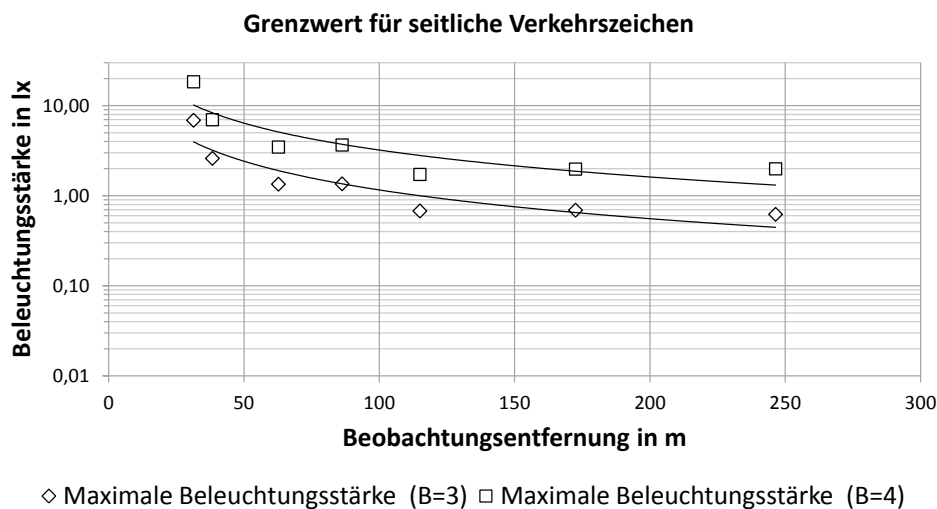


Abbildung 7.7: Maximal zulässige Beleuchtungsstärke für weiße, seitlich angebrachte Verkehrszeichen

Abbildung 7.7 zeigt, dass mit zunehmender Entfernung auch die Grenzbeleuchtungsstärke abnehmen muss. Setzt man die Grenzbeleuchtungsstärken in 31 m und 246 m ins Verhältnis ($E_{max,31m} / E_{max,246m}$) erhält man einen Faktor von 11 für B=3 und einen Faktor von 9 für B=4. Auf Schilder in 31 m Entfernung kann demnach eine um den Faktor 11 bzw. 9 höhere Beleuchtungsstärke auftreten als auf ein 246 m entferntes Schild. Dies liegt vor allem an den

winkelabhängigen Rückstrahlwerten der Verkehrszeichen. Bei größeren Entfernungen werden Anleucht- und Beobachtungswinkel kleiner und somit die Rückstrahlwerte höher. Allerdings sinken auch die Beleuchtungsstärken am Schild entsprechend dem quadratischen Entfernungsgesetz. Ein seitliches Verkehrszeichen liegt jedoch in größeren Entfernungen auch näher am Lichtschwerpunkt des Fernlichts, so dass mit vielen Lichtverteilungen und in vielen Fahrsituationen grundsätzlich die in Abbildung 7.7 dargestellten Grenzwerte überschritten werden können. Für die praktische Anwendung bedeutet dies, dass ein Grenzwert der Beleuchtungsstärke nicht pauschal für den ECE-Messschirm in 25 m Entfernung abgeleitet werden kann, da je nach Position von Fahrer, Scheinwerfer und Verkehrszeichen (und deren Reflexionseigenschaften) unterschiedliche resultierende Leuchtdichten zu erwarten sind, die als Bewertungsmaßstab herangezogen werden müssen.

Bei der Berechnung der Grenzbeleuchtungsstärke wurde der tatsächliche Zustand der Verkehrszeichen (Verschmutzung, Alter) nicht mit berücksichtigt. FRANK zeigt, dass mehr als 50 % der Verkehrsschilder älter als acht Jahre sind und somit aufgrund von Verschmutzung auch einen geringeren Rückstrahlwert besitzen. Im statistischen Mittel wurde eine Reduzierung des Rückstrahlwertes von 20 % für Schilder ermittelt, die am rechten Fahrbahnrand in 2 bis 3 m Höhe aufgestellt waren [Fra94]. Demnach stellt die Berechnung der maximal zulässigen Beleuchtungsstärken lediglich eine Basis für neue Schilder dar. Außerdem wird Reflex-Material eines anderen Typs als RA3 mit entsprechend niedrigeren Rückstrahlwerten auch niedrigere Leuchtdichten bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke ergeben. Die hier vorgestellten Werte entsprechen demnach dem schlimmsten anzunehmenden Fall für seitliche Verkehrszeichen.

Der kritischste Fall im realen Straßenverkehr entsteht dann, wenn die maximale Lichtstärke auf ein Verkehrszeichen mit hohem Rückstrahlwert trifft. Dies kann z. B. bei Richtungstafeln in engen Kurven oder bei Wegweisern an T-Kreuzungen der Fall sein, die auf Höhe der Hauptscheinwerfer im Zentrum der Ausstrahlrichtung positioniert sind. Im Fernlichtbetrieb trifft das Maximum der Lichtstärke, das im Zentrum der Lichtverteilung liegt (vgl. Kap. 2.5.1), auf das Verkehrszeichen. Unter Berücksichtigung der aktuellen Zulassungsvorschriften kann so erhebliche Blendung auftreten, wenn man die Maximalwerte für zulässige Fernlichtverteilungen betrachtet, die in den ECE-Regelungen bis zu 215 000 cd (344 lx in 25 m Entfernung) betragen können (vgl. Kap. 2.5.1). Im Zulassungsraum der FMVSS sind deutlich niedrigere Maximalwerte zulässig und dementsprechend auch eine deutlich verminderte Gefahr der Eigenblendung zu erwarten (vgl. [UNE12a], [UNE13a], [UNE13b], [FMV12]).

Ein weiterer Einflussfaktor ist der Einsatz von blendfreien Fernlichtassistenten, der die Einschalt-dauer von Fernlichtsystemen erhöht [Aus13]. Damit steigt auch indirekt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Eigenblendung. Dies gilt unabhängig von der technologischen Umsetzung des Assistenzsystems sowohl für segmentiertes Fernlicht, als auch für maskiertes Dauerfernlicht mit schwenkbaren Modulen [Sch14]. Der Einsatz dieser Systeme ist grundsätzlich als sehr positiv zu bewerten, da hierdurch die Sehbedingungen bei Nacht deutlich verbessert werden und somit auch viele Unfallrisiken vermieden werden können. Für die zukünftige Entwicklung

dieser Systeme wird jedoch empfohlen, auch eine automatische Vermeidung der Eigenblendung durch Verkehrszeichen in die Systeme zu integrieren.

Der Einfluss des Alters, der Adaptationsleuchtdichte und der Dynamik im realen Straßenverkehr wurde im Rahmen dieses Versuchs nicht explizit untersucht. All diese Faktoren beeinflussen jedoch die Blendempfindlichkeit und sollen daher im Folgenden in die Diskussion einfließen.

Das Alter des Fahrers kann sowohl Einfluss auf die physiologische als auch auf die psychologische Blendempfindlichkeit haben.

Im Alter steigt der Anteil von gestreutem Licht aufgrund von vermehrt abgestorbenen Zellen im Auge sowie einer Veränderung der Eigenschaften der Hornhaut und der Linse durch ultraviolette Strahlung. Außerdem führt ein verminderter Transmissionsgrad, der durch eine Gelbfärbung und eine Verdichtung der Linse verursacht wird, zu einer grundsätzlichen Herabsenkung der Sehleistung. Dieser Effekt variiert jedoch stark abhängig von der betreffenden Person [Nat07]. Insgesamt führt das zu einer gesteigerten physiologischen Blendung bei älteren Menschen, was beispielsweise in einer Studie von LACHMAYER und JÜRGENS belegt wird. Dort wurden bei Probanden im Alter von mehr als 30 Jahren höhere Schwellenkontraste als bei jüngeren Probanden ermittelt [Lac14a].

Auch der Einfluss des Alters auf die psychologische Blendung wurde bereits in Studien bestätigt. Im Gegensatz zur physiologischen Blendung ist der Zusammenhang jedoch deutlich inkonsistenter. FLANNAGAN ermittelt beispielsweise einen statistisch signifikanten Einfluss des Alters auf die Blendbewertung (p-Wert: 0,032). Dem Bericht zufolge erfahren ältere Probanden eine stärkere psychologische Blendung als jüngere Probanden [Fla99]. In anderen Studien wiederum, die beispielsweise von HANKEY beschrieben wurden, konnte kein signifikanter Alterseinfluss auf die psychologische Blendwirkung bestätigt werden [Han05].

Auch die Umgebungsleuchtdichte und andere Blendquellen beeinflussen die Bewertung. Dies wurde beispielsweise von FRANK belegt. Demnach hat eine höhere Umgebungsleuchtdichte genauso wie eine vorhandene Blendquelle deutlichen Einfluss auf das Störimpfinden. So steigt die Schwellenleuchtdichte von 550 cd m^{-2} auf $3\,000 \text{ cd m}^{-2}$ an, wenn die Umgebungsleuchtdichte von $0,01 \text{ cd m}^{-2}$ auf 10 cd m^{-2} angehoben wird. Ähnlich ist der Effekt auch, wenn eine Blendbeleuchtungsstärke von 6 lx am Fahrerraum vorliegt (vgl. Tab. 2.6) [Fra95]. Im Versuch war die Umgebungsleuchtdichte mit $0,02 \text{ cd m}^{-2}$ sehr niedrig und keine Blendbeleuchtungsstärke vorhanden. Auf die Realsituation übertragen bedeutet das, dass die Blendwerte in einer Vielzahl von Situationen weitaus höher liegen und somit eine deutlich größere Akzeptanz zu erwarten ist.

Weiterhin wurde der Versuch unter statischen Bedingungen durchgeführt. Die Konzentration der Probanden lag stets auf der Bewertungsaufgabe, wohingegen im realen Straßenverkehr die Aufmerksamkeit weniger stark auf die Schilder gerichtet wird. Die Tatsache, dass die Expositionszeit im realen Straßenverkehr nur sehr kurz ist, wurde im Versuch dadurch nachgestellt, dass der Blick nur kurz auf das Verkehrsschild gerichtet wurde und anschließend wieder auf

den Fixpunkt im Straßenzentrum. Gänzlich kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die Expositionszeit im Versuch länger andauert als im realen Straßenverkehr. Eine Strecke von 50 m wird bei einer Geschwindigkeit von 100 km h^{-1} beispielsweise in 1,8 s zurückgelegt. Die Darbietungszeit findet bei den meisten Formeln für die Blendbewertung keine Berücksichtigung und ein inoffizieller Bericht von LUCKIESH & GUTH bestätigt, dass die Darbietungszeit keinen signifikanten Einfluss auf die Blendbewertung hat. Dies geht aus einem Forschungsbericht von CLEAR aus dem Jahr 2012 hervor [Cle12].

Das Spektrum der Lichtquelle ist Gegenstand vieler wissenschaftlicher Untersuchungen und Diskussionen. Die Ergebnisse von VÖLKER und HAMM zeigen, dass durchaus eine Abhängigkeit zur subjektiven Hellempfindung respektive Störepfindung festzustellen ist, wohingegen ein Zusammenhang zwischen Herabsetzung der Sehleistung und dem Lichtspektrum bisher nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte [Völ12], [Ham11]. BULLOUGH zeigt, dass ein Zusammenhang zwischen Störschwelle und spV , also dem photopischen-skotopischen Verhältnis, besteht [Bul01]. Mit den Werten aus Tabelle 2.5 in Kapitel 2.5.3 kann für die jeweilige Lichtquelle auch ein entsprechender Faktor berechnet werden, der die Blendungsgrenzwerte für die Anforderungen an reale Scheinwerfer anpasst. Die reale Schwelle für einen Scheinwerfer $L_{Bl,SW}$ ändert sich demnach für unterschiedliche Lichtquellen um einen Faktor F nach Gleichung 7.4.

$$L_{Bl,SW} = L_{Bl,Versuch} \cdot F = L_{Bl,Versuch} \cdot \frac{spV_{Versuch}}{spV_{Scheinwerfer}} \quad (7.4)$$

Da der Einfluss des Spektrums auf die Blendwirkung jedoch sehr umstritten ist und hier nicht explizit untersucht wurde, wird die Anwendung der Formel nicht empfohlen, es sei denn der von BULLOUGH postulierte Zusammenhang wird durch weitere Studien eindeutig bestätigt und genau quantifiziert. Die geringen Unterschiede der Blendbewertung bei weißen und gelben Verkehrszeichen in der hier vorgestellten Studie deuten jedoch eher auf einen untergeordneten Einfluss des Lichtspektrums auf die psychologische Blendung hin. Denn trotz deutlicher Unterschiede des Spektrums konnten keine entsprechenden Unterschiede in der mittleren Probandenbewertung festgestellt werden.

Vergleich der Ergebnisse mit der Blendungsbewertung nach Hopkinson

In Kapitel 2.5.4 wurde der Blendindex $G_{Hopkinson}$ nach HOPKINSON (siehe Gl. 2.8) vorgestellt, der zur Bewertung der psychologischen Blendung als Funktion der Adaptationsleuchtdichte L_U , der Objekteleuchtdichte L_B und der Größe der Blendquelle Ω herangezogen werden kann. Der internationalen Beleuchtungskommission (CIE) wird empfohlen, einen Wert von $G_{Hopkinson} = 100$ nicht zu überschreiten [Hop57].

Im Folgenden wird $G_{Hopkinson}$ unter Einbezug der ermittelten Grenzwerte aus dem Versuch „Eigenblendung durch Verkehrszeichen“ mit weißen Zeichen ($L_{Bl,3}$ und $L_{Bl,4}$ aus Abb. 7.4)

und unter Verwendung des entsprechenden Raumwinkels für die runden Schilder berechnet (Schild #1 bis #7). Die Adaptationsleuchtdichte L_A zur Berechnung von $G_{Hopkinson}$ entspricht der mittleren Leuchtdichte im Gesichtsfeld, wobei für das Gesichtsfeld beider Augen eines gesunden Menschen von einem Winkelbereich von 180° horizontal und 130° vertikal ausgegangen wird ($\Omega_{Gesichtsfeld} \approx 5 \text{ sr}$) [Zab10]. Die Adaptationsleuchtdichte wird nach Gleichung 7.5 berechnet:

$$L_A = \frac{L_U \cdot (\Omega_{Gesichtsfeld} - \Omega_{Schild}) + L_{Bl} \cdot \Omega_{Schild}}{\Omega_{Gesichtsfeld}} \quad (7.5)$$

Die Leuchtdichte wurde wie bei HOPKINSON in der Einheit footlambert eingesetzt (1 footlambert = $3,426 \text{ cd m}^{-2}$). Durch die Berechnung soll geprüft werden, ob die Verwendung des Blendindex die Ergebnisse des Versuchs adäquat widerspiegeln kann. Die Ergebnisse der Berechnung für den Grenzwert $L_{Bl,3}$ sind in Tabelle 7.10 und für den Grenzwert $L_{Bl,4}$ in Tabelle 7.11 aufgeführt.

Tabelle 7.10: Berechnung von $G_{Hopkinson}$ für $L_{Bl,3}$ unter Einbezug der Ergebnisse aus dem Versuch „Eigenblendung durch Verkehrszeichen“

Schild #	Ω_{Schild} in sr	L_A in cd m^{-2}	$L_{Bl,3}$ in cd m^{-2}	$G_{Hopkinson}$ für $L_{Bl,3}$	Log $G_{Hopkinson}$ für $L_{Bl,3}$
1	0,000007	0,021	501	37	1,57
2	0,000015	0,021	474	58	1,77
3	0,000033	0,022	356	68	1,83
4	0,000059	0,025	391	113	2,05
5	0,000112	0,027	308	118	2,07
6	0,000301	0,032	206	113	2,05
7	0,000449	0,039	206	131	2,12

Tabelle 7.11: Berechnung von $G_{Hopkinson}$ für $L_{Bl,4}$ unter Einbezug der Ergebnisse aus dem Versuch „Eigenblendung durch Verkehrszeichen“

Schild #	Ω_{Schild} in sr	L_A in cd m^{-2}	$L_{Bl,4}$ in cd m^{-2}	$G_{Hopkinson}$ für $L_{Bl,4}$	Log $G_{Hopkinson}$ für $L_{Bl,4}$
1	0,000007	0,022	1602	222	2,35
2	0,000015	0,024	1356	280	2,45
3	0,000033	0,026	907	259	2,41
4	0,000059	0,033	1055	420	2,62
5	0,000112	0,038	796	382	2,58
6	0,000301	0,053	554	334	2,52
7	0,000449	0,070	552	351	2,55

Die Ergebnisse der Berechnung zeigen, dass die Werte von $G_{Hopkinson}$ für $L_{Bl,3}$ zwischen 37 und 131 liegen. Das entspricht einer Bewertungsstufe von „gerade wahrnehmbar“ ($G_{Hopkinson} \approx 35$) und „gerade akzeptabel“ ($G_{Hopkinson} \approx 150$) für 50% der Bevölkerung nach HOPKINSON. Die

Werte von $G_{Hopkinson}$ für $L_{Bl,4}$ liegen zwischen 222 und 420. Sie befinden sich also etwa im Bereich der Grenze zwischen Komfort und Diskomfort (BCD) von 50% der Bevölkerung ($G_{Hopkinson} \approx 350$). Das Niveau der Bewertung nach HOPKINSON entspricht also dem Niveau der Bewertung im Versuch „Eigenblendung durch Verkehrszeichen“, bei dem eine Bewertung mit $B = 3$ eine gerade akzeptable Störwirkung ausdrückt und eine Bewertung mit $B = 4$ die Zwischenstufe zur deutlichen Störwirkung wiedergibt.

Die relativen Schwankungen der Werte von $G_{Hopkinson}$ bezogen auf den Mittelwert betragen $\pm 52\%$ (für $L_{Bl,3}$) bzw. $\pm 31\%$ (für $L_{Bl,4}$). Da jedoch nicht $G_{Hopkinson}$ proportional zur Wahrnehmung ist, sondern der Logarithmus von $G_{Hopkinson}$, werden die Schwankungen im Folgenden für den Logarithmus des Blendindex angegeben. Die Werte von $\text{Log } G_{Hopkinson}$ schwanken um den Mittelwert um $\pm 14\%$ (für $L_{Bl,3}$) bzw. $\pm 6\%$ (für $L_{Bl,4}$). Insgesamt liegen die Schwankungen in einem Bereich, der etwa zwischen zwei Bewertungsstufen auf der Skala von HOPKINSON liegt. Abbildung 7.8 zeigt $\text{Log } G_{Hopkinson}$ für alle sieben Schilder. Der Wert für den BCD für 50% der Bevölkerung nach HOPKINSON ist durch eine gestrichelte Linie markiert ($G_{Hopkinson} \approx 350$ bzw. $\text{Log } G_{Hopkinson} \approx 2,54$).

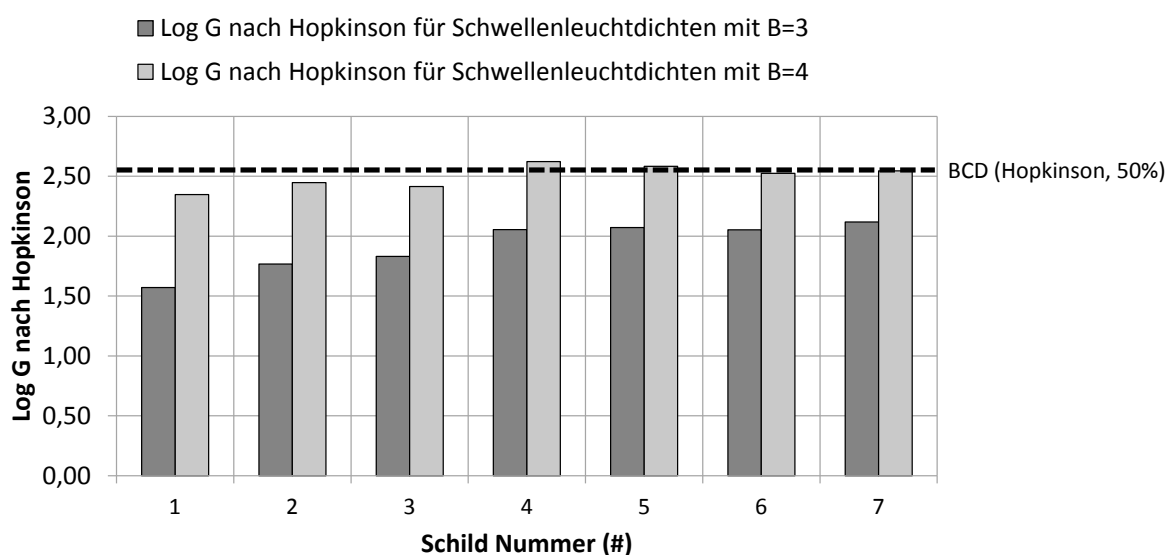


Abbildung 7.8: Darstellung von $\text{Log } G_{Hopkinson}$ unter Einbezug der Ergebnisse aus dem Versuch „Eigenblendung durch Verkehrszeichen“

In Abbildung 7.8 liegt der Logarithmus des Blendindex für Schwellenleuchtdichten mit einer mittleren Probandenbewertung von $B = 3$ stets unterhalb des Blendindex für $B = 4$. Es wird deutlich, dass $\text{Log } G_{Hopkinson}$ für eine Bewertung von $B = 4$ nur sehr geringe Schwankungen aufweist und auf dem Niveau des von HOPKINSON ermittelten Grenzwertes (BCD) für 50% der Bevölkerung liegt. Für eine Bewertung von $B = 3$ sind die Schwankungen höher, liegen jedoch noch zwischen der Bewertung „gerade wahrnehmbar“ ($\text{Log } G_{Hopkinson} \approx 1,54$) und „gerade akzeptabel“ ($\text{Log } G_{Hopkinson} \approx 2,18$) für 50% der Bevölkerung nach HOPKINSON.

Ein robuster Bewertungsindex sollte nur geringe Schwankungen aufweisen und den Zusammenhang zwischen subjektiver Blendungsbewertung, Leuchtdichte und Raumwinkel korrekt wiedergeben. Berücksichtigt man den logarithmischen Zusammenhang zwischen Bewertungsstufen und Blendindex, liefert der Blendindex von HOPKINSON teilweise sehr konstante Ergebnisse und spiegelt damit die Versuchsergebnisse angemessen wider (vgl. Abb. 7.8). Für die Verwendung dieses Bewertungsindex müssen jedoch die vorhandenen Unsicherheiten bei der Berechnung berücksichtigt werden. Große Schwankungen können vor allem bei der Berechnung der Adaptationsleuchtdichte auftreten, welche hier als mittlere Leuchtdichte im Gesichtsfeld der Probanden bestimmt wird. Geht man von einem kleineren Adaptationsbereich aus, werden die Werte von $G_{Hopkinson}$ kleiner, da die Helligkeit der Blendlichtquelle dadurch für die Adaptationsleuchtdichte eine stärkere Gewichtung erfährt. In der Literatur sind dazu verschiedene Angaben zu finden, die von unterschiedlichen Adaptationskegeln ausgehen, wie beispielsweise von 40° bei ENGEL, 30° bei DREYER oder 6° bei KAISER und BOYNTON [Eng71], [Dre06], [Kai96]. Auch der Einfluss von unterschiedlichen Bewertungsskalen bei der Grenzwertermittlung, der Vertrauensbereich der ermittelten Leuchtdichtewerte und die rechnerisch ermittelten Leuchtdichteschwellen können zu Schwankungen führen, die nicht immer eindeutig quantifiziert werden können.

Der empfohlene Maximalwert von $G_{Hopkinson} = 100$ wird bei vielen Schildgrößen (#4 bis #7) bereits bei einer Bewertung von $B = 3$ (gerade akzeptabel) überschritten (vgl. Tab. 7.10). Das bedeutet, dass sich die Probanden trotz einer Überschreitung des Blendindex in den meisten Fällen noch nicht gestört fühlten, also die Akzeptanzgrenze nicht mit dem Blendindex übereinstimmt. Daher scheint diese Grenze als zu niedrig für die in der Studie dargestellten Szenarien. Hinzu kommt, dass die Vorgabe nicht anhand eines Wertes für $\text{Log } G_{Hopkinson}$ gemacht wurde und somit Schwankungen unter Umständen falsch interpretiert werden können. Auch im Hinblick auf die meist sehr kurze Dauer der Blendung durch Verkehrszeichen sollte hier ein höherer Wert angesetzt werden. Aufgrund der guten Übereinstimmung von $\text{Log } G_{Hopkinson}$ bei einer Bewertung von $B = 4$ mit dem BCD für 50 % der Bevölkerung von HOPKINSON kann ein Wert von $\text{Log } G_{Hopkinson} = 2,5$ als Obergrenze empfohlen werden.

