

**Carsten Funke**

**Blendungsbewertung von LED-Leuchten in Innenräumen**

# **Schriften der Ilmenauer Lichttechnik**

Herausgegeben von  
Prof. Dr. Christoph Schierz,  
Fachgebiet Lichttechnik  
an der Technischen Universität Ilmenau.

## **Band 21**

Diese Reihe setzt ab dem Band 20 die „*Publikationsreihe des  
Fachgebietes Lichttechnik in Ilmenau*“ fort.

# Blendungsbewertung von LED-Leuchten in Innenräumen

Carsten Funke



Universitätsverlag Ilmenau

2017

# Impressum

## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 29. August 2016  
1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. sc. nat. habil. Christoph Schierz  
(Technische Universität Ilmenau)  
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Stephan Völker  
(Technische Universität Berlin)  
3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Paul W. Schmits  
(HAWK Hochschule  
Hildesheim/Holzminden/Göttingen)  
Tag der Verteidigung: 24. April 2017

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

**Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

readbox unipress

in der readbox publishing GmbH

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://unipress.readbox.net>

**ISSN** 2513-1656

**ISBN** 978-3-86360-163-8 (Druckausgabe)

**URN** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017000219

---

# Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Blendungsbewertung von künstlicher Beleuchtung in Innenräumen. Die Gültigkeit der vorhandenen Blendungsbewertungsmodelle wird für strukturierte LED-Leuchten überprüft und mögliche Erweiterungen der Modelle werden diskutiert. Zur Überprüfung wurden vier Forschungshypothesen formuliert sowie daraus eine Probandenstudie konzipiert, durchgeführt und ausgewertet. Schließlich werden aus den Studienergebnissen Empfehlungen zur Blendungsbewertung und -begrenzung abgeleitet.

Vor Beginn der Studienkonzeption konnte in einer Literaturrecherche festgestellt werden, dass die psychologische Blendung in Innenräumen neben den bekannten technischen Parametern – der mittleren Leuchtdichte der Blendquelle, dem Raumwinkel der Blendquelle, der Position der Blendquelle relativ zur Blicklinie des Beobachters und der mittleren Leuchtdichte des Hintergrunds – zusätzlich von der Leuchtdichtestruktur der Blendquelle und physiologisch-psychologischen Merkmalen des Beobachters, wie Augenfarbe, Alter und allgemeiner Blendempfindlichkeit, beeinflusst wird. Der Farbort der Blendquelle spielt bei weißem Licht in Innenräumen eine untergeordnete Rolle.

Deshalb wurde die Studie so ausgelegt, den Einfluss der Leuchtdichtestruktur der Blendquelle auf die psychologische Blendung unter möglichst realistischen Versuchsbedingungen zu untersuchen. Dabei wurden die bekannten lichttechnisch-geometrischen Parameter auf vielfältige Weise über einen großen, relevanten Bereich variiert. Die Forschungshypothesen der Studie lauten:

1. Die von einer Leuchte ausgehende Blendung steigt mit zunehmendem Leuchtdichtekontrast innerhalb der Leuchte bei gleicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte.
2. Der in Forschungshypothese 1 postulierte Zusammenhang ist bei direktem Blick in die Blendquelle maximal und nimmt mit zunehmendem Blendwinkel ab.
3. Bei gleicher mittlerer Leuchtdichte und gleichem Kontrast weisen Leuchten mit großem Lichtquellenabstand mehr Blendung auf.
4. Der gesamte wahrgenommene Blendwert mehrerer LED-Punkte einer Leuchte ist größer als die Summe der wahrgenommenen Einzelblendwerte der LEDs.

Mit der Probandenstudie können die erste und zweite Forschungshypothese verifiziert werden, wohingegen die dritte und vierte Forschungshypothese für die untersuchten Parameter nicht bestätigt werden können. Sowohl der Lichtquellenabstand innerhalb der Leuchte als auch die Verteilung der Lichtquellenpunkte innerhalb der Leuchte konnte für neun bis 121 LEDs bei verschiedenen Leuchtdichtekontrasten und Blendwinkeln als irrelevant für die psychologische Blendung identifiziert werden.

Diese Erkenntnisse wurden darüber hinaus dazu verwendet, zwei verbesserte Blendungsbewertungsmodelle für LED-Leuchten zu entwickeln. Das erste