8 Ableitung von Anforderungen und Bewertungsmethoden zur Reduzierung der Eigenblendung

8.1 Anforderungen an die Lichtverteilung im Streulichtbereich

Die durchgeführten Untersuchungen haben durch messtechnische Verfahren und Probandenstudien die Vermutung bestätigt, dass Streulicht bei Fahrten im Schnee oder Nebel eine störende Wirkung verursachen kann (vgl. Kap. 5 und 6). Weiterhin wurde der Streulichtbereich anhand von Messdaten quantitativ beschrieben und es wurden nähere Erkenntnisse über den Einfluss qualitativer Merkmale der Lichtverteilung im Streulichtbereich gewonnen. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus anderen Forschungsarbeiten nochmals kritisch diskutiert, zudem werden die bei der Streulichtbewertung relevanten Winkelbereiche definiert und Vorgaben anhand der messtechnischen Scheinwerferanalyse am Goniofotometer abgeleitet.

8.1.1 Diskussion von bereits vorhandenen Grenzwerten im Streulichtbereich

Die Vorgaben, die in den Richtlinien der UNECE definiert sind, decken den Streulichtbereich nicht konsequent ab. So ist in den Normen für das Abblendlicht ein Großteil des Streulichtbereichs gar nicht berücksichtigt und lediglich der Bereich knapp über der HDG mit Werten von maximal 880 cd limitiert [UNE13b]. Die Vorgaben der FMVSS dagegen berücksichtigen den Streulichtbereich in der Vorschrift Nr. 108 [FMV12]. Dort ist ein maximaler Grenzwert von 125 cd im gesamten Streulichtbereich definiert. Die Verteilung innerhalb des Streulichtbereichs wird jedoch auch hier nicht berücksichtigt (vgl. Kap. 2.5.1).

DAMASKY macht strenge Vorgaben für den Streulichtbereich und gibt als Obergrenze Werte von maximal 100 bis 200 cd über der HDG an. Weiterhin wird empfohlen, dass oberhalb eines vertikalen Winkels von $+20^\circ$ gar kein Streulicht emittiert werden sollte [Dam95]. Um Eigenblendung zu vermeiden, ist die Forderung nach der Eliminierung von Streulicht grundsätzlich richtig. In der Praxis ist dies jedoch meist nicht umsetzbar, wie in der messtechnischen Analyse deutlich wird. Es entstehen bei der Reduzierung von Streulicht nämlich häufig Zielkonflikte, die z. B. das Erscheinungsbild, die Aerodynamik und die Kosten der Scheinwerfer betreffen.

ROSENHAHN formuliert seine Anforderung an die Lichtstärke auf einer Linie bei $V=10^\circ$ mit einem Maximalwert von 62,5 cd [Ros99]. Der Bereich über dieser Linie wird in seinen Forderungen nicht berücksichtigt (vgl. Kap. 2.5.2). Die Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass gerade Licht in Bereichen oberhalb von $V=20^\circ$ bei Nebel zu Störung führen kann. Daher ist auch diese Definition nicht ausreichend.

8.1.2 Definition des relevanten Winkelbereichs bei der Streulichtbewertung

Aufgrund der bei Nebel und Schnee stets nachteiligen Effekte des Streulichts wird empfohlen, bei der Bewertung der Streulichtverteilung stets den gesamten Streulichtbereich, der in Kapitel 2.3 definiert wurde, in einem horizontalen Winkelbereich (H) von -80° bis $+80^\circ$ und einem vertikalen Winkelbereich (V) von $+10^\circ$ bis $+100^\circ$ zu betrachten. Dies ist erforderlich, da gerade bei Fahrten im Nebel oder Schnee eine gute Sicht auf die eigene Fahrbahn, die Verkehrszeichen am Straßenrand und das Umfeld der Fahrbahn von besonderer Bedeutung für die Verkehrssicherheit sind.

Wie in Kapitel 5.4.4 beschrieben wurde, sind bei Nebel speziell die Bereiche steiler Abstrahlwinkel ($V=45^\circ$ bis $V=100^\circ$) kritischer zu bewerten als die Bereiche flacher Winkel ($V=10^\circ$ bis $V=45^\circ$). Bei Schnee konnte nur ein geringfügiger Winkeleinfluss festgestellt werden, bei dem tendenziell eher flache Abstrahlwinkel störender als steile Winkel bewertet werden (vgl. Kap. 6.2.4). Damit ist bei Schnee und Nebel eine gegenläufige Tendenz zu erkennen, die ohne eine funktionale Trennung von Nebel- und Schneelichtverteilungen eine Einschränkung des zu betrachtenden vertikalen Winkelbereichs nicht zulässt.

Auch der horizontale Winkelbereich sollte bei der Bewertung vollständig betrachtet werden. Vor allem Streulicht im Bereich von $H=-45^\circ$ bis $H=+80^\circ$ für den linken Scheinwerfer und $H=-80^\circ$ bis $H=+45^\circ$ beim rechten Scheinwerfer sorgt für die Aufhellung von Wasserpartikeln bzw. Schneeflocken im zentralen Sichtfeld des Fahrers und vermindert somit die Sicht auf die Fahrbahn. Im übrigen Bereich kann die Aufhellung von Wasserpartikeln bzw. Schneeflocken zu einer eingeschränkten Sicht auf den Fahrbahnrand führen und somit die Schilder- und Objekterkennung erschweren, so dass auch hier sicherheitsrelevante Risiken für den Fahrer entstehen, wenn zu viel Streulicht emittiert wird. Eine Einschränkung des zu betrachtenden horizontalen Winkelbereichs ist also nicht zielführend.

8.1.3 Vorgaben anhand der messtechnischen Scheinwerferanalyse am Goniofotometer

Im Rahmen dieser Arbeit wurden keine allgemeingültigen quantitativen Grenzwerte auf Basis physiologischer bzw. psychologischer Probandenstudien ermittelt. Um eine optimierungsorientierte Systementwicklung zu gewährleisten, werden die Anforderungen vom aktuellen Stand

der Scheinwerfertechnik abgeleitet, welcher durch die messtechnische Analyse am Goniofotometer in Kapitel 5.3 erstmals weitreichend untersucht wurde. Die zentralen Kennzahlen zur Beschreibung des Streulichtbereichs sind der Maximalwert, das 95 %-Quantil, der Mittelwert der Lichtstärke und der absolute und relative Streulichtstrom. Diese liefern, kombiniert betrachtet, in übersichtlicher Form Informationen über zulassungsrelevante Werte und über die Verteilung der Lichtstärke. So wird bei einer sehr großen Differenz zwischen Maximum und 95 %-Quantil beispielsweise schnell klar, dass es sich nur um einzelne helle Stellen innerhalb der Streulichtverteilung handelt. Im relativ großen Messbereich liegen eben gerade nur 5 % aller Messwerte zwischen diesen beiden Kennzahlen. Weisen die Werte nur eine geringe Differenz auf, deutet das auf eine eher homogene Lichtstärkeverteilung im Messbereich hin. Der relative Streulichtstrom bietet dem Beurteiler die Möglichkeit, die Effizienz des Systems zu bewerten. Denn gerade bei lichtschwachen Systemen ist ein hoher Streulichtanteil ein Maß für eine schlechte Effizienz, was sich in einer schlechten Ausleuchtung der Straße bemerkbar macht oder unter dem Aspekt eines vermeidbaren Energieverbrauchs berücksichtigt werden sollte.

Aufgrund der sehr hohen Anforderungen aus vergangenen Forschungsarbeiten (vgl. [Ros99], [Dam95]), die teilweise im starken Kontrast zu den tatsächlich erreichten Werten der messtechnischen Analyse stehen, sollen Grenzwerte definiert werden, die sowohl den Forschungsarbeiten als auch den technischen Möglichkeiten bei der Entwicklung von Scheinwerfersystemen gerecht werden. In Anbetracht der durchgeführten Untersuchungen sollten die Werte aller für die Bewertung herangezogenen Kennzahlen im Bereich der besten 25 bis 50 % aller untersuchten Scheinwerfer liegen. Aufgrund gegenläufiger Ergebnisse bei der Untersuchung der Winkelabhängigkeit des Störimpfindens bei Nebel und Schnee sollte stets der gesamte Streulichtbereich betrachtet werden.

Im Folgenden wird die Darstellung der Kennzahlen näher erläutert. Um eine übersichtliche Darstellung aller Kennzahlen in Diagrammform zu gewährleisten, werden die Kennzahlen vor dem Eintrag normiert. Die Normierung erfolgt nach Gleichung 8.1 für alle Kennzahlen K_i . Als Grundwert wird jeweils die höchste in Kapitel 5.3 ermittelte Kennzahl $K_{i,max}$ herangezogen.

$$K_{relativ} = K_i / K_{i,max} \quad (8.1)$$

In Abbildung 8.1 sind die Kennzahlen auf der Abszisse und deren Wert in normierter Form auf der Ordinate angetragen. Für alle Kennzahlen ist die 25 %-, 50 %- und 75 %-Grenze in Ampelfarben (grün, gelb, rot) dargestellt. Damit werden die Grenzen aufgezeigt, die von 25 %-, 50 %- bzw. 75 % der Scheinwerfer aus der messtechnischen Analyse am Goniofotometer nicht überschritten wurden (vgl. Kap. 5.3). Der Wert 1 entspricht dem Maximalwert aus dieser Analyse.

Das Diagramm in Abbildung 8.1 bildet den in dieser Arbeit ermittelten Stand der Technik in Form von objektiven Kennzahlen ab. Dabei wird keine Unterscheidung zwischen verschiedenen Lichtquellen oder optischen Systemen gemacht. Die Normierung ist deshalb sinnvoll, weil sie

den Vergleich verschiedener Kennzahlen, die unterschiedliche Einheiten besitzen (cd, lm, %), in einem Diagramm ermöglicht.

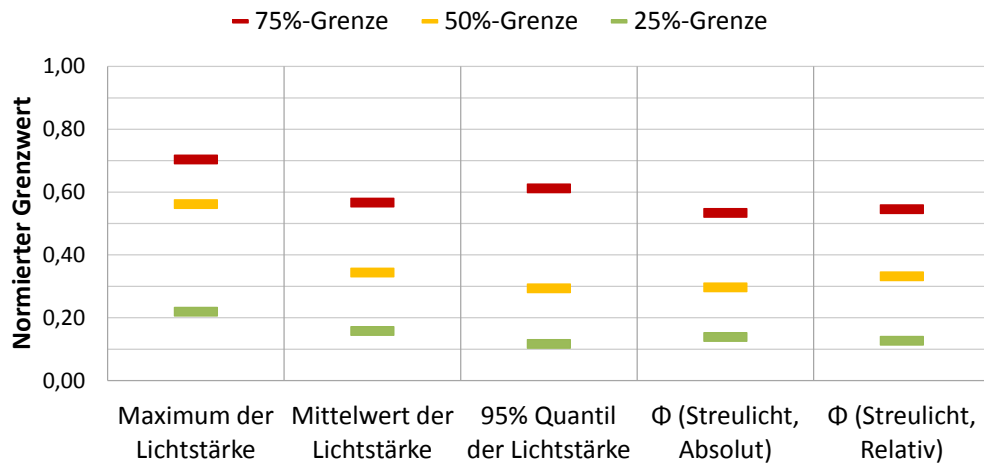


Abbildung 8.1: Liniendiagramm zur Bewertung der Streulichtverteilung anhand von objektiven Kennzahlen in normierter Form

Bindet man nun die Daten eines beliebigen Scheinwerfers in das Diagramm ein, kann anhand der Lage der einzelnen Kennzahlen in Relation zu den eingetragenen Grenzwerten schnell eine Bewertung erfolgen. Für alle Kennwerte gilt, je niedriger der Wert der Kennzahl ist, desto geringer ist das Blendungsrisiko durch Streulicht bei Nebel und Schnee.

Für die Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext und die praktische Anwendung ist neben der normierten Darstellung auch die Kenntnis der absoluten Grenzwerte von Bedeutung. Da diese in Abbildung 8.1 nicht vorhanden sind, werden in Tabelle 8.1 die Grenzwerte aus Abbildung 8.1 nochmals als Absolutwerte aufgeführt.

Tabelle 8.1: Absolute Grenzwerte der Kennzahlen aus Abbildung 8.1

Kennzahl	Maximalwerte	75 %-Grenze	50 %-Grenze	25 %-Grenze
Maximum der Lichtstärke	273,6 cd	192,5 cd	153,7 cd	60,0 cd
Mittelwert der Lichtstärke	36,6 cd	20,7 cd	12,6 cd	5,8 cd
95 % Quantil der Lichtstärke	135,7 cd	83,0 cd	39,9 cd	15,8 cd
Φ (Str., absolut)	125,0 lm	66,7 lm	37,1 lm	17,4 lm
Φ (Str., relativ)	16,5 %	9,0 %	5,5 %	2,1 %

Am Beispiel der Kennzahl „Maximum der Lichtstärke“ kann gezeigt werden, dass eine Forderung nach Höchstwerten, die im Bereich der 25 %- und 50 %-Grenze liegen, sinnvoll ist. Da die Messwerte von Scheinwerfern stammen, die bereits im Serieneinsatz sind, ist einerseits klar,

dass diese Werte technisch realisierbar sind. Andererseits werden auch die Anforderungen an den Streulichtbereich aus bisherigen Forschungsarbeiten berücksichtigt. Die Forderungen der FMVSS von maximal 125 cd im gesamten Streulichtbereich und die Forderung von ROSENHAHN nach einer maximalen Lichtstärke von 62,5 cd an bestimmten Positionen der Lichtverteilung liegen innerhalb der hier definierten Grenzen. Durch die Berücksichtigung des gesamten Streulichtbereichs und der Einbindung mehrerer Kennzahlen, wie beispielsweise dem Streulichtstrom, wird jedoch im Gegensatz zu anderen Forschungsarbeiten und gesetzlichen Regelungen eine wesentlich detailliertere und aussagekräftigere Form der Bewertung möglich.

Im Folgenden soll die Bewertung anhand von zwei exemplarischen Scheinwerfern illustriert werden (vgl. Abb. 8.2). Die jeweils schwarz dargestellten Messreihen zeigen links Scheinwerfer A und rechts Scheinwerfer B. Die Beispiele verdeutlichen die unterschiedlichen Ausprägungen des Streulichtbereichs, anhand der Relativlage der Kennzahlen zu den eingezeichneten Grenzwerten. Die 75 %- , 50 %- und 25 %-Grenzen entsprechen den in Kapitel 5.3 ermittelten und in Abbildung 8.1 dargestellten Werten.

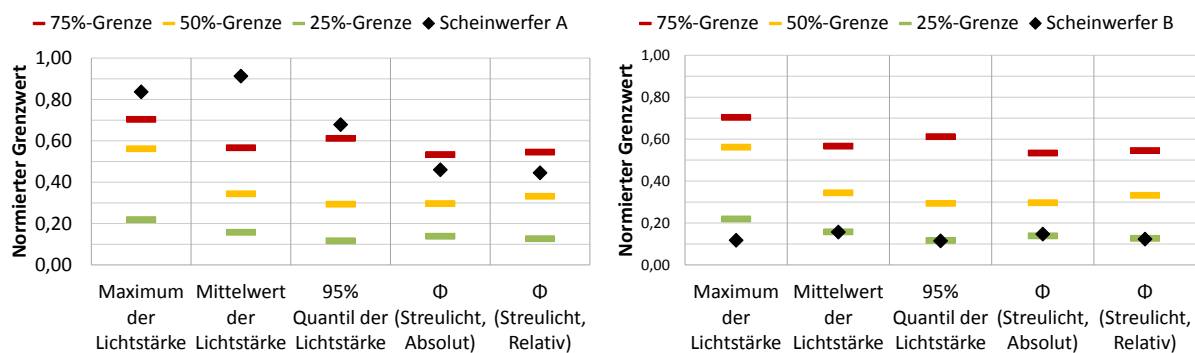


Abbildung 8.2: Beispiele für die Bewertung von zwei Scheinwerfern im Streulichtbereich anhand des Liniendiagramms

Der hier dargestellte Scheinwerfer A (Abb. 8.2, links) liegt mit den Kennwerten Maximum, Mittelwert und 95 %-Quantil außerhalb der 75 %-Grenze. Der absolute und relative Lichtstrom $\Phi(\text{Streulicht}, \text{absolut})$ und $\Phi(\text{Streulicht}, \text{relativ})$ liegt zwischen der 50 %- und 75 %-Grenze. Hier wird auf einen Blick klar, dass Scheinwerfer A in Relation zu den Scheinwerfern aus der Messreihe am Goniofotometer, auf deren Grundlage die Grenzen ermittelt wurden, eine sehr ungünstige Streulichtverteilung mit relativ hohen Werten aufweist. Scheinwerfer B zeigt im Vergleich dazu einen sehr guten Scheinwerfer, der sich bei allen hier dargestellten Kennzahlen auf dem Niveau der besten 25 % befindet (Abb. 8.2, rechts).

Weitere kennwertunabhängige Anforderungen werden aus den eigenen Untersuchungen und bereits vorhandenen wissenschaftlichen Arbeiten gewonnen. Während der Streckenerstellung für die Untersuchungen im Fahrsimulator zum Thema „Störwirkung von Streulicht bei Schnee“ (vgl. Kap. 6.2) stellte sich heraus, dass eine scharfe HDG im Streulichtbereich vermieden werden sollte. Diese ist an Schildern deutlich zu erkennen und kann daher beim Fahrer zu Irritatio-

nen führen. Dieser würde eine wandernde HDG an retroreflektierenden Schildern erkennen. Weiterhin gelten die Forderungen von HUH_N, dass Inhomogenitäten im Streulichtbereich grundsätzlich vermieden werden sollten, da diese auch bei klarer Sicht ungewollte Blickzuwendungen auslösen können (vgl. Kap. 2.5.2) [Huh96].

8.2 Bewertung von Streulicht im Nachtfahrsimulator

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei virtuelle Modelle für die Simulationssoftware Lucid-Drive entwickelt, die zur subjektiven vergleichenden Bewertung von Streulichtverteilungen herangezogen werden können. Im Folgenden sollen diese zwei Bewertungsverfahren, die sogenannte Streulichtkuppel und die Schneeumgebung, vorgestellt werden.

8.2.1 Streulichtkuppel

Zum direkten Vergleich verschiedener Streulichtverteilungen eignet sich die Bewertung in der Streulichtkuppel mit der Simulationssoftware LucidDrive. Zentrales Element ist eine halbtransparente Kuppel von 5 m Durchmesser, deren Zentrum $C(x, y, z)$ zentral zwischen linkem und rechtem Scheinwerfer, in gleicher Höhe und Längsposition der Scheinwerfer liegt. Die Streulichtverteilung wird direkt an der Oberfläche der Kuppel sichtbar und kann aus unterschiedlichen, voreingestellten Perspektiven betrachtet werden (vgl. Abb. 8.3).

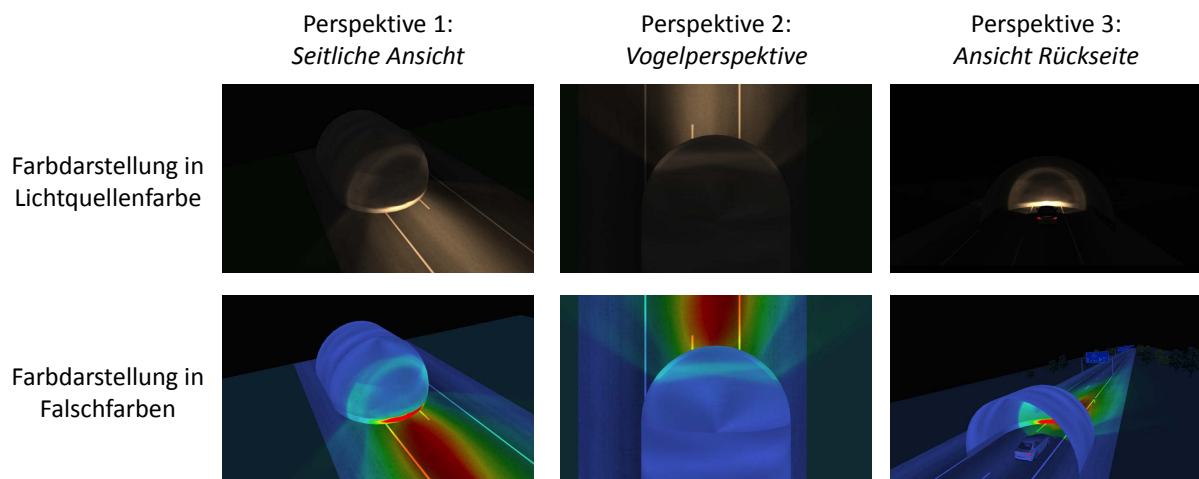


Abbildung 8.3: Streulichtkuppel aus verschiedenen Perspektiven in Lampenfarbe und Falschfarbendarstellung

Die Anwendung dieses virtuellen Modells ermöglicht den direkten Vergleich verschiedener Lichtverteilungen im Streulichtbereich. Grundvoraussetzung für diese Art der Analyse sind die entsprechenden Lichtverteilungen im ies-Datenformat, die einen identischen Messbereich

(Minimal-, Maximalwinkel) sowie eine identische Auflösung (Rastergröße) aufweisen sollten [Sch13], [Web13]. Außerdem wird die Bewertung an einem kontraststarken großflächigen Ausgabegerät (Beamer, Monitor) in dunkler Umgebung oder in einem Nachtfahringsimulator empfohlen. In Kombination mit der objektiven Bewertung anhand der in Kapitel 8.1.3 dargestellten Kennzahlen erhält man so eine umfassende visuelle und numerische Charakterisierung des Streulichtbereichs.

Die hier vorgestellten Messungen wurden alle in einem Messraster von $0,5^\circ$ im gesamten Streulichtbereich aufgenommen, was im Vergleich zur Realität zu einer gewissen Ungenauigkeit in der Simulationsumgebung führt. Das Raster verfügt jedoch in Hinsicht auf eine vertretbare Messdauer von weniger als 60 Minuten und einer akzeptablen Darstellung im Fahringsimulator über eine ausreichende Genauigkeit. Sowohl die Maximalwerte als auch der Lichtstrom und der Mittelwert des gesamten Streulichtbereichs zeigen mit einem Raster von $0,1^\circ$ keine deutlichen Unterschiede, wohingegen bei einem Raster von 1° besonders die Maximalwerte absinken.

Das Modell hat den Vorteil einer guten Reproduzierbarkeit und einer wetter- und bauteilunabhängigen Beurteilung. Außerdem können sowohl simulierte Daten als auch messtechnisch erfasste Daten verglichen werden. Die dreidimensionale Darstellung vermittelt dem Beobachter außerdem ein anschauliches, plastisches Bild der Lichtverteilung und bietet in Kombination mit den objektiven Kennzahlen ein sinnvolles Mittel zur Bewertung der Streulichtverteilung.

8.2.2 Schneenumgebung

Die virtuelle Schneenumgebung (vgl. Abb. 8.4) bietet die Möglichkeit, beliebige Lichtverteilungen hinsichtlich ihrer Störwirkung bei Schnee zu beurteilen. Auch hier ist aus Gründen der Vergleichbarkeit wichtig, dass alle dargestellten Lichtverteilungen einen identischen Messbereich sowie eine identische Auflösung besitzen.

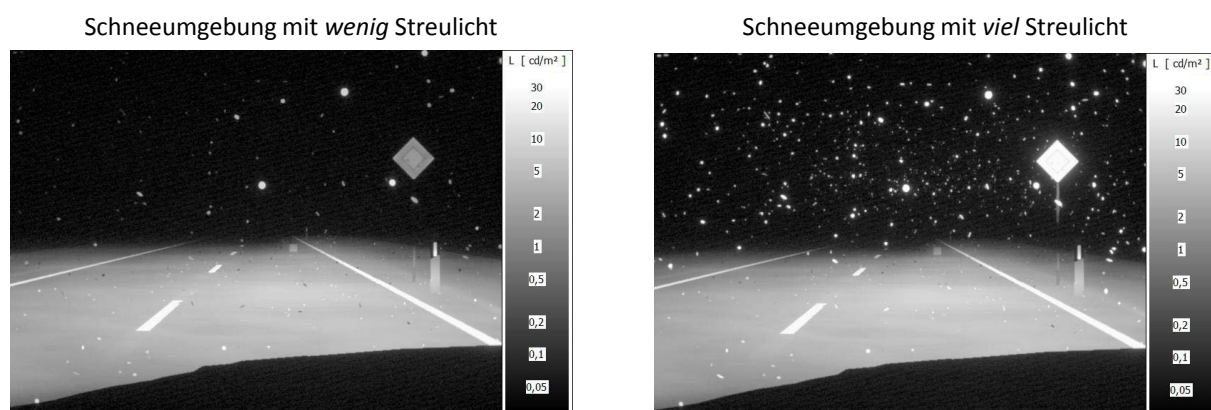


Abbildung 8.4: Leuchtdichteaufnahmen der Schneenumgebung aus dem Fahringsimulator mit hohen und niedrigen Streulichtwerten

Abbildung 8.4 zeigt zwei Leuchtdichteaufnahmen einer Szene aus dem Probandenversuch (vgl. Kap. 6.2.2), durch die die Auswirkungen der unterschiedlichen Streulichtverteilungen deutlich werden. Die Grundlichtverteilung (Abblendlicht unterhalb von $V=2,5^\circ$) ist in beiden Aufnahmen identisch, lediglich im Streulichtbereich ist im linken Bild eine niedrige Intensität und im rechten Bild eine hohe Intensität im gesamten Streulichtbereich vorhanden, was dazu führt, dass im rechten Bild insgesamt deutlich mehr Schneeflocken hell erleuchtet sind als im linken Bild. Mit Hilfe der virtuellen Schneeumgebung kann so für eine beliebige Lichtverteilung der subjektive Eindruck bei einer Schneefahrt nachempfunden werden und mit dem von anderen Lichtverteilungen verglichen werden.

Die virtuelle Umgebung bietet dem Anwender einen geraden, befahrbaren Streckenabschnitt, deren Fahrbahn mit einer hellen Schneetextur versehen ist und in deren Umgebung Streulicht von im Raum liegenden Schneeflocken reflektiert wird. Die Gesamtlänge der Strecke beträgt 200 m. Seitliche Verkehrszeichen und Überkopfschilder sind ebenfalls Bestandteil des Szenarios und tragen zu einem realistischen Umfeld bei. Die Dichte der Schneeflocken kann in zwei Stufen angepasst werden. Dabei befinden sich 1 000 oder 5 000 Flocken in einem Raumelement von 6 m Breite, 3 m Höhe und 50 m Länge, wobei grundsätzlich auch größere oder kleinere Mengen an Flocken implementiert werden können. Der begrenzende Faktor hierbei stellt die Rechenleistung des Fahrsimulators dar. Die Schneeflocken sind im Modell durch kreisrunde Flächen mit einem Radius von 10 mm angenähert, die in ungeordneter Winkellage und Position im Raum verteilt sind. Die Reflexionseigenschaften werden durch eine lambertsche Abstrahlcharakteristik angenähert und reflektieren das Streulicht unabhängig von den spektralen Reflexionseigenschaften des Schnees (vgl. Kap. 2.2.2). Die Flocken stehen in der virtuellen Umgebung fest im Raum und bewegen sich nicht, wie bei realem Schneefall, in Richtung Erdboden. Die fehlende Abwärtsbewegung wird jedoch aufgrund der Vorwärtsbewegung des Fahrzeuges in der Simulationsumgebung vom Fahrer nicht wahrgenommen, so dass ein realistisches Fahrgefühl entsteht. Der Aufprall der Schneeflocken auf der Windschutzscheibe wird im Simulationsmodell nicht nachgebildet.

Trotz einiger Einschränkungen aufgrund der Simulationsumgebung, eignet sich das virtuelle Szenario gut für die vergleichende und reproduzierbare Bewertung von Streulicht bei Schnee. Dies wird einerseits durch den guten subjektiven Eindruck und andererseits durch die hohe Reproduzierbarkeit und die wetter- und tageszeitunabhängigen Testbedingungen bei der Beurteilung im Nachtfahrsimulator begründet.

8.3 Anforderungen zur Reduzierung der Eigenblendung an Verkehrszeichen

Fernlichtsysteme mit sehr hohen maximalen Lichtstärken, eine erhöhte Einschaltdauer beim Einsatz von blendfreien Fernlichtsystemen und der Einsatz von stark reflektierenden Materialien auf Verkehrszeichen tragen zu einem erhöhten Eigenblendungsrisiko bei [Sch14]. Bestätigt wurde das einerseits durch Testfahrten im realen Straßenverkehr mit unterschiedlichen Scheinwerfersystemen. Andererseits zeigen auch die Untersuchungen von JÜRGENS und LACHMAYER, dass die Eigenblendung und erhöhte Blendbeleuchtungsstärken am Auge in bestimmten Fahrsituationen auftreten [Lac14b], [Lac14a].

Eine Bewertung der Eigenblendung über Blendbeleuchtungsstärken am Auge scheint in Hinblick auf die Untersuchungen von JÜRGENS und LACHMAYER sinnvoll. Hierzu bedarf es jedoch eines Sensorsystems, welches die Beleuchtungsstärke auch an der korrekten Position des Auges des Fahrers erfasst. Aufgrund der stark winkelabhängigen Reflexe an Schildern könnten sonst Blendungssituationen nicht korrekt detektiert werden. Zudem zeigt die Arbeit von RAPHAEL, dass die Störbewertung trotz konstanter Beleuchtungsstärke am Auge mit zunehmender Leuchtdichte ansteigt [Rap07]. Daher scheint eine Bewertung der Blendung anhand der Leuchtdichte grundsätzlich besser geeignet als anhand der Beleuchtungsstärke.

Eine permanente Beschränkung der für Fernlicht zulässigen Lichtstärke wäre eine Möglichkeit zur Vermeidung von hellen Reflexen an Verkehrszeichen, die jedoch in der Praxis mit erheblichen Einschränkungen verbunden ist. Wird nämlich ein Scheinwerfersystem so ausgelegt, dass in keiner realen Situation Blendung an Verkehrszeichen auftritt, ist mindestens im Zulassungsraum der ECE eine deutliche Reduzierung der zulässigen Lichtstärke erforderlich. Die Lichtstärke wäre jedoch auch dann geringer, wenn kein Blendungsrisiko besteht. In solchen Situationen ist eine permanent reduzierte Lichtstärke ein Nachteil, der sich auf Fahrkomfort und -sicherheit negativ auswirken kann.

Die vorausgegangenen Überlegungen unterstützen den Ansatz, der in dieser Arbeit verfolgt wurde. Dieser besteht darin, die Anforderungen anhand von zulässigen Grenzwerten für die Leuchtdichte von Verkehrszeichen zu definieren. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden in einem Versuchsaufbau im Labor Leuchtdichtegrenzwerte für die psychologische Blendwirkung von Verkehrszeichen in Abhängigkeit von der Größe der Schilder ermittelt, die für geeignete Maßnahmen zur Blendungsreduzierung herangezogen werden können. Abbildung 8.5 zeigt das Ergebnis der Untersuchungen aus Kapitel 7 in übersichtlicher Form.

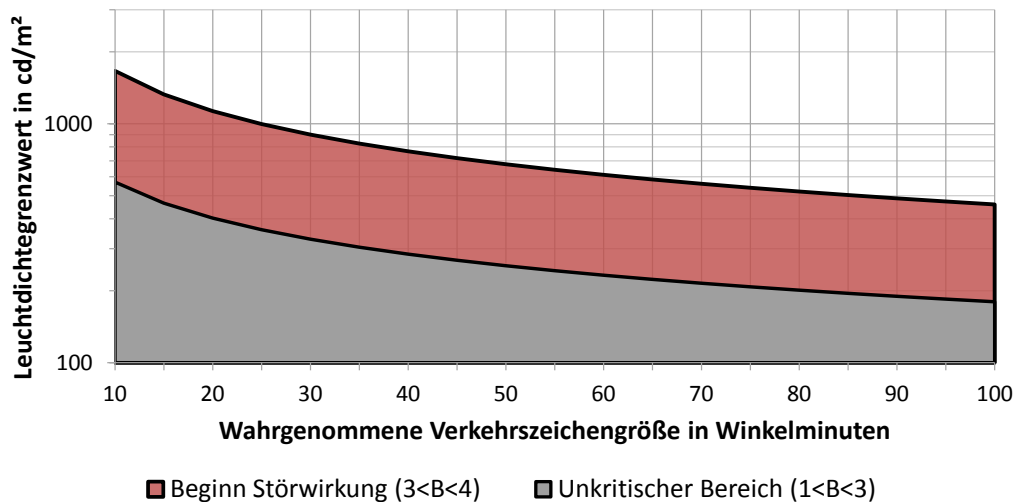


Abbildung 8.5: Maximal zulässige Leuchtdichte auf retroreflektierenden Verkehrszeichen

Der graue Bereich in Abbildung 8.5 gibt an, welche Leuchtdichten für die unterschiedlichen Schildgrößen noch akzeptiert werden, ohne dass ein störendes Gefühl auftritt. Die mittlere Probandenbewertung B überschreitet in diesem Bereich den Wert 3 („gerade akzeptabel“) nicht. Liegen die Leuchtdichtewerte der Verkehrszeichen im roten Bereich, ist die Grenze zwischen Akzeptanz und Störwirkung bereits überschritten. Abhängig vom Beobachter kann die Schwelle aufgrund von Faktoren wie dem Alter oder der persönlichen Einstellung variieren. Für einen konservativen Ansatz, der Blendung möglichst vollständig vermeidet, wird daher empfohlen, die Grenze zwischen grauem und roten Bereich nicht zu überschreiten. Oberhalb des roten Bereichs ist aufgrund der Untersuchungen in der Probandenstudie bei vielen Testpersonen bereits eine deutliche Störwirkung vorhanden ($B > 4$), so dass diese Grenze nicht überschritten werden sollte.

Sind die Materialeigenschaften der Verkehrszeichen (winkelabhängige Retroreflexion) und die Lageparameter in Bezug auf die Lichtquelle und die Fahrerposition bekannt, können aus den in Abbildung 8.5 dargestellten Leuchtdichtewerten die entsprechenden zulässigen Beleuchtungsstärken auf den Schildern ermittelt werden.

Um eine permanente Reduzierung der Lichtstärke zu umgehen, ist für die Vermeidung von Schilderblendung bei aktiviertem Fernlicht der Einsatz von adaptiven Systemen erforderlich, die eine Entblendung automatisch und situationsgerecht durchführen. Für die Umsetzung werden zwei Arten von Entblendungs-Maßnahmen empfohlen:

- Präventive Entblendung
- Reaktive Entblendung

Präventive Entblendung bedeutet, dass schon bei der Entwicklung des Scheinwerfersystems eine Risikoabschätzung anhand der zu erwartenden Leuchtdichten bzw. Beleuchtungsstärken

an typischen Verkehrszeichen durchgeführt werden soll. Dieser Prozess kann beispielsweise anhand der meist frühzeitig bekannten Anforderungen an die Lichtverteilung und bekannten Schildpositionen unter Zuhilfenahme von Simulationswerkzeugen in einer sehr frühen Phase der Entwicklung erfolgen [Sch14].

Weiterhin sollten adaptive Scheinwerfersysteme in Situationen, in denen ein besonders hohes Eigenblendungsrisiko vorhanden ist, präventiv gedimmt werden. Das maskierte Dauerfernlicht wird beispielsweise häufig durch Schwenkmodule im Scheinwerfer realisiert. Immer wenn vorausfahrende Fahrzeuge durch ein Kamerasystem detektiert werden, schwenken die Module den Lichtschwerpunkt in Richtung Fahrbahnrand am Verkehrsteilnehmer vorbei und somit direkt auf seitlich positionierte Schilder. In diesem Fall würde eine Reduzierung der Lichtstärke zu einer Reduzierung des Eigenblendungsrisikos führen ohne die direkte Sicht auf die Straße zu beeinflussen. Der Fahrer kann sich weiterhin am vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer orientieren und hat immer noch eine ausreichende Ausleuchtung des Fahrbahnrandes. Segmentierte Fernlichtsysteme könnten in kritischen Situationen die entsprechenden Segmente vorbeugend in ihrer Lichtstärke reduzieren und somit auch vorbeugend das Risiko der Eigenblendung reduzieren.

Reaktive Entblendung bedeutet, dass ein adaptives Scheinwerfersystem die Möglichkeit besitzen sollte, auf zu helle Verkehrszeichen zu reagieren. Dabei können die in Abbildung 8.5 dargestellten Grenzwerte verwendet werden. Das Kamerasystem sollte grenzwertüberschreitende Verkehrszeichen detektieren und anschließend die Lichtstärke reduzieren. Dabei ist zu beachten, dass eine Verwechslung von Verkehrsteilnehmer, die z. B. aufgrund zu hoch eingestellter Scheinwerfer blenden, und Verkehrszeichen ausgeschlossen werden muss. Dies kann beispielsweise durch eine automatische Schilder-Detektion erfolgen, die im Vorfeld bereits die Unterscheidung zwischen Verkehrszeichen und -teilnehmer durchführt. Eine andere Möglichkeit ist ein Regelsystem, welches die Auswirkungen der Scheinwerfer-Dimmung kontrolliert, indem es die im Kamerabild erfassten Helligkeiten mit dem Dimmverhalten der Lichtverteilung abgleicht. Führt eine Änderung der Lichtstärke nicht zu einer Reduzierung der Leuchtdichte des erkannten Objektes handelt es sich um einen Verkehrsteilnehmer und nicht um ein beleuchtetes Objekt.

Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte kann das Eigenblendungsrisiko vermindert und damit der Fahrkomfort und die Sicherheit beim Fahren mit Fernlicht bzw. mit blendfreien Fernlichtsystemen deutlich gesteigert werden.

9 Schlussdiskussion und Ausblick

9.1 Bewertung der Ergebnisse und Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext

9.1.1 Allgemeiner Teil

Die fehlende Berücksichtigung der Eigenblendung des Fahrzeugführers in gesetzlichen Regelungen (z. B. ECE-Regelungen), gängigen Bewertungsvorschriften (z. B. CIE Report 188) und in den Anforderungen für moderne Scheinwerfersysteme haben die hier vorgestellten Untersuchungen begründet [UNE12b], [CIE10]. Die Themenschwerpunkte dieser Arbeit waren die durch Streulicht verursachte Eigenblendung bei Nebel und Schnee und die Eigenblendung an retroreflektierenden Verkehrszeichen beim Betrieb von Fernlicht. Durch die Kombination aus messtechnischen Untersuchungen, Probandenstudien im Labor und im Nachtfahringsimulator sowie durch die Entwicklung von Visualisierungswerkzeugen konnten objektive Anforderungen und Hilfsmittel zur Reduzierung bzw. Vermeidung von Eigenblendung entwickelt werden.

Die Einordnung der Aufgabenstellung in den wissenschaftlichen Kontext erfolgte in Kapitel 2.5. Darin wird deutlich, dass die Untersuchung der Eigenblendung bereits in mehreren Forschungsarbeiten thematisiert wurde. Da die Arbeiten jedoch häufig einen anderen Schwerpunkt hatten, sind viele Ansatzpunkte, wie beispielsweise die Grenzwertbeschreibung, nur unvollständig oder gar nicht bearbeitet worden. Im Folgenden sollen die vorhandenen Lücken und Ansatzpunkte aktueller Forschungsarbeiten nochmals erläutert und für die Diskussion der Ergebnisse aus der hier vorliegenden Arbeit herangezogen werden.

Die Übertragbarkeit eines bereits existierenden Bewertungsverfahrens würde grundsätzlich viele Vorteile mit sich bringen. Die Bewertung der Eigenblendung mit ihren hier vorgestellten, sehr speziellen Ausprägungen ist jedoch aus mehreren Gründen nicht möglich. Probleme entstehen bereits bei der Definition des Blendungsbegriffs (Kap. 2.1). So treffen die gebräuchlichen Definitionen von Blendung (z. B. psychologische, physiologische Blendung) nach WÖRDENWEBER und SPRUTE nicht auf die hier formulierte Definition der Eigenblendung bei Nebel und Schnee zu [Spr11], [Wör07]. In Bezug auf diesen Themenschwerpunkt ist also eine Übertragbarkeit von vornherein ausgeschlossen, da unterschiedliche Situationen bewertet werden. Die Versuche zur Blendung an retroreflektierenden Verkehrszeichen sind mit Experimenten zur psychologischen Blendung grundsätzlich vergleichbar. Die Anwendung eines bereits vorhandenen Verfahrens

ist jedoch auch hier nicht ohne Risiken möglich. Dies wird in Kapitel 2.5.4 deutlich. Darin wird gezeigt, dass in Experimenten, deren Rahmenbedingungen auf ungleiche, spezielle Bewertungsaufgaben zugeschnitten sind, auch unterschiedliche Grenzwerte ermittelt werden, auch wenn grundsätzliche Zusammenhänge, wie die Abnahme der Schwellenleuchtdichte mit zunehmendem Raumwinkel, in allen Versuchen bestätigt werden. Die Auswahl eines optimalen Bewertungsverfahrens wird außerdem dadurch erschwert, dass häufig die Randbedingungen der zugrunde gelegten Versuchsreihen nicht vollständig bekannt sind. Auch unterschiedliche Bewertungsskalen und ungleiche Schwellen bei der Grenzwertermittlung (gerade störend/gerade akzeptabel) lassen eine Übernahme eines vorhandenen Bewertungsverfahrens nicht zu. Daher verfolgt diese Arbeit den Ansatz der Ermittlung von Störbewertung und Grenzwerten in eigens konzipierten Versuchsständen mit situationsgerechten Experimentalbedingungen. Eine Überprüfung der Übertragbarkeit ist in Kapitel 7.2.5 anhand des Blendfaktors von HOPKINSON $G_{Hopkinson}$ nach Gleichung 2.8 aus Kapitel 2.5.4 erfolgt. Diese berücksichtigt die Umgebungsleuchtdichte, die Objektgröße und die Blendleuchtdichte [Hop57]. Für die richtige Interpretation von Schwankungen sollte nicht der Blendfaktor, sondern dessen Logarithmus betrachtet werden. Aufgrund der guten Übereinstimmung von $\text{Log } G_{Hopkinson}$ bei einer Bewertung von $B = 4$ mit dem BCD für 50 % der Bevölkerung von HOPKINSON kann ein Wert von $\text{Log } G_{Hopkinson} = 2,5$ als Obergrenze empfohlen werden.

Aus der Betrachtung der Regelungen der UNECE wird deutlich, dass die Eigenblendung dort nur unzureichend berücksichtigt wird. Der Streulichtbereich ist in den aktuellen Regelungen (z. B. R123) nur bis zu vertikalen Winkeln von 4° definiert. Eine Beschränkung der Lichtstärke im Bereich oberhalb der HDG im gesamten Streulichtbereich fehlt (vgl. Definition aus Kap. 2.3, Abb. 2.5). In den Regelungen der FMVSS hingegen ist dieser Bereich durch eine maximal zulässige Leuchtdichte von 125 cd eindeutig reglementiert [FMV12]. Auch die Maximalwerte für Fernlicht in den Regelungen der UNECE und der FMVSS stehen in keinem Zusammenhang mit der Gefährdung durch Eigenblendung.

Anhand einer Umfrage wurden die Annahmen bestätigt, dass Eigenblendungseffekte im Straßenverkehr auch unter Einhaltung der Zulassungsvorschriften für Scheinwerfer auftreten (Kap. 4). Diese Tatsache bestätigt nochmals die Notwendigkeit der Forschungsarbeit auf diesem Gebiet.

9.1.2 Eigenblendung durch Streulicht bei Nebel und Schnee

Im Folgenden sollen die wichtigsten Arbeiten zum Thema Eigenblendung durch Streulicht bei Nebel und Schnee nochmals erwähnt werden. ROSENHAHN untersuchte die Anforderungen an Scheinwerfer bei schlechtem Wetter und stellte anhand von Simulationsdaten und physiologischen Untersuchungen erste Vorgaben für die Lichtstärke im Streulichtbereich auf [Ros99]. Auch DAMASKY stellt im Rahmen seiner Dissertation Forderungen für Lichtverteilungen bei Nebel auf. Diese sind jedoch in ihrer Ausprägung sehr extrem und erlauben ab einem

vertikalen Winkel von $V=20^\circ$ kein Streulicht mehr [Dam95]. KIEL untersucht die objektivierte Streulichtbewertung unter reproduzierbaren Bedingungen, geht dabei jedoch nicht auf die speziellen Auswirkungen von Streulicht bei Nebel und Schnee ein. Im Fokus steht vielmehr die Bewertung von Inhomogenitäten an einer Tunneldecke durch Simulation und in einem Aufbau im Lichtkanal. Vorgaben für die Lichtverteilung in Form von Grenzwerten werden nicht ermittelt [Kie12].

In den genannten Forschungsarbeiten fehlte jedoch eine umfassende Untersuchung der charakteristischen Eigenschaften der Lichtverteilung im Streulichtbereich und der Auswirkungen im realen Umfeld. Auch die Vorgaben und Bewertungsmethoden sind noch nicht ausreichend, um einen optimalen Entwicklungsprozess für Scheinwerfer im Streulichtbereich zu gewährleisten.

In dieser Arbeit konnten ortsauflösende Leuchtdichteaufnahmen in nebliger Umgebung dargestellt und ausgewertet werden. Diese belegen eine Erhöhung der Leuchtdichte von $0,1 \text{ cd m}^{-2}$, die allein auf Licht im Streulichtbereich zurückzuführen ist (Kap. 5.2.2). Da die Aufnahmen im realen Umfeld stattgefunden haben, muss jedoch berücksichtigt werden, dass dieser Wert je nach Umgebungsbedingung bzw. aktueller Sichtweite stark variieren kann. Bemerkenswert ist auch, dass die Streulichtverteilung, welche im Gegensatz zu anderen Fahrzeugen eine sehr deutliche Ausprägung besaß, beim Fahren selbst keine direkte Störwirkung verursachte. Die sicherheitskritische Aufhellung des Streulichtbereichs und die damit einhergehende Kontrastminderung wurde vom Fahrer auf die ohnehin schlechten Sichtbedingungen und nicht auf das Streulicht zurückgeführt. Im Vergleich zu einer streulichtfreien Lichtverteilung steht jedoch gerade die Herabsetzung des Kontrastes in Zusammenhang mit der Störwirkung, wie in der Probandenstudie in Kapitel 5.4.4 belegt wurde (Abb. 5.20).

Als Basis für eine umfassende Untersuchung und damit für die Ermittlung der Lichtverteilung im Streulichtbereich auf dem aktuellen Stand der Technik wurde ein Messverfahren am Goniofotometer entwickelt, das eine standardisierte Messung der Lichtverteilungen realer Scheinwerfer, die Auswertung objektiver Kennzahlen und die Darstellung im Fahrsimulator unter vertretbarem zeitlichen Aufwand ermöglichte (Kap. 5.3.1). Die Messreihe umfasste 22 Scheinwerfer unterschiedlicher Technologien (Reflektor-, Projektionssysteme) und Lichtquellen (Halogen-*glühlampe*, LED, HID), für die beliebige Kennzahlen auf Basis der Messwerte in Tabellenform mit Programmen wie Matlab oder MS Excel berechnet werden konnten. Zur Beschreibung des Streulichtbereichs erwies sich der Maximalwert (*MAX*), das 95 %-Quantil (*Q95*), der Mittelwert (*MW*) der Lichtstärke im Streulichtbereich und der relative und absolute Streulichtstrom als geeignet. Die Wertebereiche für die Kennzahlen können Tabelle 9.1 entnommen werden.

Tabelle 9.1: Objektive Kennzahlen im Streulichtbereich aus der Messreihe am Goniofotometer

<i>MAX</i>	<i>Q95</i>	<i>MW</i>	$\Phi_{\text{Streulicht,Relativ}}$	$\Phi_{\text{Streulicht,Absolut}}$
30 - 274 cd	8 - 136 cd	1 - 37 cd	0,8 - 16,5 %	5 - 125 lm

Durch die Darstellung der Kennzahlen MAX , $Q95$ und MW in einem Diagramm ist es außerdem möglich, anhand weniger Kennzahlen den Streulichtbereich eines Scheinwerfers übersichtlich miteinander zu vergleichen (Kap. 5.3.2, Abb. 5.7). Der relative Streulichtstrom dient zusätzlich als Indikator für die Effizienz eines Scheinwerfers, da Licht, das im Streulichtbereich emittiert wird, nicht zur Fahrbahnausleuchtung bzw. Objektdetektion beiträgt.

Neu wurde auch der Bereich definiert, der bei der Bewertung der Streulichtverteilung berücksichtigt werden muss. Die Ergebnisse der Untersuchungen in Probandenstudien zum Abstrahlverhalten bei Nebel (Kap. 5.4.4) und zum Abstrahlverhalten bei Schnee (Kap. 6.2.4) haben dazu einen wertvollen Beitrag geleistet. Beim Vergleich der Störbewertung zeigte sich eine gegensätzliche Tendenz bei den beiden Witterungsverhältnissen. Bei Nebel wirken eher steile vertikale Winkel von $V > 45^\circ$ als störend, wohingegen bei Schnee gerade die flachen Winkel von $V < 45^\circ$ als störend wahrgenommen werden. Für eine Lichtfunktion wie das Abblendlicht, welches für alle Wettersituationen geeignet sein soll, muss also der gesamte Streulichtbereich laut Definition in Kapitel 2.3 betrachtet werden.

Aus den Probandenstudien konnten zwei weitere wertvolle Erkenntnisse für die Ursachen der Störwirkungen bei Nebel und Schnee gewonnen werden. Bei Nebel wurde eine starke Korrelation mit dem Kontrast von Sehobjekten in Blickrichtung ermittelt. Dies zeigt beispielsweise der Vergleich von breiten und spotähnlichen Lichtverteilungen in Kapitel 5.4.4 und der Zusammenhang zwischen Objektkontrast und Störbewertung in Abbildung 5.20. Bei Schnee hingegen scheint die Menge an sichtbaren Schneeflocken die Störwirkung zu verursachen. Die maximale Helligkeit einzelner Schneeflocken ist nicht für die Störbewertung ausschlaggebend. Vernachlässigbar ist diese dennoch nicht, da die Höhe der Lichtstärke indirekt auch die Anzahl der sichtbaren Schneeflocken beeinflusst.

Die Anforderungen bzw. die Grenzwerte für den Streulichtbereich sind aus den bisher vorliegenden Forschungsarbeiten, der messtechnischen Analyse am Goniofotometer und den Resultaten aus den Probandenstudien entstanden. Dabei müssen die Anforderungen vorerst gleichermaßen für Schnee und Nebel gültig sein, wenn sie auf die Funktion Abblendlicht bezogen sind, welches bei allen Wetterbedingungen eingesetzt wird. Durch die Messreihe am Goniofotometer konnte ein Maßstab für den heutigen Stand der Technik im Streulichtbereich festgelegt und über mehrere Kennzahlen objektiv und vergleichbar definiert werden. So kann jede Scheinwerfer-Neuentwicklung durch eine einfache Messung nach dem in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Verfahren eingeordnet und bewertet werden. Die Anforderungen an zukünftige Scheinwerfersysteme sollten im Bereich der besten 25 bis 50 % der hier untersuchten Scheinwerfer liegen, was auch in Anbetracht der Forderungen von der FMVSS, ROSENHAHN und DAMASKY als sinnvoll eingestuft werden kann (Kap. 8.1.1, 8.1.3). Weiterhin deutet die gute Korrelation der Kennzahlen „Mittelwert der Lichtstärke“ und „absoluter Streulichtstrom“ aus der Probandenstudie im Nachtfahrsimulator auf eine gute Eignung der Kennzahlen als solche hin (Kap. 6.3).

Der Einfluss der Farbtemperatur auf die Blendwirkung wurde im Versuch „Auswirkungen von Streulicht bei Schnee“ getestet. Das Resultat war eine abnehmende Störbewertung bei höheren Farbtemperaturen. Dies stimmt nicht mit den Ergebnissen anderer Forschungsarbeiten überein. SPRUTE sieht keinen Unterschied bei der Bewertung unterschiedlicher Lichtfarben und VÖLKER prognostiziert sogar eine Zunahme der psychologischen Blendung mit zunehmender Farbtemperatur [Spr11], [Völ12]. Teilweise kann dieser Widerspruch damit begründet werden, dass sich neben der Blendwirkung auch eine Verbesserung der Sicht auf der Fahrbahn einstellt und somit der positive Effekt einer höheren Farbtemperatur überwiegt (Kap. 6.2.5). Andererseits können auch Vereinfachungen der Simulationsumgebung zu Unterschieden beigetragen haben. Für zukünftige Untersuchungen wird daher empfohlen, den Reflexionsgrad von Schnee aus Kapitel 2.2.2, Abbildung 2.1 zu verwenden, der im niedrigen Wellenlängenbereich einen deutlich höheren Reflexionsgrad aufweist als im langwelligen Bereich. Außerdem sollte das Spektrum des Scheinwerfers exakt nachgebildet werden.

Vervollständigt wird die objektive Bewertung anhand von Kennzahlen durch zwei Visualisierungswerkzeuge im Nachtfahringsimulator mit der Simulationssoftware LucidDrive. Die Streulichtkuppel (Kap. 8.2.1) und die Schneesimulation (Kap. 8.2.2) bieten eine Vergleichsmöglichkeit zwischen mehreren Lichtverteilungen unter reproduzierbaren Bedingungen und somit die Möglichkeit, die in Diagrammen und Tabellen vorliegenden Messwerte durch einen subjektiven Eindruck in einer virtuellen Umgebung zu ergänzen.

9.1.3 Eigenblendung durch retroreflektierende Schilder

Im Folgenden sollen die wichtigsten Arbeiten zum Thema Eigenblendung durch retroreflektierende Verkehrszeichen nochmals erwähnt werden. AULBACH stellte bereits 1992 in einem Forschungsbericht zur Untersuchung von Leiteinrichtungen eine Obergrenze für die Helligkeit verschiedener geometrischer Formen auf. Als Maximum wird eine Leuchtdichte von $L = 200 \text{ cd m}^{-2}$ angegeben, da hier die Formen überstrahlt werden und somit nicht mehr erkennbar sind [Aul92]. FRANK untersuchte gezielt maximal zulässige Schildhelligkeiten in Abhängigkeit von den Einflussfaktoren Umfeldleuchtdichte, Abstand zum Testzeichen und Beleuchtungsstärke am Auge (Kap. 2.5.4, Tab. 2.6). Als maximale Leuchtdichte wurden Werte zwischen $L = 550 \text{ cd m}^{-2}$ und $L = 3000 \text{ cd m}^{-2}$ ermittelt [Fra95]. JÜRGENS und LACHMAYER untersuchen 2014 speziell die Blendung durch retroreflektierende Verkehrszeichen. Dabei wurde einerseits nachgewiesen, wie die Rückstrahlcharakteristik für unterschiedliche Reflexmaterialien in Abhängigkeit der Einfallwinkel ist und andererseits wird aufgezeigt, dass bei der Nutzung aktueller Fernlichtsysteme ab ca. 25 m Entfernung für seitliche Verkehrszeichen die Blendbeleuchtungsstärke am Auge des Fahrers höher ist als die Beleuchtungsstärke E_{B50L} (zulässige Beleuchtungsstärke an der Augposition entgegenkommender Verkehrsteilnehmer auf dem ECE-Messschirm für Abblendlicht) [Lac14b]. Außerdem wurden in einer Reihe von Probandenstudien in einem realitätsnahen, statischen Versuch die psychologische Blendung,

die physiologische Blendung und der Einfluss auf die Lesbarkeit von Schildern untersucht [Lac14a].

Durch einen statischen Versuchsaufbau konnte für den Spezialfall der Schilderblendung erstmals in der vorliegenden Arbeit ein kontinuierlicher Verlauf für die Blendungsgrenze in Abhängigkeit der Sehojektgröße in einem Bereich von ca. 10' bis 90' ermittelt und eine Näherungsfunktion zur mathematischen Beschreibung aufgestellt werden (Kap. 7.2.4). Der Verlauf der für die psychologische Blendung ermittelten Grenzwerte ist vergleichbar mit dem Verlauf der Schwellenleuchtdichte nach AULBACH (vgl. Kap. 2.5.4). Die Ergebnisse zeigen, dass größere Verkehrszeichen zu einem niedrigeren Grenzwert für Blendung führen. Besonders auffällig ist eine starke Abnahme der Grenzwerte mit zunehmender Zeichengröße für „kleine“ bzw. weit entfernte Verkehrszeichen (10' - 25') und annähernd konstante Grenzwerte für „große“ bzw. nahe Verkehrszeichen (65' - 90').

Die Ergebnisse der Grenzwertermittlung lassen sich sinnvoll in den wissenschaftlichen Kontext einordnen (Kap. 7.2.5). AULBACHS Schwelle von 200 cd m^{-2} , ab der eine Formenerkennbarkeit nicht mehr möglich ist, entspricht in etwa dem hier ermittelten Grenzwert für Schilder ab einer Größe von ca. 65 Winkelminuten bei einer Probandenbewertung von 3, „gerade akzeptabel“ ($L_{Bl,3}$) [Aul92]. Auch der von FRANK ermittelte Wert von 550 cd m^{-2} für ein 70 m entferntes Schild bei einer Umgebungsleuchtdichte von $L_U = 0,01 \text{ cd m}^{-2}$ lässt sich gut einordnen. Der Wert liegt fast genau zwischen den zwei Grenzwerten $L_{Bl,3} = 298 \text{ cd m}^{-2}$ und $L_{Bl,4} = 750 \text{ cd m}^{-2}$ für Schild 5 (wahrgenommene Größe in 63 m Entfernung, $L_U = 0,01 \text{ cd m}^{-2}$) [Fra95]. Der Unterschied zu $L_{Bl,3}$ lässt sich durch eine kürzere Distanz des Verkehrszeichens zum Beobachter (63/70 m) und einer unterschiedlichen Bewertungsskala erklären. Während in dieser Studie die Untergrenze in der Mitte der unipolaren 5-stufigen Skala liegt (bei einer Bewertung von 3, „gerade akzeptabel“), zieht FRANK eine bipolare 9-stufige Skala für Störbewertung heran. Die Leuchtdichtegrenze ist bei FRANK ab einer Bewertung von 3 erreicht, was „störend“ bedeutet bzw. zwei Stufen unter dem Wert „gerade akzeptabel“ liegt [Sch14]. Daher ist ein Wert, der über dem Wert für $L_{Bl,3}$ liegt, gut nachvollziehbar.

Die doppelte Grenzwertberechnung ($L_{Bl,3}$, $L_{Bl,4}$) bildet einen Grenzbereich zwischen einer kritischen Untergrenze (gerade akzeptable Leuchtdichte) und einer konkreten Störwirkung (Zwischenstufe zur inakzeptablen Leuchtdichte) ab. Die Grenze wurde deshalb nicht als „scharfe“ Grenze gezogen, da im Versuch einige Parameter nicht explizit abgeprüft werden konnten. Darunter befanden sich Faktoren wie das niedrige Alter der Probanden (Tendenz zu niedrigeren Grenzwerten mit steigendem Alter, vgl. [Lac14a]), die Umgebungsleuchtdichte (Tendenz zu höheren Grenzwerten mit steigender Umgebungsleuchtdichte, vgl. [Fra95]) und ein statischer Versuchsaufbau (Tendenz zu höheren Grenzwerten mit zunehmender Schwierigkeit der (Fahr-)Aufgabe, vgl. [Völ12]).

Die Versuchsergebnisse weisen darauf hin, dass der Einfluss der Schild-Position bei der Bewertung der Eigenblendung nahezu vernachlässigbar ist. Aufgrund der Tatsache, dass Informa-

tionen auf einem Schild aktiv aufgenommen werden müssen und somit eine Blickzuwendung erforderlich ist, hat die Position kaum Einfluss auf die Störbewertung. Dies wurde im Versuch dadurch bestätigt, dass ein Überkopfschild und ein seitliches Verkehrszeichen derselben Größe auch den nahezu identischen Grenzwert hatten.

Die Untersuchung des Farbeinflusses (weiße/gelbe Verkehrszeichen) hat ergeben, dass Farbunterschiede nur bei sehr kleinen Schildgrößen deutlich erkennbar waren und weiße Verkehrszeichen tendenziell früher zu Blendung führen als gelbe. Verbunden mit der Tatsache, dass weiße Schilder stets die höchsten spezifischen Rückstrahlwerte nach DIN 67520 aufweisen, ist das Risiko der Eigenblendung besonders für weiße Verkehrszeichen gegeben.

9.2 Ausblick

Die hier vorgestellten Untersuchungen haben einen Beitrag zur Verbesserung des Fahrkomforts und der Fahrsicherheit geleistet, indem Vorgaben, Grenzwerte und Methoden zur Bewertung und Vermeidung von Eigenblendung erarbeitet wurden.

Um eine sinnvolle Anwendung der Grenzwerte im Streulichtbereich zu ermöglichen, ist es erforderlich, dass sowohl Automobilhersteller als auch Lieferanten von Scheinwerfersystemen die Intensität und die Verteilung von Streulicht bereits im Entwicklungsprozess berücksichtigen und den Streulichtanteil durch technische Maßnahmen auf ein Minimum reduzieren. Zur Orientierung für technisch realisierbare Untergrenzen für Streulichtwerte können die Messwerte aus den Untersuchungen am Goniofotometer herangezogen werden. Weiterhin ist es erforderlich, dass auch die Zulassungsvorschriften der UNECE so angepasst werden, dass der Streulichtbereich mit berücksichtigt wird. Als Vorbild können die Vorschriften der FMVSS herangezogen werden, wobei die Grenzwerte aus Gründen einer internationalen Harmonisierung gleich sein sollten. Hierbei sollte der gesamte Streulichtbereich mit entsprechenden Grenzwerten (vorzugsweise für Maximum, Mittelwert der Lichtstärke und Lichtstrom) versehen werden, um das Eigenblendungsrisiko zu minimieren. Empfohlen werden Werte unterhalb der 50%-Grenze aus Tabelle 8.1, was einer maximalen Lichtstärke von 150 cd, einer mittleren Lichtstärke von 12,5 cd und einem Lichtstrom von 37 lm entspricht. Die Forderung nach einer vollständigen Eliminierung von Streulicht wird dabei nicht als sinnvoll angesehen, da dies einen negativen und unkalkulierbaren Einfluss auf Kosten, Design und technischen Aufwand bedeuten kann.

Damit bei Nebel das Eigenblendungsrisiko verringert wird, muss die Lichtstärke im Streulichtbereich so gut wie möglich reduziert werden, ohne dabei die Ausleuchtung der Fahrbahn negativ zu beeinflussen. Dies kann beispielsweise durch eine optimale geometrische Gestaltung der Scheinwerferkomponenten oder eine günstige Auswahl von Oberflächenbeschichtungen erreicht werden. Um das Fahren bei Schneefall komfortabler und sicherer zu gestalten, kommen neben der Streulichtreduzierung auch andere Ansätze in Frage. Vor allem der Einsatz

von programmierbaren hochauflösenden Pixelscheinwerfern bietet ein großes Potential. Dazu ist einerseits eine Umsetzung einer Schneeflockendetektion (z. B. über ein hochauflösendes Kamerasystem) und andererseits ein anschließendes Ausblenden der Fernlichtverteilung an Stellen, die auf Schneeflocken treffen, nötig. Die hier vorgestellten Studien haben belegt, dass das Störempfinden und die Anzahl der sichtbaren Schneeflocken in engem Zusammenhang stehen. Die Carnegie Mellon University in Pittsburgh forscht an einer solchen Einrichtung und hat bereits erste Prototypen dazu entwickelt [Tam14]. So könnte in Zukunft auch das Fahren mit aktiviertem Fernlicht ohne Störung bei Schneefall möglich sein.

Situationen mit Eigenblendung durch Streulicht bei Nebel und Schnee weichen deutlich von üblichen Blendungssituationen ab und sollten daher in weiterführenden Studien noch weiter erforscht werden. Dabei sollten die negativen Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit beispielsweise anhand von physiologischen Grenzwerten spezifiziert und der Einfluss der Verteilung der Lichtstärke im Streulichtbereich noch detaillierter untersucht werden. Der Einfluss der Grundlichtverteilung (Abblendlichtverteilung ohne Streulichtbereich) auf die Blendungsbewertung bei Nebel- und Schneefahrten konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht eindeutig geklärt werden. Die aus den Untersuchungen hervorgehenden Fragestellungen, ob oder inwieweit eine bessere Ausleuchtung der Fahrbahn die Effekte der Eigenblendung durch Streulicht kompensieren kann und welchen Einfluss Faktoren wie Homogenität, Seitenausleuchtung oder Farbtemperatur der Abblendlichtverteilung haben, sollten daher noch weiter erforscht werden.

Für die Vermeidung von Eigenblendung durch retroreflektierende Verkehrszeichen sollten die Empfehlungen aus Kapitel 8.3 übernommen werden, die sowohl präventive als auch reaktive Maßnahmen vorsehen. Dazu zählt einerseits eine Risikoabschätzung, die gerade bei Hochleistungsscheinwerfern nötig ist, und die Simulation in einer frühen Entwicklungsphase. Eine Umsetzung ist bereits heute mit den zur Verfügung stehenden Simulationsprogrammen und den hier vorgestellten Ergebnissen möglich. Andererseits sollten adaptive Scheinwerfersysteme die Möglichkeit zur Dimmung bzw. zur gezielten Ausblendung von Schildern, deren Helligkeit die Störgrenze überschreitet, bereitstellen. Die erforderlichen Grenzwerte wurden im Rahmen dieser Arbeit ermittelt. Auch hier scheint der Ansatz von sogenannten Pixelscheinwerfern mit hoher Auflösung sinnvoll, da hier ein gezieltes Dimmen bzw. Ausblenden von zu hellen Schildern möglich ist. Forschungsprojekte und Ansätze dazu sind Gegenstand mehrerer Arbeiten, wobei eine technische Umsetzung bisher nur im Prototypenstatus erfolgt ist. Beispiele dafür sind unter anderem das von MICHENFELDER und NEUMANN vorgestellte Projektor-Pixellicht in einem Versuchsträger [Mic14], die von GUT und NEUMANN vorgestellten laserbasierten Pixellichtsysteme [Gut14] oder das von FIEDERLING et al. beschriebene LED-basierte Fernlicht mit 100 Pixeln [Fie14]). Mit einer Umsetzung von geeigneten Entblendungsmaßnahmen ist bereits in naher Zukunft zu rechnen, da diese durch den vermehrten Einsatz von variablen Scheinwerfersystemen und hochauflösenden Kameras in Verbindung mit den hier vorgestellten Grenzwerten bereits heute realisierbar ist.

Werden die empfohlenen Maßnahmen umgesetzt, kann ein sinnvoller Beitrag zur Vermeidung von Eigenblendung im Straßenverkehr geleistet werden. Um dies zu ermöglichen, ist die Entwicklung von technischen Lösungen zur Reduzierung von Streulicht, zur Detektion von blendenden Verkehrszeichen und einer optimalen Anpassung der Lichtstärkeverteilung erforderlich.

Unterschiede zu realen Fahrsituationen, wie beispielsweise eine erhöhte Konzentration auf die Fahraufgabe, inhomogene und sich ändernde Umgebungsleuchtdichten und eine sehr hohe Dynamik der durch Retroreflexion erzeugten Schildleuchtdichten, können Einfluss auf die ermittelten Grenzwerte haben. Diese wurden im Rahmen dieser Arbeit noch nicht vollständig quantifiziert. Daher sollten dieser Aspekte noch näher analysiert werden, um zu bestimmen, wie groß die Einflüsse der Rahmenbedingungen im Straßenverkehr auf die Blendwirkung sind, die im Laborversuch nicht nachgebildet werden konnten.

Literaturverzeichnis

- [3M 07] 3M DEUTSCHLAND GMBH: *Neue Begriffe für Leistungsbeschreibungen im Bereich Verkehrszeichen - Informationen über die Neufassung der DIN 67520*. http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?6666660Zjcf61Vs6EVs66sS_CC0rrrrrQ-. Version: Oktober 2007. – 10.05.14.
- [Ack13] ACKERMANN, L. ET AL.: *Physikalische Grundlagen und Technik Teil 1 / Physical Principles and Techniques*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, (Handbuch der medizinischen Radiologie / Encyclopedia of Medical Radiology / Physikalische Grundlagen und Technik / Physical Principles and Techniques), S. 86–89.
- [Aul92] AULBACH, Johannes: *Ermittlung optimaler Farben und Formen zur Verbesserung von Leiteinrichtungen, insbesondere bei Dunkelheit*. Technische Hochschule Darmstadt, Forschungsbericht, 1992.
- [Aul98] AULBACH, Johannes: *Lichttechnische Anforderungen an die visuelle Information von Signalbildern für die Verkehrsführung*. Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 1998.
- [Aus13] AUSTERSCHULTE, A.; DREIER, B.; ROSENHAHN, E.-O.; AUTOMOTIVE LIGHTING REUTLINGEN, GERMANY: Analysis of Safety Aspects for LED Matrix High Beam Functions. In: *10th International Symposium of Automotive Lighting 2013*, S. 330–339.
- [Bae06] BAER, R.: *Beleuchtungstechnik: Grundlagen*. 3. Aufl. Berlin: Huss-Medien, 2006.
- [Ber13] BERLITZ, S.: Lighting Roadmap 2020. In: *10th International Symposium of Automotive Lighting 2013*, S. 6–15.
- [Bul01] BULLOUGH, J. D.; RAE, M. S.: Driving in Snow: Effect of Headlamp Color at Mesopic and Photopic Light Levels. In: *SAE Technical Paper Series 2001-01-0320* 2001. – Reprinted From: Lighting Technology Developments for Automobiles (SP-1595).
- [Cer11] CERNÝ, P.; KIEL, H.; VOGLER, S.: Dynamic Benchmarking - new evaluation scheme for road illumination. In: *9th International Symposium of Automotive Lighting 2011*, S. 572–586.
- [Chi02] CHINN, B. ET AL: Primary safety new car assessment programme - annual report 2001/2002. In: *TRL Limited 2002*, August, S. 84–100.

- [CIE10] CIE TECHNICAL COMMITTEE, TC-4-45: *CIE 188:2010: Performance Assessment Method for Vehicle Headlighting Systems*. 2010.
- [Cle12] CLEAR, R. D.: Discomfort Glare: What Do We Actually Know. In: *Lighting Research and Technology* 2012, April.
- [Dam95] DAMASKY, Joachim: *Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeug-Scheinwerfer*. Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 1995.
- [Der02] DERLOFSKE, J. F. VAN; MCCOLGAN, M.: White LED sources for vehicle forward lighting. In: *Solid State Lighting II: Proceedings of SPIE* 2002.
- [Der05] DERLOFSKE, J. F. VAN; BULLOUGH, J. D., WATKINSON, J.: TLA 2005-02: Spectral effects of LED forward lighting. In: *Transportation Alliance Report* 2005, April.
- [DIN13] Norm DIN EN 13201 April 2004. *DIN EN 13201-2:2004-04 Straßenbeleuchtung - Teil 2: Gütemerkmale*.
- [DIN67] Norm DIN 67520 Oktober 2013. *Retroreflektierende Materialien zur Verkehrssicherung - Lichttechnische Mindestanforderungen an Reflexstoffe*.
- [Dre06] DREYER, Daniel: *Kontrastschwellsimulation für Sichtbarkeitsuntersuchungen an Displays*. Technische Universität München, Dissertation, 2006.
- [Eck93] ECKERT, M.: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. München: Verlag Technik GmbH Berlin, 1993.
- [Eic05] EICHHORN, K.; GÖTZ, M.; HIMMLER, A.; ROSLAK, J.: Aktives Licht Innovative Ansätze für die nächste Scheinwerfer-Generation. In: *ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift* 2005, November.
- [Eng71] ENGEL, F. L.: Visual conspicuity directed attention and retinal locus. In: *Vision Research* 11 1971, S. 563–576.
- [Fie14] FIEDERLING, R.; REINERS, T.; LIEBETRAU, T.; PARTH, D.: Intelligentes LED Modulsystem für adaptive Matrix Fernlichtlösungen. In: *6. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* 2014.
- [Fis12] FISCHER, G.; HANDT, S.; PFEFFER, B.: Bessere Sicht, erhöhte Sicherheit. In: *ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift* 2012, September.
- [Fla99] FLANNAGAN, M. J.: Subjective and objective aspects of headlamp glare: effects of size and spectral power distribution. In: *Transportation Research Institute: Report No. UMTRI-99-36* 1999, S. 10–11.
- [Fle12] FLEURY, B.; EVRARD, L.; RAVIER, J.-P.; REISS, B.: Erweiterte Funktionalität blendfreier LED-Fernlichtsysteme. In: *ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift* 2012, Juni.

- [FMV12] FMVSS: *Standard No. 108, Revision 2: Lamps, reflective devices, and associated equipment*. 2012.
- [For13] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN: *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL)*. Bd. 1 und 2. Köln: FGSV Verlag, 2013.
- [Fra94] FRANK, Helmut: *Lichttechnische Anforderungen an vertikale Verkehrszeichen bei Dunkelheit*. Technische Hochschule Darmstadt, Dissertation, 1994.
- [Fra95] FRANK, H.; EWALD, J.: *Bestimmung des Mindestrückstrahlwertes im Gebrauchszustand für retroreflektierende Materialien zur Verkehrssicherung*. Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau, 1995, (Forschung - Straßenbau und Straßenverkehrstechnik).
- [Gel90] GELLATLY, A.; WEINTRAUB, D.: Report No. UMTRI-90-20: User Reconfigurations of the de boer rating scale for discomfort glare. In: *The university of Michigan, Transportation Research Institute* 1990.
- [Gid61] GIDDINGS, J. C.; LACHAPPELLE, E.: Diffusion theory applied to radiant energy distribution and albedo of snow. In: *Journal of Geophysical Research* 1961, S. 181–189.
- [Gün08] GÜNTHER, A.: Optical concept for an active headlamp with a DMD Array. In: *Optical Sensors 2008: Proc. of SPIE Vol. 7003* 2008.
- [Goc13] GOCKE, Tim: *Objektivierte Homogenitätsbewertung des Erscheinungsbildes automobiler Signalleuchten*. Technische Universität Ilmenau, Dissertation, 2013, S. 10.
- [Grü12] GRÜNEBAUM, M., SCHMITT, P.: *Deutscher Wetterdienst: Wolken und Niederschlag*. Schulungsunterlagen des deutschen Wetterdienstes im Bildungs- und Tagungszentrum, 2012.
- [Gra13] GRASSMANN, Florian: *Erarbeitung von Konzepten bezüglich Segmentgrößen von Matrix-Scheinwerfern unter Berücksichtigung von anwendungs- und kostenorientierten Gesichtspunkten*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2013.
- [Gut14] GUT, C.; NEUMANN, C.: Theoretische Leistungs- und Effizienzanalyse laserbasierter Pixellichtsysteme. In: *6. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* 2014.
- [Ham11] HAMM, M.; LAMPEN, M.: Reality Check: How different is the perception of LED-light vs. Halogen-light on the road? In: *9th International Symposium of Automotive Lighting* 2011, S. 39–50.
- [Han05] HANKEY, J. M. ET AL.: Enhanced Night Visibility Series Volume XVIII: Overview of Phase III. In: *Virginia Tech Transportation Institute: Report No. FHWA-HRT-04-149* 2005.
- [Han13] HANAFLI, A.; ERDL, H., WEBER, S.: A new efficient, compact vehicular illumination system using high-power semiconductor laser diodes. In: *10th International Symposium of Automotive Lighting* 2013, S. 330–339.

- [Hen02] HENTSCHEL, H. J. (HRSG.): *Licht und Beleuchtung: Grundlagen und Anwendung der Lichttechnik*. Heidelberg: Hüthig, 2002.
- [Hop57] HOPKINSON, R. G.: Evaluation of Glare. In: *Illuminating Engineers Society* 1957. <http://www.ies.org/PDF/100Papers/038.pdf>.
- [Huh96] HUH, Wolfgang: Bewertung von Scheinwerferlichtverteilungen in der Automobilindustrie. In: *Tagungsband 40 Jahre Lichttechnik Darmstadt* 1996.
- [Hum09] HUMMEL, Benjamin: *Blendfreies LED-Fernlicht*. Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2009, S. 39–50.
- [Ins07] INSTRUMENT SYSTEMS, OPTRONIK: *Technisches Handbuch*. Unterlagen zum Scheinwerfermesssystem, 2007.
- [Ins13] INSTRUMENT SYSTEMS, OPTRONIK: *Prüfzertifikat No. 131220 / K02246*. Dezember 2013.
- [Kai96] KAISER, P. K.; BOYNTON, R. M.: *Human Color Vision*. Optical society of America, 1996.
- [Köh95] KÖHLER, W.; SCHACHTEL, G.; VOLESKE, P.: *Biostatistik*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1995.
- [Kie12] KIEL, Henning: *Bewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern mit Lichtsimulation*. Technische Universität Ilmenau, Dissertation, 2012.
- [Kle03] KLEINKES, Michael: *Objektivierte Bewertung des Gütemerkmals Homogenität für Scheinwerfer-Lichtverteilungen*. Universität Bielefeld, Dissertation, 2003.
- [Krü05] KRÜGER, U.; SCHMIDT, F.: Spatially resolved measurement of interior and ambient light in the automotive environment. In: *6th International Symposium of Automotive Lighting* 2005, S. 1010–1017.
- [Ksc01] KSCHISCHENK, Holger: Blendungsbewertung in der Außenbeleuchtung. In: *Lux junior* 2001.
- [Lac14a] LACHMAYER, R.; JÜRGENS, CH.: Blenden wir uns selbst? Ergebnisse einer Probandenstudie zur Untersuchung der Rückreflexion an Verkehrsschildern. In: *Licht 2014: 21. Lichtkongress* 2014.
- [Lac14b] LACHMAYER, R.; JÜRGENS, CH.: Eigenblendung an retroreflektierenden Verkehrsschildern. In: *6. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* 2014, S. 87–94.
- [Luc49] LUCKIESH, M.; GUTH S. K.: Brightness in visual field at borderline between comfort and discomfort (BCD). In: *Illuminating Engineering* 1949, November, S. 650–670.
- [Mic14] MICHENFELDER, ST.; NEUMANN, C.: Propix (Projektor-Pixellicht) - Aktueller Entwicklungsstand und praktische Erprobung mittels Probandenstudien. In: *6. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* 2014.

- [Moo11] MOOSBRUGGER, H.; KELAVA, A. (HRSG.): *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- [Mou35] MOUTON, M.: *Researches on the Physical Properties and the Physiological Effects of a Colored Light*. Paris: Sauvion and Lelievre, 1935.
- [Mou36] MOUTON, M.: *Study on the Efficacy of Projectors in a Diffusing Atmosphere*. Paris: Sauvion and Lelievre, 1936.
- [Nar01] NARASIMHAN, S. G.; NAYAR, S. K.: Vision and the Atmosphere. In: *International Journal of Computer Vision* 2001, Dezember.
- [Nat07] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA): *Nighttime Glare and Driving Performance: Report to Congress*. Februar 2007.
- [Nie14] NIEMEYER, Arvid: *Untersuchungen der Eigenblendung des Fahrzeugführers durch den Einsatz automatischer Fernlichtassistenten (blendfreies Fernlicht)*. Hochschule München, Bachelorarbeit, 2014.
- [Pap06] PAPULA, L.: *Mathematische Formelsammlung: Für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 9. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2006, (Lothar Papula), S. 436–439; 507.
- [Pau07] PAUL, H. (HRSG.): *Lexikon der Optik*. Bd. 1 und 2. Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 2007.
- [Rap07] RAPHAEL, S., ET AL.: Luminance as a criterion for the evaluation of discomfort and disability glare of headlamps. In: *7th International Symposium of Automotive Lighting* 2007, S. 427–433.
- [Rey08] REY, Stefan: *Spektrodirektionale Charakterisierung von Schnee*. Universität Zürich, Masterarbeit, 2008.
- [Ric01] RICHTER, Susann: *Einstellungen und Verhalten beim Fahren im Nebel: Eine psychologische Studie*. Technische Universität Dresden, Dissertation, 2001.
- [Ric05] RICHTER, H. J.; TRILUX REDAKTION: *13201 Planungshilfe - Licht für Europas Straßen*. <http://www.ootech.ch/downloads/EN13201.pdf>. Version: April 2005. – 19.07.14.
- [Ros99] ROSENHAHN, Ernst-Olaf: *Entwicklung von lichttechnischen Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer für Schlechtwetterbedingungen*. Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 1999.
- [Ros13] 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 of Automotive Lighting* 2013, S. 253–261.

- [Sch08] SCHLAG, B.; PETERMANN, I.; WELLER, G.; SCHULZE, C.: *Mehr Licht - Mehr Sicht - Mehr Sicherheit?: Zur Wirkung verbesserter Licht- und Sichtbedingungen auf das Fahrerverhalten*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften GmbH, 2008, (VS research: Verkehrspsychologie), S. 21–22.
- [Sch11] SCHERTENLEIB, M. H.; EGLI-BROŽ, H.: *Globale Klimatologie: Meteorologie, Wetterinformation und Klimatologie*. Compendio, 2011.
- [Sch13] SCHREIER, Peter: Bewertung von Scheinwerferlichtverteilungen bei Nebel. In: *Lux junior* 2013.
- [Sch14] SCHREIER, P; NIEMAYER, A.: Side effects of glare-free high beam systems - A study about self glare by retroreflection on street signs. In: *Vision 2014: Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving* 2014.
- [Spr11] SPRUTE, J. H.: *Entwicklung lichttechnischer Kriterien zur Blendungsminimierung von adaptiven Fernlichtsystemen*. Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2011.
- [StVo09] *Allgemeine Verwaltungsvorschriften zur Straßenverkehrs-Ordnung*. Juli 2009.
- [Tam14] TAMBURRO, R.; NURVITADHI, E. ET AL.: Programmable automotive headlights. In: *European Conference of Computer Vision (ECCV). Lecture Notes in Computer Science. Volume 8692* 2014, S. 750–765.
- [Tot08] TOTZAUER, Alexander: *Erarbeitung einer effizienten Fernlichtunterteilung abgeleitet aus einem stochastischen Modell der Bedingungen des deutschen Straßenverkehrs*. Technische Hochschule Darmstadt, Studienarbeit, 2008.
- [UNE06] UNECE: *Regulation No. 20, Revision 3: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps emitting an asymmetrical passing beam or a driving beam or both and equipped with halogen filament lamp (H4 lamps)*. 2006.
- [UNE12a] UNECE: *Regulation No. 98, Revision 3: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps equipped with gas-discharge light sources*. 2012.
- [UNE12b] UNECE: *Vehicle regulations*. <http://www.unece.org/trans/main/welcwp29.html>. Version: 2012.
- [UNE13a] UNECE: *Regulation No. 112, Revision 3: 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*. 2013.
- [UNE13b] UNECE: *Regulation No. 123, Revision 2: Uniform provisions concerning the approval of adaptive front-lighting systems (AFS) for motor vehicles*. 2013.
- [UNE13c] UNECE: *Regulation No. 19, Revision 7: Uniform provisions concerning the approval of power driven vehicle front fog lamps*. 2013.

- [VH07] VON HOFFMANN, Alexander: *Kraftfahrzeugbeleuchtung*. Skriptum zur Vorlesung, University of Applied Science Nürnberg, 2007.
- [Völ12] VÖLKER, S.: Blendung - Ein Rückblick über 100 Jahre Forschung. In: *Licht 2012: Tagungsband zur 20. Gemeinschaftstagung 2012*, S. 476–483.
- [Von03] VON HOFFMANN, ALEXANDER: *Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen*. Technische Universität Ilmenau, Dissertation, 2003.
- [Wal06] WALLENTOWITZ, H.; REIF, K. (HRSG.): *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2006, S. 315–355.
- [Web13] WEBER, S.; GÖCKE, T.; SCHREIER, P.: Evaluation and visualisation of light functions by simulation. In: *10th International Symposium of Automotive Lighting 2013*, S. 585–596.
- [Win11] WINNER, H., HAKULI, S.; WOLF, G. (HRSG.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme Für Aktive Sicherheit und Komfort*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- [Wis80] WISCOMBE W. J.; WARREN S. G.: A model for the spectral albedo of snow, I: Pure snow. In: *Journal of Atmospheric Sciences*, 37 1980, S. 2712–2733.
- [Wör07] WÖRDENWEBER, B.; WALLASCHEK, J.; BOYCE, P.; HOFFMAN, D. (HRSG.): *Automotive Lighting and Human Vision*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [Zab10] ZABEL, H.: *Kurzlehrbuch Physik*. Stuttgart: Thieme, 2010, S. 11.
- [Zie07] ZIEHL, CH.; MENSCH, D.: *Untersuchungen zur Erkennung und Bewertung von Inhomogenitäten der peripheren Scheinwerferfunktionen*. Technische Universität Ilmenau, Medienprojekt, 2007.
- [Zuy64] ZUYEV, V. Y.; KABANOV, M. V. ET AL.: Spectral transparency and microstructure of artificial fog. In: *Unedited rough draft translation, source: Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Fizika. No. 2 1964*, S. 90–97.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Eigenblendung bei Schnee oder Nebel (links) und durch retroreflektierende Verkehrszeichen (rechts)	2
2.1	Modellierte spektrale Reflektanz von reinem Schnee mit unterschiedlichen Kornradien. Aus [Rey08] nach Wiscombe et al. [Wis80]	9
2.2	Maximale Lichtstärke innerhalb unterschiedlicher Fernlichtverteilungen	10
2.3	Schematischer Aufbau unterschiedlicher retroreflektierender Materialien für den Einsatz im Straßenverkehr [3M 07]	11
2.4	Skizze zur Messanordnung zur Bewertung retroreflektierender Materialien (aus [DIN67])	12
2.5	Definition des horizontalen und vertikalen Streulichtbereichs (H, V)	13
2.6	Überblick der statischen und dynamischen Scheinwerferlichtfunktionen im Kraftfahrzeug	14
2.7	Risikosituationen der Eigenblendung und zugehörige Lichtfunktionen	15
2.8	Simulation der Streuleuchtdichte oberhalb des Horizonts mit einer Lichtstärke von 200 cd und einer Sichtweite von 50 m nach ROSENHAHN (aus [Ros99])	21
2.9	Regressionsgeraden zur Bewertung der Formenunterscheidbarkeit in Abhängigkeit von der Leuchtdichte (aus [Aul92])	25
2.10	Abhängigkeit der Schwellenleuchtdichte von der Objektgröße nach AULBACH (aus [Aul98])	26
2.11	Zusammenhang zwischen empirisch ermittelten Akzeptanzschwellen und dem Blendfaktor nach Hopkinson ([Hop57])	29
2.12	Vergleich der L & G Messwerte mit verschiedenen Blendbewertungsverfahren in Abhängigkeit der Umgebungsleuchtdichte (links) und der Objektgröße (rechts)(aus [Cle12])	30
3.1	Vorgehensweise bei den Untersuchungen zur Eigenblendung	31
3.2	Themengebiet und Methodik bei den Untersuchungen zur Eigenblendung	33
4.1	Geschlecht- und Altersverteilung der Befragten	36
4.2	Umfrageergebnisse zur Nutzung von Nebelscheinwerfern	37
4.3	Umfrageergebnisse zur Bewertung blendfreier Fernlichtassistenten	38
5.1	Vergleich von Schlechtwetterlicht, Landstraßenlicht und Fernlicht bei Nebel	43

5.2	Grauerthistogramm der Leuchtdichteaufnahmen im Streulichtbereich	44
5.3	Vergleich einer Abblendlichtverteilung mit und ohne Streulichtabschattung . . .	44
5.4	Streulichtverteilung der Versuchsfahrzeuge zur messtechnischen Erfassung von Nebelsituationen	46
5.5	Beispiele für Rastermessung der Lichtstärkeverteilung am Goniofotometer (Ab- blendlicht mit erweitertem Streulichtbereich)	47
5.6	Einteilung der Lichtverteilung im Streulichtbereich nach charakteristischen Ei- genschaften	49
5.7	Übersicht der Kennzahlen Maximum (MAX), 95 % Quantil (Q95) und Mittelwert (MW) der Lichtstärke im Streulichtbereich	49
5.8	Absoluter und relativer Streulichtstrom für eine Reihe von Abblendlicht- verteilungen	50
5.9	Darstellung der Spannweite der Kennzahlen für eine Reihe von Abblendlicht- verteilungen	51
5.10	Vergleich der Streulichtverteilung eines Scheinwerfers mit einer glatten, hoch- glänzenden und einer genarbt, mattglänzenden Zierblende	52
5.11	Vergleich der Streulichtverteilung eines Scheinwerfers mit und ohne Strahlen- blende vor dem Leuchtmittel (H4-Lampe)	52
5.12	Skizze des Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Störempfindens durch Streu- licht bei Nebel - Seitenansicht und Vogelperspektive	57
5.13	Skizze des Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Störempfindens durch Streu- licht bei Nebel - Fahrersicht	58
5.14	Anordnung der Streulichtquellen im Versuchsaufbau zum Thema Streulicht bei Nebel - Vorder- und Seitenansicht	59
5.15	Leuchtdichteaufnahmen der Versuchsszene mit der Grundlichtverteilung (links) und der Lichtverteilung mit Streulichtquelle #4 ($H=0^\circ$, $V=45^\circ$)	61
5.16	Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Abstand der wiederholten Beispiele und der Anzahl der Abweichungen bezogen auf alle Probanden	64
5.17	Mittlere Probandenbewertung in Abhängigkeit der vertikalen Abstrahlrichtung für Blickrichtung M	65
5.18	Mittlere Probandenbewertung für Streulichtquellen mit horizontalem Abstrahl- winkel von 45° bzw. -45°	66
5.19	Vergleich der Probandenbewertung einer spotähnlichen Lichtverteilung (einzelne Streulichtquelle) im Vergleich zu einer breiten Ausleuchtung (drei nebeneinander angeordnete Streulichtquellen)	67
5.20	Mittlere Probandenbewertung der Streulichtverteilung in Abhängigkeit vom Weberkontrast der Person in Blickrichtung	68
5.21	Mittlere Probandenbewertung der Streulichtverteilung in Abhängigkeit vom Weberkontrast der Person außerhalb der Blickrichtung	69

6.1	Schematische Darstellung der räumlichen Anordnung von Projektoren, Wänden und der Versuchsperson im Nachtfahrsimulator (vgl. [Gra13])	74
6.2	Schematische Darstellung der virtuellen Versuchsstrecke aus Vogelperspektive (links) und aus Fahrerperspektive (rechts)	75
6.3	Beispiele von Lichtverteilungen aus dem Versuch Störwirkung durch Streulicht bei Schnee	76
6.4	Anzahl der Schneeflocken mit einer Leuchtdichte von $L > 0,25 \text{ cd m}^{-2}$	79
6.5	Ergebnis der Bewertung von messtechnisch erfassten Scheinwerferlichtverteilungen mit und ohne Streulicht	82
6.6	Ergebnis der Bewertung unterschiedlicher Farbtemperaturen für zwei Lichtverteilungen	83
6.7	Ergebnis der Bewertung von Streulicht gleicher Intensität in verschiedenen vertikalen Winkelbereichen	85
6.8	Ergebnis der Bewertung von zwei Lichtverteilungen mit variabler Intensität im Streulichtbereich	86
6.9	Einfluss des vertikalen Abstrahlwinkels auf die mittlere Probandenbewertung im Versuch Streulichtbewertung bei Schnee und Nebel	88
6.10	Differenz der mittleren Probandenbewertung (mit/ohne Streulicht) in Abhängigkeit des Mittelwerts der Lichtstärke im Streulichtbereich (links) bzw. des Lichtstroms (rechts)	90
6.11	Histogramm für die mittlere Leuchtdichte der Schneeflocken für Lichtverteilung „Int B“ (100 und 10 000 cd)	92
6.12	Mittlere Probandenbewertung in Abhängigkeit des Logarithmus der Anzahl der Schneeflocken $L > 0,25 \text{ cd m}^{-2}$ und des Logarithmus des Maximums der mittleren Schneeflockenleuchtdichte	93
7.1	Skizze des Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Störempfindens durch retroreflektierende Verkehrszeichen - Vogelperspektive	96
7.2	Skizze des Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Störempfindens durch retroreflektierende Verkehrszeichen - Fahrerperspektive	97
7.3	Zusammenhang der mittleren Probandenbewertung und der Leuchtdichte für Schild #1 (weiß)	103
7.4	Leuchtdichtegrenzwert in Abhängigkeit von der Objektgröße für die Bewertungsstufe drei und vier für weiße Verkehrszeichen	105
7.5	Leuchtdichtegrenzwert in Abhängigkeit von der Objektgröße für die Bewertungsstufe drei und vier für gelbe Verkehrszeichen	105
7.6	Unterschied der Schwellenleuchtdichte bei weißen und gelben Verkehrszeichen	107
7.7	Maximal zulässige Beleuchtungsstärke für weiße, seitlich angebrachte Verkehrszeichen	110

7.8	Darstellung von $\text{Log } G_{\text{Hopkinson}}$ unter Einbezug der Ergebnisse aus dem Versuch „Eigenblendung durch Verkehrszeichen“	115
8.1	Liniendiagramm zur Bewertung der Streulichtverteilung anhand von objektiven Kennzahlen in normierter Form	120
8.2	Beispiele für die Bewertung von zwei Scheinwerfern im Streulichtbereich anhand des Liniendiagramms	121
8.3	Streulichtkuppel aus verschiedenen Perspektiven in Lampenfarbe und Falschfarbendarstellung	122
8.4	Leuchtdichteaufnahmen der Schneeumgebung aus dem Fahrsimulator mit hohen und niedrigen Streulichtwerten	123
8.5	Maximal zulässige Leuchtdichte auf retroreflektierenden Verkehrszeichen	126
E.1	Übersicht über die Lichtverteilungen aus der Messreihe am Goniofotometer (Abblendlicht inkl. Streulichtbereich)	168
E.2	Fotos zum Versuchsaufbau der Probandenstudie zur Untersuchung von Streulicht bei Nebel	169
E.3	Leuchtdichteaufnahme aus Beifahrersicht in Falschfarbendarstellung und Regionen zur Ermittlung der zeitlichen Konstanz der Streuleuchtdichten. Verlauf der mittleren Leuchtdichte der Messregionen in Abhängigkeit der Zeit	171
E.4	Mittlere Probandenbewertung in Abhängigkeit der vertikalen Abstrahlrichtung für Blickrichtung L, M, R	173
E.5	Darstellung der Messung am Goniofotometer in verschiedenen Mess-Rastern (1° , $0,5^\circ$, $0,15^\circ$) als Lichtstärkeverteilung (oben) und als Darstellung im Fahrsimulator in der Streulichtkuppel (Mitte). Änderung der Kennzahlen Mittelwert, Maximalwert und Lichtstrom in Abhängigkeit des Mess-Rasters (unten).	174
F.1	Im Versuch „Streulichtbewertung bei Schnee“ dargestellte Lichtverteilungen - Teil 1176	
F.2	Im Versuch „Streulichtbewertung bei Schnee“ dargestellte Lichtverteilungen - Teil 2177	
F.3	Ergebnis der Korrelationsanalyse zum Versuch Streulichtbewertung bei Schnee	178
F.4	Histogramme der mittleren Leuchtdichte der Schneeflocken von Lichtverteilung „Int A“ in fünf Intensitätsstufen	179
G.1	Leuchtdichte - Probandenbewertung - Diagramme beim Versuch „Eigenblendung durch Schilder“	184

Tabellenverzeichnis

2.1	Wetterbedingungen und zugehörige Partikelarten, Radien und Konzentrationen (entnommen aus [Nar01])	8
2.2	Vorgaben für die Lichtstärke des Abblendlichts oberhalb der HDG aus den Normen der UNECE und des FMVSS	19
2.3	Vorgaben für Blendpunkte bei Abblendlicht aus den Normen der UNECE und des FMVSS	19
2.4	Wertebereich für Fernlicht im Punkt HV aus den Normen der UNECE und des FMVSS	20
2.5	Skotopisch-photopisches Verhältnis (spV) von verschiedenen Lichtquellen ([Der02], [Der05])	24
2.6	Maximal zulässige Leuchtdichten in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren (aus [Fra95])	27
5.1	Kennzahlen im Streulichtbereich vor und nach der Optimierung	53
5.2	Zusammenstellung der geometrischen Abmessungen des Versuchsstandes . . .	57
5.3	Leuchtdichte der einzelnen Sehobjekte im Versuch zur Streulichtbewertung bei Nebel	60
5.4	Bewertungsskala zum Versuch „Störung durch Streulicht bei Nebel“	62
5.5	Zusammenstellung der Rahmenbedingungen zum Versuch „Auswirkungen von Streulicht bei Nebel“	62
6.1	Übersicht der im Versuch dargebotenen Lichtverteilungen	78
6.2	Bewertungsskala zum Versuch „Störung durch Streulicht bei Schnee“	81
6.3	Zusammenstellung der Rahmenbedingungen zum Versuch „Auswirkungen von Streulicht bei Schnee“	81
6.4	Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse für unterschiedliche Farbtemperaturen ($\alpha = 0,05$, $H_0: \bar{B}_{5200K} = \bar{B}_{5950K} = \bar{B}_{6700K}$)	84
6.5	Leuchtdichte der Schneeflocken in Abhängigkeit der eingestellten Farbtemperatur	84
6.6	Bestimmtheitsmaß aus der Korrelationsanalyse von Kennzahlen mit der Differenz der mittleren Probandenbewertung ΔB	91
7.1	Zusammenstellung der Annahmen zur Konstruktion der tatsächlichen Abmessungen der Szene im Versuchsaufbau	98

7.2	Größe der seitlichen Verkehrszeichen, Beobachtungsentfernung und Anleucht- winkel	99
7.3	Größe der Überkopf-Schilder, Beobachtungsentfernung und Anleuchtwinkel . .	99
7.4	Fläche, Schildgröße und Leuchtdichte gelber und weißer Verkehrszeichen	100
7.5	Bewertungsskala zum Versuch „Eigenblendung durch retroreflektierende Ver- kehrszeichen“	101
7.6	Zusammenstellung der Rahmenbedingungen zum Versuch „Eigenblendung durch Verkehrszeichen“	102
7.7	Prozentuale Schwankungen der Leuchtdichte der Verkehrszeichen	103
7.8	Näherungsfunktionen und Bestimmtheitsmaße für die ermittelten Leuchtdichte- grenzwerte	106
7.9	Haupteinflussfaktoren auf die Eigenblendung an retroreflektierenden Verkehrs- zeichen (vgl. [Nie14])	109
7.10	Berechnung von $G_{Hopkinson}$ für $L_{Bl,3}$ unter Einbezug der Ergebnisse aus dem Versuch „Eigenblendung durch Verkehrszeichen“	114
7.11	Berechnung von $G_{Hopkinson}$ für $L_{Bl,4}$ unter Einbezug der Ergebnisse aus dem Versuch „Eigenblendung durch Verkehrszeichen“	114
8.1	Absolute Grenzwerte der Kennzahlen aus Abbildung 8.1	120
9.1	Objektive Kennzahlen im Streulichtbereich aus der Messreihe am Goniofotometer	131
E.1	Reihenfolge der dargebotenen Streulichtquellen im Versuch	170
E.2	Wertetabelle zur Auswertung der zeitlichen Konstanz im Versuchsaufbau Nebel- kammer (vgl. Abb. E.3)	172
G.1	Leuchtdichte der dargebotenen Verkehrszeichen in der Probandenstudie	181
G.2	Schwellenleuchtdichte für Verkehrszeichen unterschiedlicher Größe	185
G.3	Abweichungen der Schwellenleuchtdichte für Verkehrszeichen mit weißer und gelber Farbe	185
G.4	Werte für die Berechnung der Grenzbeleuchtungsstärke $E_{Bl,3}$ und $E_{Bl,4}$	186

Anhang A – Thesen zur Doktorarbeit

1. Fahrten bei Schnee oder Nebel rufen in der Dunkelheit beim Fahrzeugführer Eigenblendung hervor. Dabei kann schon das aktivierte Abblendlicht zu Blendung führen.
2. Bei Fahrten mit Fernlicht, besonders beim Einsatz von blendfreien Fernlichtassistenten, tritt Eigenblendung durch helle retroreflektierende Schilder auf.
3. Ansätze zur Vermeidung der Eigenblendung sind notwendig und müssen erarbeitet werden.
4. Streulicht erzeugt bei Fahrten im Nebel eine Kontrastminderung und wirkt störend. Die Verteilung und die Intensität des Lichts sind die Haupteinflussfaktoren auf die Störwirkung.
5. Die negativen Einflüsse von Streulicht bei Nebel werden nicht immer durch den Fahrer bemerkt, so dass hier ein erhöhtes Sicherheitsrisiko besteht.
6. Der Streulichtbereich ist in den Normen der ECE noch nicht ausreichend beschrieben und reglementiert.
7. Der Streulichtbereich kann durch geeignete Kennzahlen objektiv und reproduzierbar beschrieben werden.
8. Die Streulichtverteilung kann durch geeignete konstruktive Maßnahmen verändert werden.
9. Die Störwirkung von Streulicht bei Nebel ist abhängig von der Abstrahlrichtung des Lichts aus dem Scheinwerfer.
10. Streulicht wirkt stets störend bei Fahrsituationen im Schnee.
11. Die Lichtverteilung hat Einfluss auf den Grad der Störwirkung.
12. Die Farbtemperatur (im Streulichtbereich) wirkt sich auf die Störempfindung bei Fahrten im Schnee aus.
13. Eine Steigerung der Intensität der Lichtstärke führt zu einem größeren Störempfinden bei Fahrten im Schnee.
14. Die Störwirkung von Streulicht bei Schnee ist abhängig von der Abstrahlrichtung des Lichts aus dem Scheinwerfer.

15. Die Störwirkung hängt maßgeblich von der Anzahl der sichtbaren Schneeflocken ab und nicht von der maximalen Helligkeit der Schneeflocken.
16. Die Streulichtbewertung ist bei Nebel und Schnee nicht gleich.
17. Die Störwirkung an retroreflektierenden Verkehrszeichen kann durch die Leuchtdichte beschrieben werden.
18. Die Störwirkung hängt von der Entfernung zum Beobachter bzw. von der Größe der Verkehrszeichen ab.
19. Es besteht kein Unterschied zwischen farblich unterschiedlichen Verkehrszeichen.
20. Vorgaben für den Streulichtbereich können Anhand von objektiven Kennzahlen gemacht werden.
21. Eine subjektive Bewertung von Streulicht kann durch Simulation im Fahrsimulator erreicht werden. Objektivität und Reproduzierbarkeit ermöglichen eine Optimierung der Scheinwerfersysteme hinsichtlich ihrer Streulichteigenschaften.
22. Die Störwirkung von retroreflektierenden Verkehrszeichen kann durch die Nutzung von Grenzwerten unter Einbezug von Kamerasystemen reduziert werden.

Anhang B – Erklärung

Erklärung gemäß Anlage 1 der Promotionsordnung der Technischen Universität Ilmenau in der Fassung der Achten Änderung vom 05. Juli 2013 - Allgemeine Bestimmungen

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise unentgeltlich geholfen:

1. Arvid Niemeyer, Aufbau und Durchführung einer Probandenstudie zum Thema Schilderblendung (Bachelorarbeit)
2. Michael Neumann, Aufbau und Durchführung einer Probandenstudie zum Thema Streulicht bei Schnee (Studienarbeit)
3. Stefan Winkler, Aufbau und Durchführung einer Probandenstudie zum Thema Streulicht bei Nebel (Studienarbeit)

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch bewertet wird und gemäß § 7 Abs. 10 der Promotionsordnung den Abbruch des Promotionsverfahrens zur Folge hat.

Ort, Datum

Unterschrift

Anhang C – Datenblätter der eingesetzten Messtechnik

- Datenblatt Leuchtdichte- und Farbmesskamera LMK 98-3 Color
- Datenblatt Spectroradiometer specbos 1201

Bitte zur nächsten Seite umblättern.

Leuchtdichte- und Farbmesskamera LMK 98-3 Color



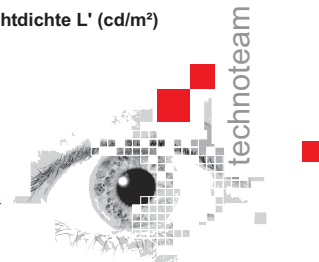
Sensor	CCD Sony ICX 285 AL
Auflösung (effektive Bildpunkte)	1380 (H) x 1030 (V)
Pixelraster	6.45 μm x 6.45 μm
Sensorfläche	8.9 (H) x 6.64 (V) mm² (2/3")
Ausleseregime	Progressive Scan
Videosignal	12 bit digital
Computerschnittstelle	FireWire Interface (IEEE1394, iLink)
Auflösung Einzelpunkt (Dynamikumfang)	Einzelmessung: 1:1100 (\approx 61 dB) Mehrfachmessung (10 Bilder): 1:3600 (\approx 71 dB) HighDyn-Messung: 1:10 000 000 (\approx 140 dB)
Spektrale Anpassung ¹	Direkte Realisierung der Normspektralwertkurven nach CIE31 durch vier Vollfilter (Zwei Filter für X und je ein Filter für Y/V(λ) und Z)
Güte der spektralen Anpassung	$V(\lambda) f_1 < 3 \% ^2$ $X(\lambda) f_1 < 4 \% \quad Z(\lambda) f_1 < 6 \% \quad V(\lambda) f_1 < 6 \% ^2$
Zusätzliche Filterpositionen	Glasfilter (standard ⁴) Skotopische Anpassung V' (λ) (optional)
Messgrößen / measurement parameters	Leuchtdichte L (cd/m²) - Farbkoordinaten: x,y Weitere unterstützte Farbräume: RGB, XYZ, sRGB, EBU-RGB, User, Lxy, Luv, Lu'v', L*u*v*, C*h*s*uv, L*a*b*, C*h*ab; HIS; HSV; HSL Dominante Wellenlänge, Sättigung, ähnlichste Farbtemperatur optional: skotopische Leuchtdichte L' (cd/m²)

¹ Siehe Darstellung der spektralen Empfindlichkeiten.

² Kennwert nach DIN5032 mit Wichtung durch Normlichtart A.

³ Kennwert nach DIN5032 ohne Wichtung durch Normlichtart A.

⁴ Die Position des Glasfilters kann für Messungen im nahen infraroten Bereich und für den Betrieb eines Spektrometervorsatzes eingesetzt werden.



Spezifikation Leuchtdichte- und Farbmesskamera LMK 98-3 Color

Messfeldwinkel ⁵	variabel wählbar			
Objektive	Alle Objektive mit fester Brennweite			
Feste Entfernung	telezentrisches Makroobjektiv			
Fokussierbar	Objektive mit den Brennweiten: 8mm, 25mm, 50mm, 100mm			
Messbereichswahl	Brennweiten: 25mm, 50mm			
Smearkorrektur	Über die Veränderung der Integrationszeit: 100µs..15s			
Moduliertes Licht	Korrektur des Einflusses von Smear für Integrationszeiten < 1 ms			
	Bei bekannter Modulationsfrequenz des Lichtes werden die Integrationszeiten automatisch zu Vielfachen der Periodendauer gewählt.			
Messbereiche (Messbereichsendwerte)	abhängig vom Objektiv z.B.: 0.1 ... 10 000 cd/m ²			
	>300 000 000 cd/m ² über Graufilter			
Messzeit	Abhängig von der gewählten maximalen Integrationszeit und den Objektivdaten.			
Leuchtdichtemessung	Einzelmessung (SP) / Mehrfachmessung (10Bilder)(MP)			
	Integrationszeit (s)	minimale Leuchtdichte (cd/m ²)	Messzeit (s)	
			SP	MP
	0.1	10	1	7
1	1	2	20	
Farbmessung	HighDyn-Messung			
	Integrationszeit (s)	minimale Leuchtdichte (cd/m ²)	Messzeit (s)	
	0.1	10		20
1	1		30	
räumliche Bewertung ⁶	$f_2 (g) < 0.5 \%$			
Einfluss der Umfeldleuchtdichte	$f_2 (u) < 2 \%^7$			
Linearitätsfehler	$f_3 < 0.2 \%$			
Abgleichfehler	$f_{11} < 0.5 \%$			
Kalibrierunsicherheit ⁸	Objektive mit fester Fokuseinstellung: < 2 % fokussierbare Objektive: < 2.5 %			
Wiederholpräzision ⁹	x,y < 0.0001			
	L < 0.1 %			
Messfehler	3 % (L Normlichtart A)			
	x,y < 0.0020 (Normlichtart A)			
	x,y < 0.0100 (Testfarbsatz) ¹⁰			
	dominante Wellenlänge siehe Grafik			
Gleichförmigkeit	< 2 %			

⁵ Siehe separate Tabelle mit Objektivdaten.

⁶ Alle Messungen der f_x -Kennwerte nach DIN 5032-6.

⁷ Bei einem Flächenverhältnis von 10:1 von leuchtender zu nicht leuchtender Fläche.

⁸ Kalibrierung nach DIN 5032-6 an einem von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt zurückgeführten Leuchtdichtenormal.

⁹ Messung einer stabilisierten weißen LED Lichtquelle mit ($L=100 \text{ cd/m}^2$; $x=0,3553$; $y=0,3521$).

Mittelwert über 1000 Pixel. Wiederholpräzision als Streuung des Mittelwertes. Die Wiederholpräzision beschreibt die Abweichungen bei wiederholten Messungen unter identischen Messbedingungen mit den gleichen Parametern für Aufnahme und Auswertung der Daten.

¹⁰ Gemessen an 30 Proben verschiedenster spektraler Verteilung auf der Basis von ROSCO Filterfolien.





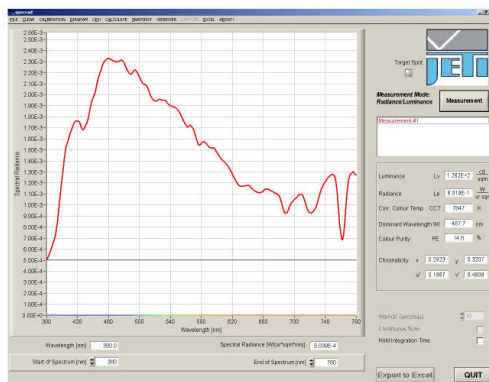
Spectroradiometer specbos 1201

specbos 1201 is a precise and compact VIS spectroradiometer. It can be used in laboratory as well as production environment to measure the following quantities:

- Luminance, Radiance
- Illuminance, Irradiance
- xy and u'v' coordinates
- Dominate wavelength, Color purity
- Correlated Color Temperature
- Color Rendering Index
- Circadian metrics, Photosynthetically Active Radiation



Luminous Intensity and Luminous Flux measuring heads are optional.



Screenshot of the radiometric software (daylight)

The instrument can be operated with the intuitive measuring software JETI LiVal (for a demo version see www.jeti.com). Furthermore it is possible to implement the instrument into individual applications using the virtual COM port directly by the following ways:

- Radiometric DLL
- Radiometric Virtual Instruments for LabView
- Serial commands

Advantages:

- USB powered
- Internal target spot laser (luminance measurement)
- Easy to install
- Start of measurement with external trigger signal (short cut or TTL)

Measuring objects:

- TV, Monitors, LCD-, LED-Displays
- Digital projectors
- Traffic lights, car lights
- Room illumination
- Lamps, LEDs

Specification

Optical parameters	
Spectral range	380 nm ... 780 nm
Optical bandwidth	5 nm
Wavelengths resolution	1 nm
Digital electronic resolution	15 bit ADC
Viewing angle	1.8°
Measuring distance/ diameter	20 cm - Ø 6 mm; 100 cm - Ø 31 mm (luminance)
Measuring values	
	Spectral radiance
	Total luminance / total radiance
	Total illuminance / total irradiance
	Chromaticity coordinates x,y; u',v'
	Correlated Color Temperature, Color purity
	Color Rendering Index
	Circadian metrics, Photosynthetically Active Radiation
Measuring ranges and accuracies	
Measuring range luminance	2 ... 7 x 10 ⁴ cd/m ² (higher values with optional filter)
Measuring range illuminance	20 ... 5 x 10 ⁵ lx
Luminance accuracy	± 2 % (@ 1000cd/ m ² and 2856 K)
Luminance repeatability	± 1 %
Chromaticity accuracy	± 0.002 x, y (@ 2856 K)
Color repeatability	± 0.0005 x, y
CCT repeatability	± 20 K (@ 2856 K)
Wavelength accuracy	± 0.5 nm
Other technical data	
Dispersive element	Imaging grating (flat field)
Light receiving element	Photodiode array 1024 pixel (binned)
Power supply	Hub powered
Interface	USB 2.0 fullspeed
Dimensions	140 mm x 58 mm x 34 mm
Weight	350 g
Operating conditions	Temperature 10 ... 40 °C Humidity < 85 % relative humidity at 35 °C
Accessories (included)	PC software JETI LiVal for Windows 7/8/ XP/Vista DLL, LabVIEW VI's USB cable and trigger connector Cosine diffusor (for irradiance measurement) Calibration certificate, operation instructions Tripod, transport box
Accessories (optional)	Integrating spheres of different diameters, Luminous intensity measurement set up (CIE 127, cond. A and B)
NIST traceable calibration	Recommended interval: one year

JETI Technische Instrumente GmbH
Tatzendpromenade 2
D-07745 Jena

Tel. +49(3641)225 680
Fax. +49(3641)225 681
e-mail: sales @ jeti.com
Internet: www.jeti.com

JETI-0001-0110-en

Anhang D – Fragebogen zur Bewertung von Scheinwerfersystemen

Kunden- und funktionsorientierte Bewertung von Scheinwerfersystemen - Subjektive Wahrnehmung und Störempfinden.

Inhalt der Umfrage:

Welche Scheinwerfersysteme sind Sie bereits bei Nacht gefahren?

Antwortmöglichkeiten: Halogenscheinwerfer, Xenonscheinwerfer, LED-Scheinwerfer, Ich weiß nicht.

Welches Scheinwerfersystem fahren Sie vorwiegend?

Antwortmöglichkeiten: Halogenscheinwerfer, Xenonscheinwerfer, LED-Scheinwerfer, Ich weiß nicht.

Welche Scheinwerfersysteme fanden Sie am besten und warum?

Antwortmöglichkeiten: Halogenscheinwerfer, Xenonscheinwerfer, LED-Scheinwerfer, Ich weiß nicht.

Begründung als Freitext.

Welche der folgenden Lichtfunktionen/Assistenzsysteme kennen Sie (z.B. durch Werbung, Hörensagen)?

Antwortmöglichkeiten: Dynamisches Kurvenlicht (Aktives Mitschwenken der Scheinwerfer in Kurven), Abbiegelicht (Zuschalten eines Scheinwerfers zur Seitenausleuchtung beim Abbiegen und in Kurven), Nebellicht (Anpassung des Abblendlichtes oder Einsatz von Zusatzscheinwerfern), Fernlichtassistent (Automatisches Ein- und Ausschalten des Fernlichts bei Gegenverkehr oder vorausfahrendem Verkehr), Blendfreier Fernlichtassistent (permanentes Fernlicht, das verkehrsbedingt Teile des Lichtkegels ausblendet, um Blendung anderer Verkehrsteilnehmer zu vermeiden), Gezieltes Anleuchten (Anleuchten von Fußgängern auf der Fahrbahn, die mit bloßem Auge schwer zu erkennen sind).

Welche der folgenden Lichtfunktionen/Assistenzsysteme haben Sie bereits selbst ausprobiert oder während einer Testfahrt erlebt?

Antwortmöglichkeiten: Dynamisches Kurvenlicht (Aktives Mitschwenken der Scheinwerfer in

Kurven), Abbiegelicht (Zuschalten eines Scheinwerfers zur Seitenausleuchtung beim Abbiegen und in Kurven), Nebellicht (Anpassung des Abblendlichtes oder Einsatz von Zusatzscheinwerfern), Fernlichtassistent (Automatisches Ein- und Ausschalten des Fernlichts bei Gegenverkehr oder vorausfahrendem Verkehr), Blendfreier Fernlichtassistent (permanentes Fernlicht, das verkehrsbedingt Teile des Lichtkegels ausblendet, um Blendung anderer Verkehrsteilnehmer zu vermeiden), Gezieltes Anleuchten (Anleuchten von Fußgängern auf der Fahrbahn, die mit bloßem Auge schwer zu erkennen sind).

In welchen Fahrsituationen ist Ihnen ein Scheinwerfersystem besonders POSITIV aufgefallen?

Angaben als Freitext.

In welchen Fahrsituationen ist Ihnen ein Scheinwerfersystem besonders NEGATIV aufgefallen?

Angaben als Freitext.

Nutzen Sie Ihre Nebelscheinwerfer regelmäßig?

Antwortmöglichkeiten: Nein, Ja, Mein Fahrzeug hat keine Nebelscheinwerfer.

Falls ja, wann setzen Sie die Scheinwerfer ein?

Antwortmöglichkeiten: Nur bei dichtem Nebel. Schon bei leichtem Nebel. Auch wenn kein Nebel vorhanden ist. Bei Regen. Bei Schnee. Nie.

Welche Auswirkung hat der Einsatz von Nebelscheinwerfern auf die Sichtbedingungen?

Verschlechterung. Geringfügige Verbesserung. Deutliche Verbesserung. Keine Verbesserung.

Haben Sie bereits Fahrsituationen im Nebel oder bei Schneefall erlebt, in denen Sie sich von Ihrem eigenen Scheinwerfer gestört gefühlt haben (z.B. Blendung durch Reflexion an Schneeflocken, Streulicht im Nebel)?

Antwortmöglichkeiten: Nein, Ja.

Begründung im Freitext.

Sie haben auf der vorhergehenden Seite angegeben, dass Sie bereits den Fernlichtassistenten für blendfreies (Dauer-) Fernlicht getestet haben. Wie bewerten Sie den Fernlichtassistenten insgesamt?

Antwortmöglichkeiten: 1 (sehr gut), 2 (gut), 3 (mittelmäßig), 4 (schlecht).

Sind Ihnen bei der Fahrt mit dem Fernlichtassistenten für blendfreies (Dauer-) Fernlicht auch negative Eigenschaften des Systems aufgefallen?

Antwortmöglichkeiten: Eigenblendung durch Reflexion an Verkehrsschildern. Blendung des Gegenverkehrs (aufblenden der entgegenkommenden Fahrzeuge). Unruhe, störende Scheinwerferbewegung. Zu langsame Reaktionszeit des Systems. Andere (Bitte im nachfolgenden Textfeld eintragen).

Begründung im Freitext.

Welche Möglichkeiten/Fahrsituationen sehen Sie, in denen die Fahrsicherheit durch den Einsatz von Scheinwerfern oder Zusatzscheinwerfern noch verbessert werden kann?

Angaben als Freitext.

Anhang E – Bewertung von Streulicht bei Nebel

E.1 Übersicht der Abblendlichtverteilungen im Streulichtbereich

Bitte zur nächsten Seite umblättern.

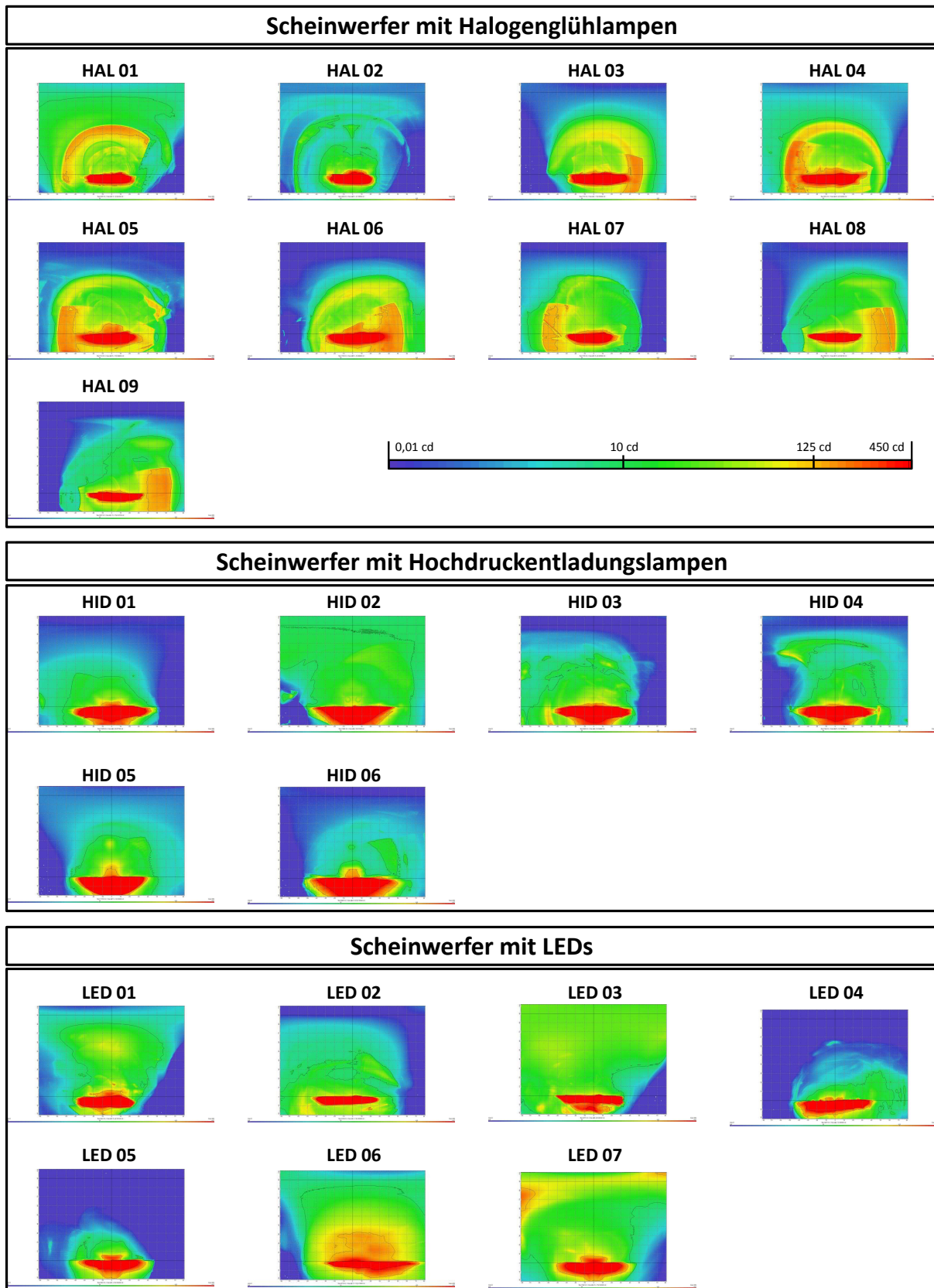


Abbildung E.1: Übersicht über die Lichtverteilungen aus der Messreihe am Goniophotometer (Abblendlicht inkl. Streulichtbereich)

E.2 Probandenstudie zur Untersuchung von Streulicht bei Nebel

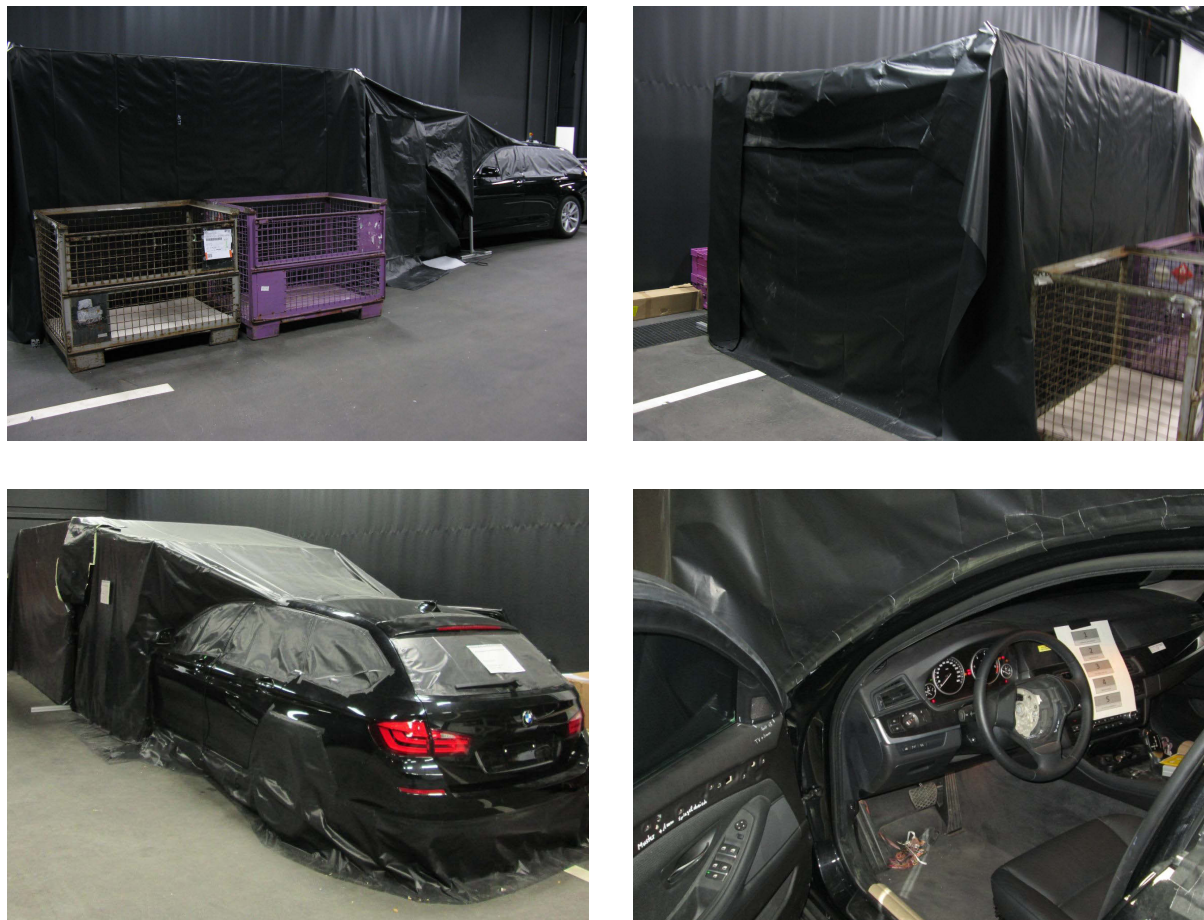


Abbildung E.2: Fotos zum Versuchsaufbau der Probandenstudie zur Untersuchung von Streulicht bei Nebel

Tabelle E.1: Reihenfolge der dargebotenen Streulichtquellen im Versuch

Versuchsteil 1		Versuchsteil 2	
Laufende Nummer	Angesteuerte Streulichtquelle	Laufende Nummer	Angesteuerte Streulichtquelle
1	4a	41	7+8+9
2	7a	42	7
3	8	43	4+5+6
4	9a	44	1
5	6a	45	4
6	1a	46	1+2+3
7	3	47	7
8	2	48	4
9	7	49	1+2+3
10	3a	50	4+5+6
11	4	51	1
12	8	52	7+8+9
13	7a	53	4
14	3a	54	7+8+9
15	9a	55	1
16	7	56	1+2+3
17	6	57	7
18	6a	58	4+5+6
19	3		
20	1a		
21	4a		
22	5		
23	9		
24	2		
25	1		
26	5		
27	9		
28	2		
29	4a		
30	9a		
31	4		
32	8		
33	7		
34	3a		
35	1a		
36	1		
37	6a		
38	3		
39	7a		
40	6		

Ermittlung der zeitlichen Konstanz der Versuchsbedingungen bei der Probandenstudie zur Untersuchung von Streulicht bei Nebel

Die zeitliche Konstanz der Versuchsbedingungen wurde durch die definierte Zuführung von künstlichem Nebel in der Versuchskammer sichergestellt. Die Validierung erfolgte durch Leuchtdichtemessungen einer Referenzlichtverteilung zu verschiedenen Zeitpunkten. Die Leuchtdichtemessungen erfolgten im Minutentakt. Abbildung E.3 zeigt die Messregionen und ausgewählte Leuchtdichteaufnahmen der Referenzlichtverteilung (oben) sowie die Auswertung in Form eines Zeit-Leuchtdichte-Diagramms (unten).

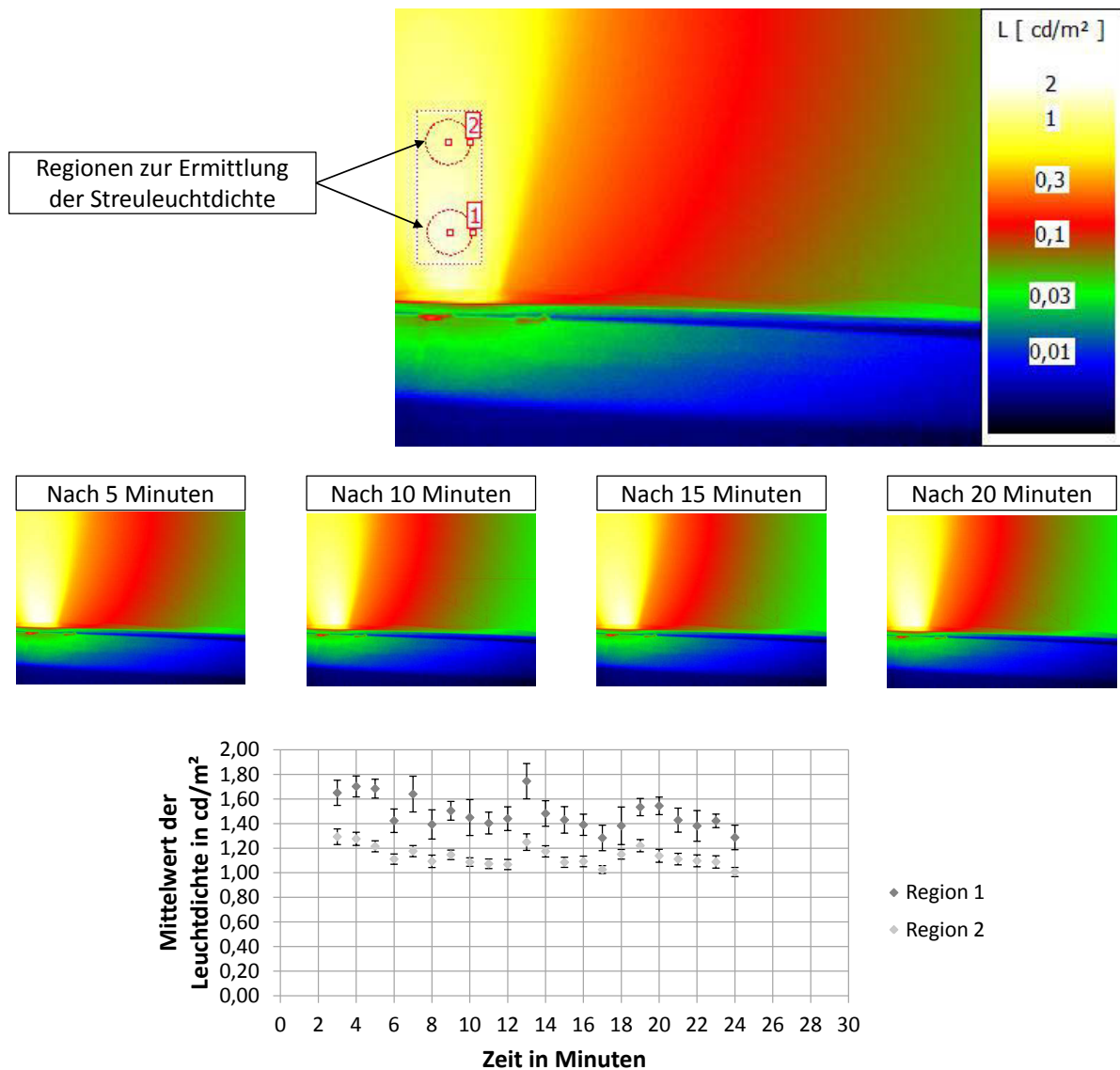


Abbildung E.3: Leuchtdichteaufnahme aus Beifahrersicht in Falschfarbendarstellung und Regionen zur Ermittlung der zeitlichen Konstanz der Streuleuchtdichten. Verlauf der mittleren Leuchtdichte der Messregionen in Abhängigkeit der Zeit

Tabelle E.2: Wertetabelle zur Auswertung der zeitlichen Konstanz im Versuchsaufbau Nebelkammer (vgl. Abb. E.3)

Region	Zeit in Minuten	Mittelwert der Leuchtdichte in cd m^{-2}	Streuung	Leuchtdichte in Prozent (bezogen auf Startwert)
1	3	1,65	0,10	1,00
1	4	1,70	0,09	1,03
1	5	1,68	0,08	1,02
1	6	1,42	0,10	0,86
1	7	1,64	0,15	0,99
1	8	1,39	0,12	0,84
1	9	1,50	0,08	0,91
1	10	1,45	0,15	0,88
1	11	1,40	0,09	0,85
1	12	1,44	0,10	0,87
1	13	1,75	0,14	1,06
1	14	1,48	0,10	0,90
1	15	1,43	0,11	0,87
1	16	1,39	0,09	0,84
1	17	1,28	0,10	0,78
1	18	1,38	0,15	0,84
1	19	1,53	0,07	0,93
1	20	1,54	0,07	0,94
1	21	1,43	0,10	0,87
1	22	1,38	0,13	0,84
1	23	1,42	0,05	0,86
1	24	1,29	0,10	0,78
2	3	1,29	0,06	1,00
2	4	1,28	0,05	0,99
2	5	1,22	0,04	0,94
2	6	1,11	0,04	0,86
2	7	1,18	0,05	0,91
2	8	1,09	0,05	0,85
2	9	1,15	0,04	0,89
2	10	1,09	0,03	0,84
2	11	1,07	0,04	0,83
2	12	1,07	0,04	0,83
2	13	1,25	0,07	0,97
2	14	1,17	0,05	0,91
2	15	1,09	0,04	0,84
2	16	1,09	0,04	0,84
2	17	1,03	0,03	0,79
2	18	1,15	0,04	0,89
2	19	1,22	0,05	0,94
2	20	1,14	0,05	0,88
2	21	1,11	0,05	0,86
2	22	1,10	0,05	0,85
2	23	1,09	0,05	0,84
2	24	1,01	0,04	0,78

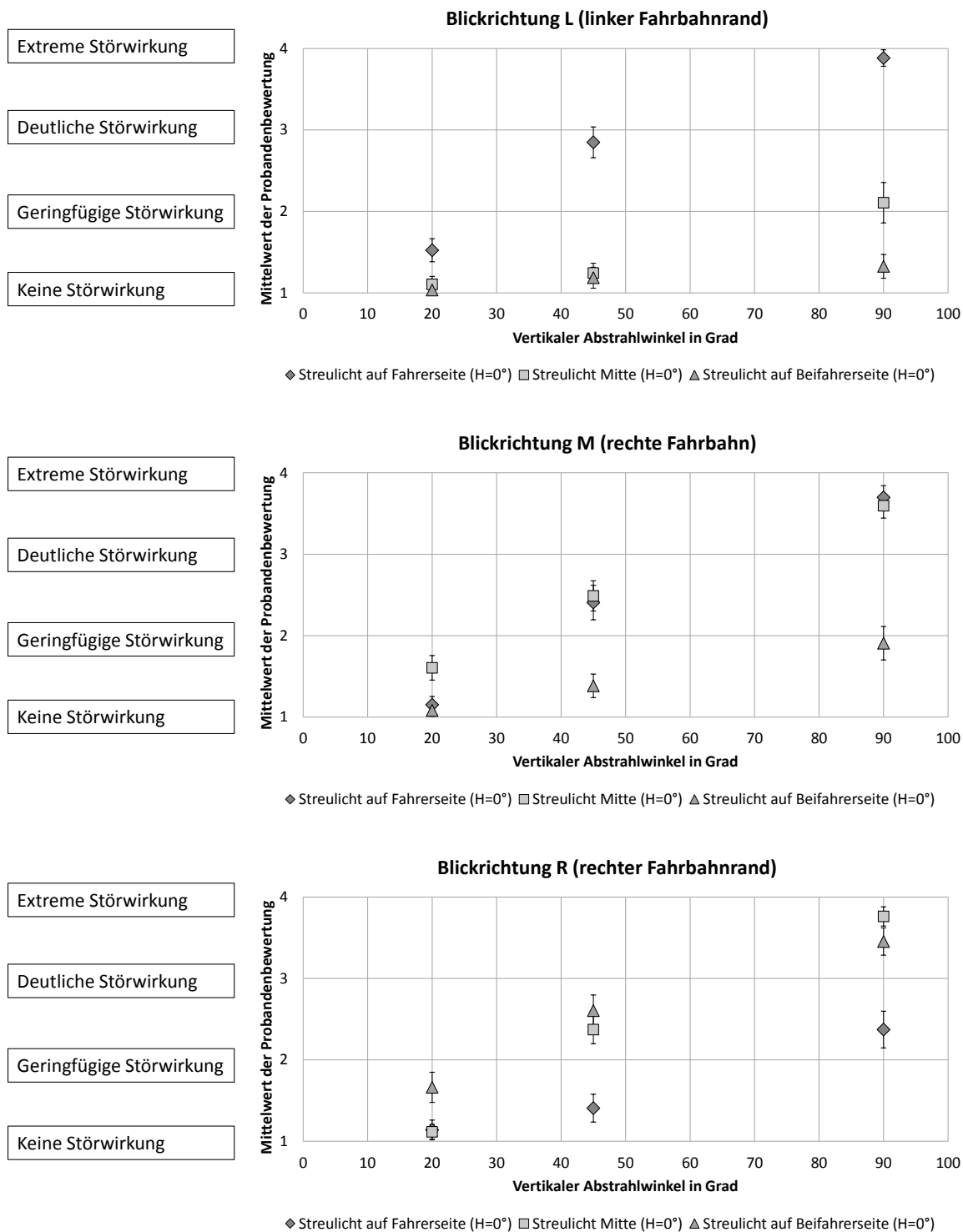


Abbildung E.4: Mittlere Probandenbewertung in Abhängigkeit der vertikalen Abstrahlrichtung für Blickrichtung L, M, R

E.3 Ermittlung der optimalen Rastergröße bei der Messung am Goniometer zur Darstellung im Fahrsimulator

Messbereich: H=-50 bis +50; V=+10 bis +90

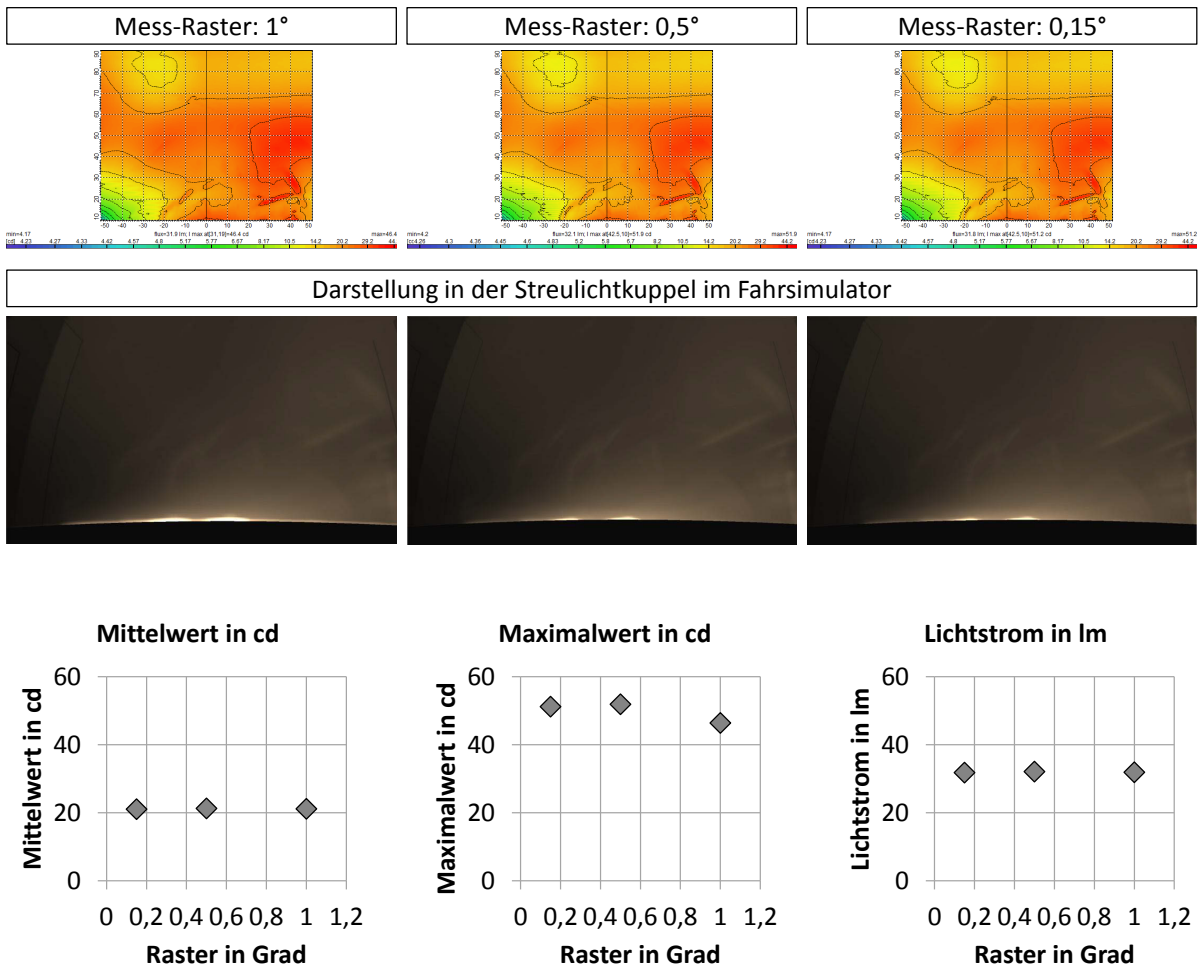


Abbildung E.5: Darstellung der Messung am Goniometer in verschiedenen Mess-Rastern (1° , $0,5^\circ$, $0,15^\circ$) als Lichtstärkeverteilung (oben) und als Darstellung im Fahrsimulator in der Streulichtkuppel (Mitte). Änderung der Kennzahlen Mittelwert, Maximalwert und Lichtstrom in Abhängigkeit des Mess-Rasters (unten).

Anhang F – Bewertung von Streulicht bei Schnee

Bitte zur nächsten Seite umblättern.

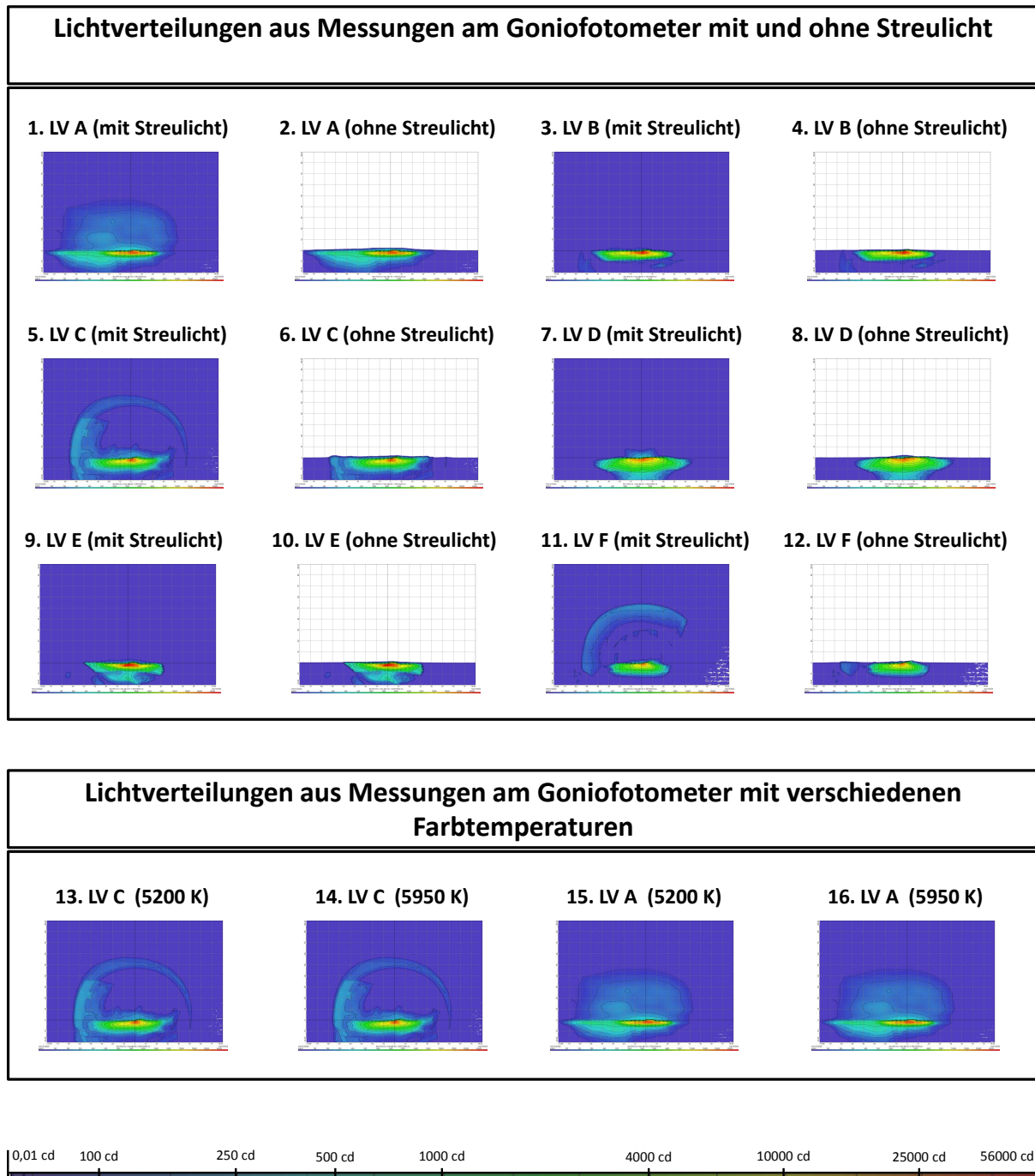


Abbildung F.1: Im Versuch „Streulichtbewertung bei Schnee“ dargestellte Lichtverteilungen - Teil 1

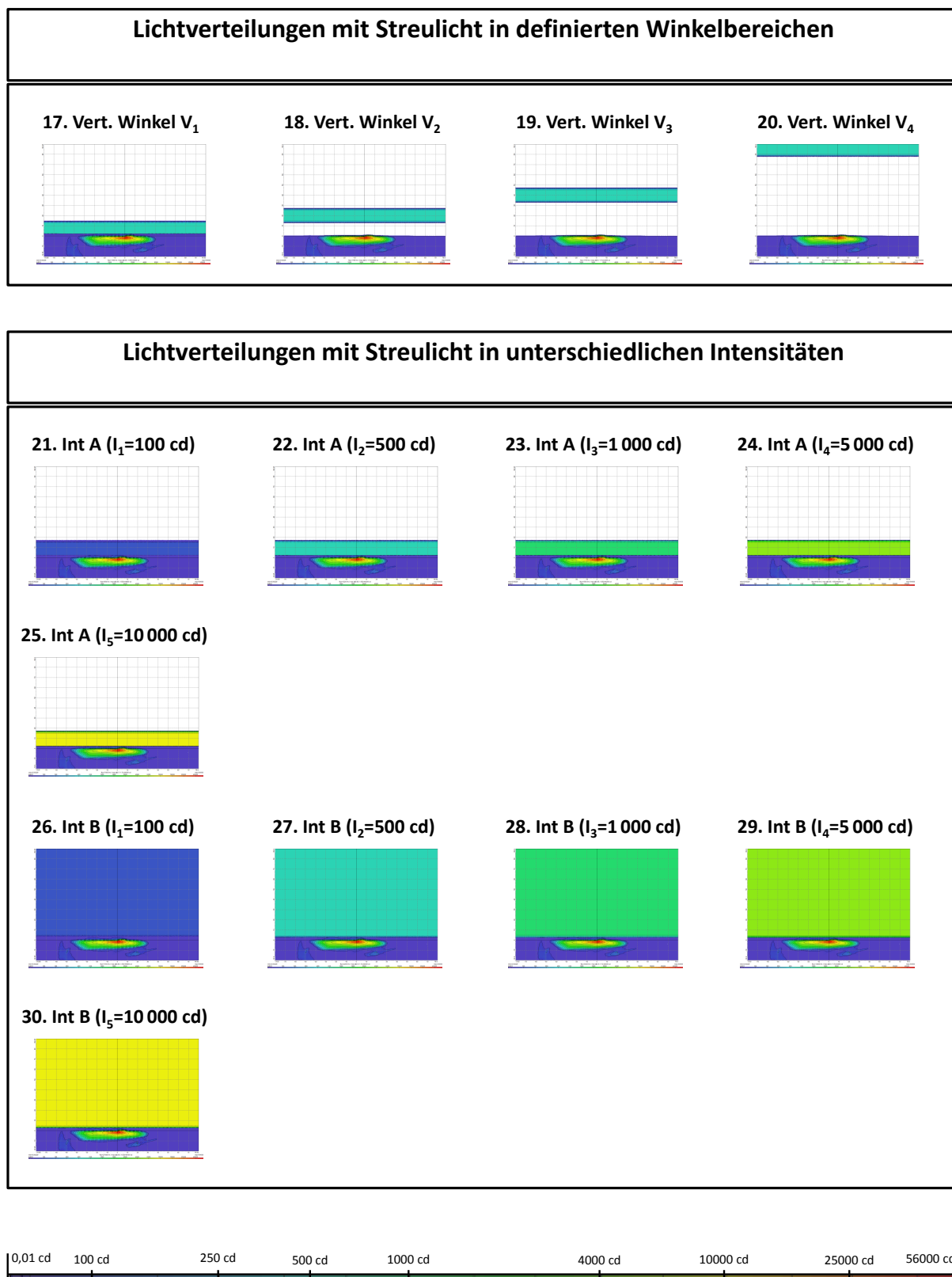


Abbildung F.2: Im Versuch „Streulichtbewertung bei Schnee“ dargestellte Lichtverteilungen - Teil 2

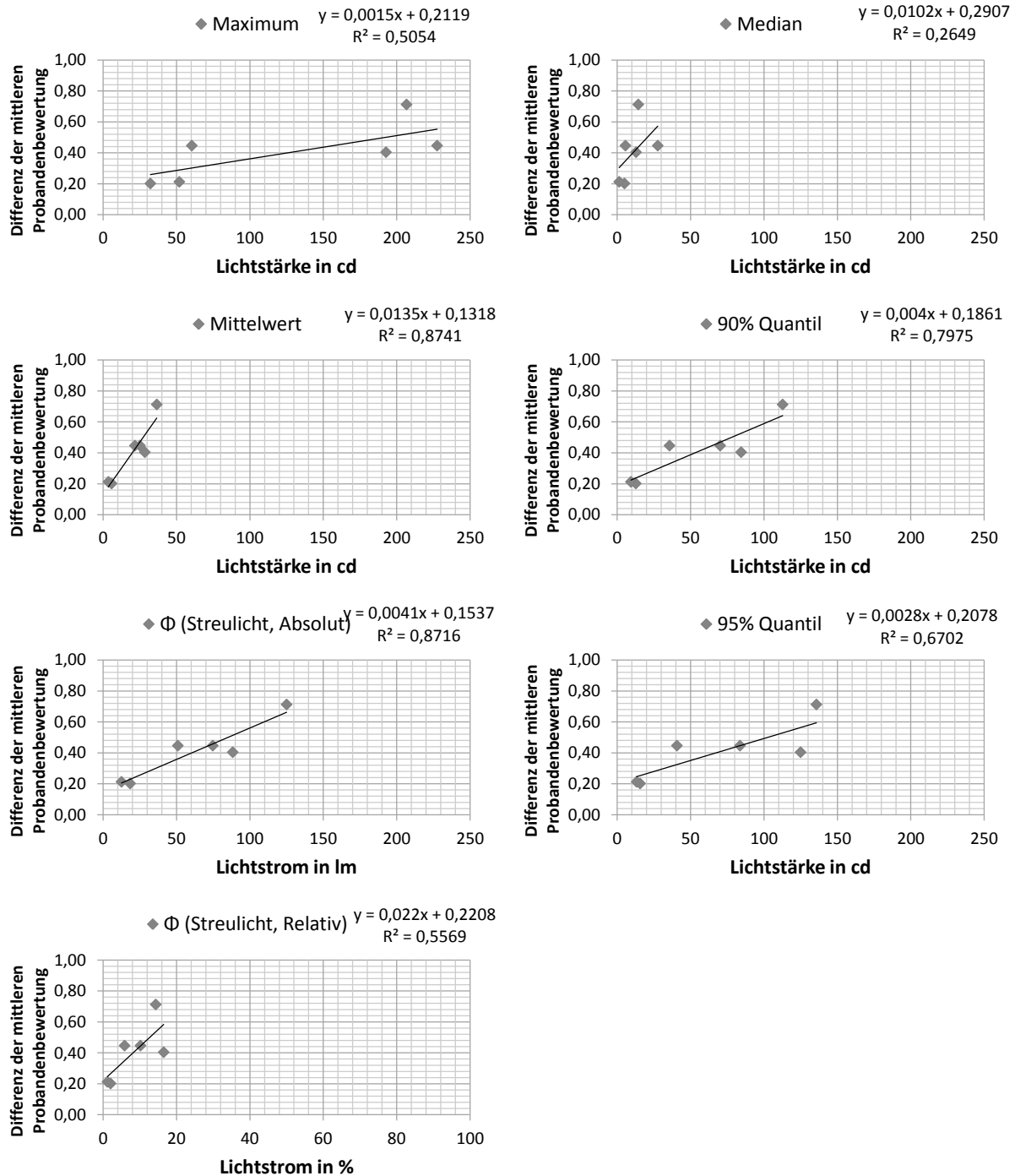


Abbildung F.3: Ergebnis der Korrelationsanalyse zum Versuch Streulichtbewertung bei Schnee

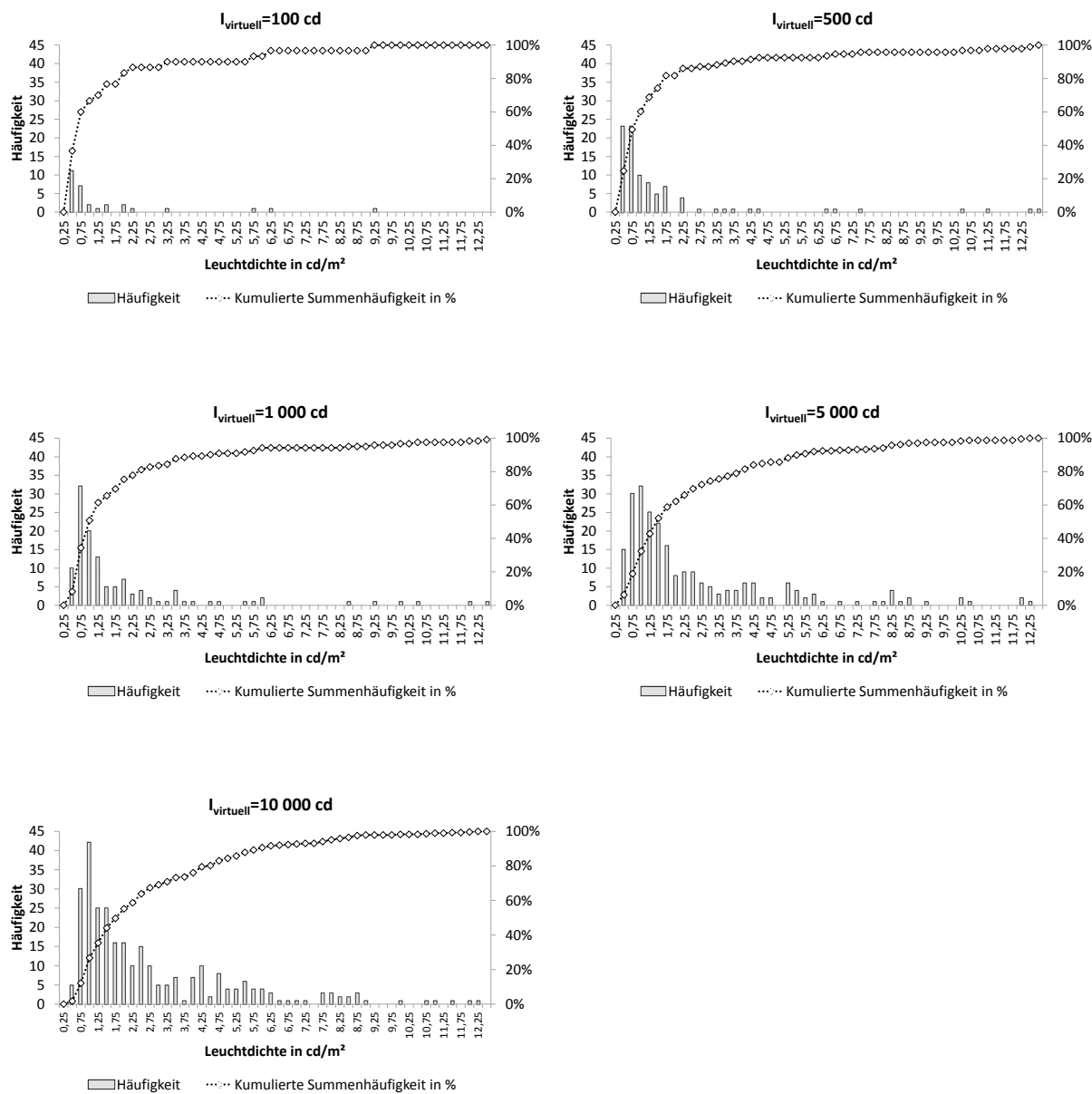


Abbildung F.4: Histogramme der mittleren Leuchtdichte der Schneeflocken von Lichtverteilung „Int A“ in fünf Intensitätsstufen

Anhang G – Bewertung der Eigenblendung durch Retroreflexion

G.1 Leuchtdichte der Verkehrszeichen im Versuch

Tabelle G.1: Leuchtdichte der dargebotenen Verkehrszeichen in der Probandenstudie

Schild #	Stufe #	Teil 1: Weiß	Teil 1: Weiß	Teil 2: Gelb	Teil 2: Gelb
		gemessene Leuchtdichte in cd m^{-2}	korrigierte Leuchtdichte in cd m^{-2}	gemessene Leuchtdichte in cd m^{-2}	korrigierte Leuchtdichte in cd m^{-2}
1	1	43	47	37	35
1	2	79	86	83	80
1	3	128	141	117	113
1	4	185	202	158	153
1	5	256	281	258	249
1	6	353	387	320	309
1	7	573	629	544	526
1	8	1184	1298	1212	1170
2	1	44	49	35	34
2	2	81	89	80	77
2	3	132	145	113	109
2	4	190	208	152	146
2	5	255	279	247	239
2	6	362	397	308	297
2	7	586	643	525	507
2	8	1205	1321	1168	1128
3	1	54	59	44	43
3	2	100	110	100	97
3	3	163	178	142	137
3	4	234	257	192	185
3	5	333	365	313	302

Fortsetzung auf der nächsten Seite ...

Schild #	Stufe #	Teil 1: Weiß	Teil 1: Weiß	Teil 2: Gelb	Teil 2: Gelb
		gemessene Leuchtdichte in cd m^{-2}	korrigierte Leuchtdichte in cd m^{-2}	gemessene Leuchtdichte in cd m^{-2}	korrigierte Leuchtdichte in cd m^{-2}
3	6	442	484	388	375
3	7	717	786	662	639
3	8	1527	1675	1480	1429
4	1	54	59	42	41
4	2	100	109	95	92
4	3	162	177	135	130
4	4	233	255	182	176
4	5	332	364	297	287
4	6	440	483	369	356
4	7	714	783	628	607
4	8	1515	1661	1415	1367
5	1	40	44	31	30
5	2	73	80	68	66
5	3	117	129	96	93
5	4	168	184	129	125
5	5	241	264	210	203
5	6	317	347	260	252
5	7	513	563	442	426
5	8	1086	1191	997	963
6	1	49	51	45	47
6	2	120	126	105	109
6	3	191	200	148	154
6	4	273	286	199	207
6	5	389	408	322	335
6	6	516	540	397	413
6	7	820	858	665	692
6	8	1705	1784	1392	1449
7	1	55	57	47	49
7	2	134	141	108	112
7	3	214	224	152	159
7	4	305	319	205	213
7	5	439	460	331	345
7	6	577	603	409	425
7	7	915	957	683	712

Fortsetzung auf der nächsten Seite ...

Schild #	Stufe #	Teil 1: Weiß		Teil 2: Gelb	
		gemessene Leuchtdichte in cd m^{-2}	korrigierte Leuchtdichte in cd m^{-2}	gemessene Leuchtdichte in cd m^{-2}	korrigierte Leuchtdichte in cd m^{-2}
7	8	1905	1994	1430	1488
8	1	62	68	48	47
8	2	115	126	109	105
8	3	187	205	155	150
8	4	269	295	210	202
8	5	384	421	342	330
8	6	511	560	425	411
8	7	827	906	720	696
8	8	1745	1913	1598	1543
9	1	61	66	44	42
9	2	112	123	99	96
9	3	182	200	141	136
9	4	263	288	190	184
9	5	374	410	311	300
9	6	497	545	386	373
9	7	804	881	657	634
9	8	1696	1860	1463	1413

G.2 Leuchtdichte - Probandenbewertung - Diagramme

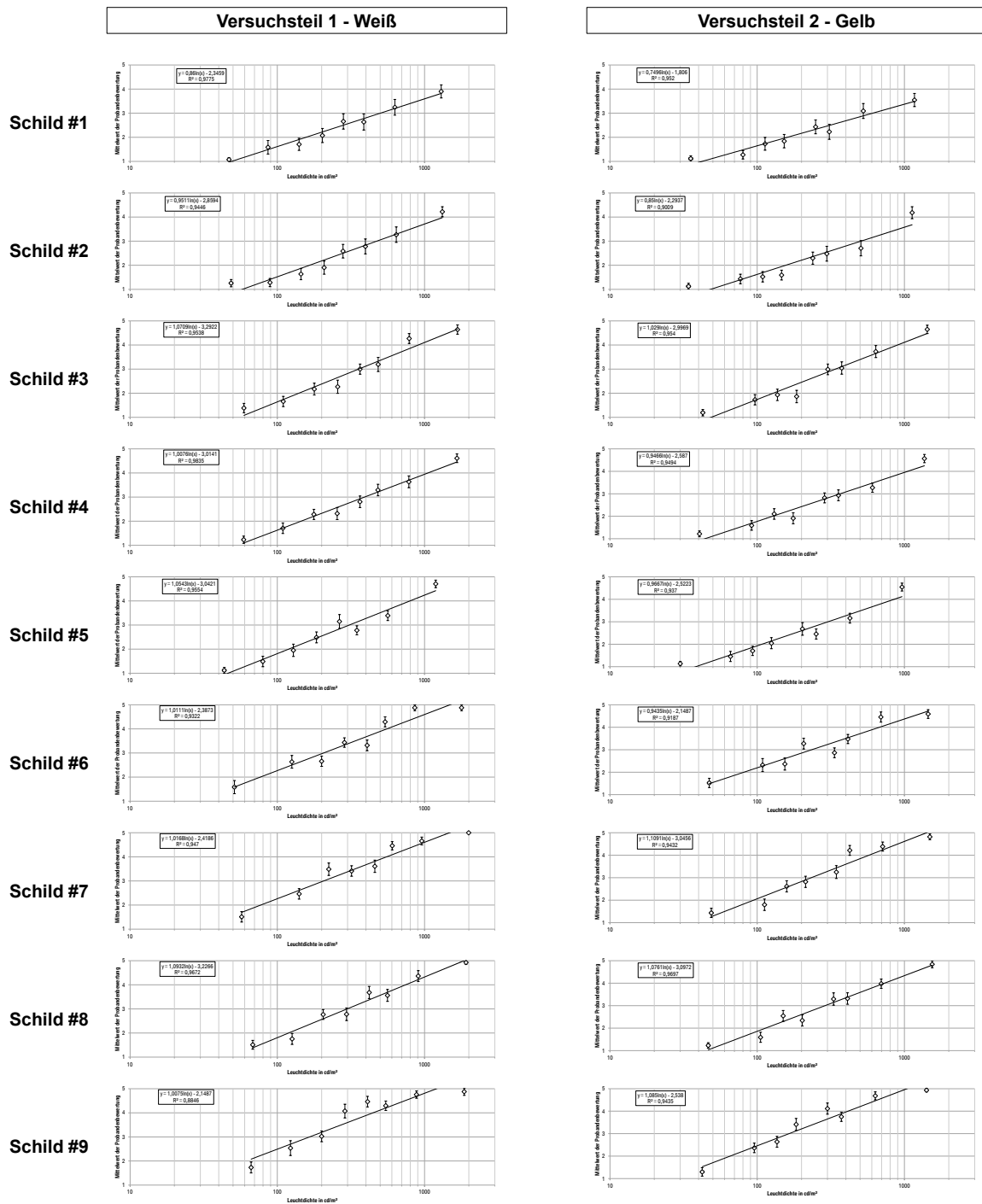


Abbildung G.1: Leuchtdichte - Probandenbewertung - Diagramme beim Versuch „Eigenblendung durch Schilder“

G.3 Schwellenleuchtdichte für Verkehrszeichen unterschiedlicher Größe

Tabelle G.2: Schwellenleuchtdichte für Verkehrszeichen unterschiedlicher Größe

Schild #	Teil 1: Weiß Schwellen- leuchtdichte (B = 3) in cd m^{-2}	Teil 1: Weiß Schwellen- leuchtdichte (B = 4) in cd m^{-2}	Teil 2: Gelb Schwellen- leuchtdichte (B = 3) in cd m^{-2}	Teil 2: Gelb Schwellen- leuchtdichte (B = 4) in cd m^{-2}
1	501	1602	609	2310
2	474	1356	507	1644
3	356	907	340	898
4	391	1055	366	1052
5	308	796	303	852
6	206	554	234	676
7	206	552	233	574
8	298	743	289	731
9	166	447	165	414

Tabelle G.3: Abweichungen der Schwellenleuchtdichte für Verkehrszeichen mit weißer und gelber Farbe

Schild #	Differenz der Schwellen- leuchtdichten (B = 3) in cd m^{-2}	Differenz der Schwellen- leuchtdichten (B = 4) in cd m^{-2}	Abweichung der Schwellen- leuchtdichten (B = 3) in %	Abweichung der Schwellen- leuchtdichten (B = 4) in %
1	108	708	21,5	44,2
2	33	288	7,0	21,2
3	-17	-9	-4,7	-1,0
4	-25	-3	-6,5	-0,3
5	-6	56	-1,8	7,0
6	28	123	13,8	22,1
7	27	22	12,9	4,0
8	-9	-11	-2,9	-1,5
9	-1	-33	-0,6	-7,4

Tabelle G.4: Werte für die Berechnung der Grenzbeleuchtungsstärke $E_{Bl,3}$ und $E_{Bl,4}$

#	x	α	β_1	$R_{A,int}$	$L_{Bl,3}$	$L_{Bl,4}$	$E_{Bl,3}$	$E_{Bl,4}$
1	246,4	0,12	0,40	806,1	501	1602	0,62	1,99
2	172,5	0,17	0,58	686,2	474	1356	0,69	1,98
3	115,0	0,26	0,87	526,1	356	907	0,68	1,72
4	86,3	0,36	1,17	288,4	391	1055	1,36	3,66
5	62,7	0,51	1,63	229,5	308	796	1,34	3,47
6	38,3	0,89	2,72	79,4	206	554	2,60	6,98
7	31,4	1,13	3,36	30,0	206	552	6,88	18,39

Legende zu Tabelle G.4:

#: Schild Nummer

x: Beobachtungsentfernung in m

 α : Beobachtungswinkel in ° β_1 : Anstrahlwinkel in ° $R_{A,int}$: RA interpoliert in $\text{cd m}^{-2} \text{lx}^{-1}$ $L_{Bl,3}$: Schwellenleuchtdichte L (B=3) in cd m^{-2} $L_{Bl,4}$: Schwellenleuchtdichte L (B=4) in cd m^{-2} $E_{Bl,3}$: Grenz-Beleuchtungsstärke am Schild E (B=3) in lx $E_{Bl,4}$: Grenz-Beleuchtungsstärke am Schild E (B=4) in lx

G.4 Datenblatt Reflexmaterial 3M

Bitte zur nächsten Seite umblättern.



3M™ Diamond Grade™ DG³ Reflexfolie

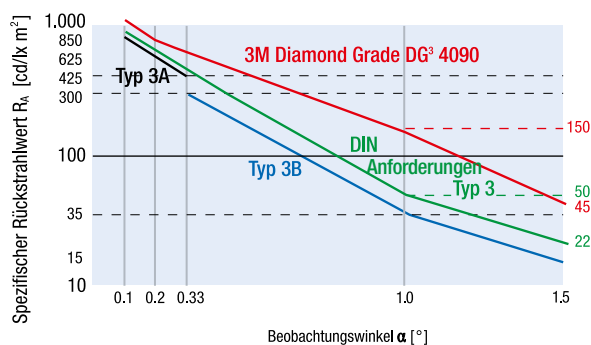
Durch veränderte Rahmenbedingungen im Straßenverkehr sind Risikopotenziale gewachsen und die Anforderungen an die Straßenausstattung gestiegen. Als zukunftsorientiertes Unternehmen engagiert sich 3M mit einer neuen Folie vom Typ 3 (in Zukunft: Aufbau C, RA 3; siehe Informationen auf Seite 4) konsequent für innovative Lösungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit.

DIN 67520 Teil 4 – eine Herausforderung

3M hat die Grenzen der 60 Jahre alten Glaskugel-Technologie schon früh erkannt und die Entwicklung mikroprismatischer Folien vorangetrieben. Eine besonders anspruchsvolle Aufgabe lag dabei in der DIN 67520 Teil 4: Bei der Entstehung dieser Norm für retroreflektierende Folien mit Mikroprismen hatten die Experten eine Reflexfolie für die Anforderungen von nahen und weit entfernten Verkehrszeichen im Blick. Da sich dies mit den damaligen Technologien in einem Produkt nicht realisieren ließ, wurden bislang zwei Folien mit unterschiedlichen Eigenschaften eingesetzt: Der Typ A für weite Distanzen, der zum Beispiel auf den lang gestreckten Fernstraßen in den USA verwendet wird, und der Typ B für kürzere Distanzen, wie sie in Europa verwendet werden, und zwar sowohl außerorts als auch innerorts.

Das Bessere ist der Feind des Guten – die Innovation von 3M

Der Kompromiss der Differenzierung zwischen Nah- und Fernwirkung gehört nun endlich der Vergangenheit an: Mit 3M Diamond Grade DG³ Reflexfolie vom Typ 3 hat 3M eine übergreifende Lösung für beide Anforderungen entwickelt: Diese neue Folie verknüpft die Eigenschaften vom Typ A und Typ B und übertrifft die damaligen Anforderungen an die Leuchtdichte bei Weitem. Diese 3M Innovation erfüllt erstmals alle Anforderungen der DIN 67520 Teil 4 – und das mit nur einer Folie!



Die Evolution
in der
Mikroprismentechnologie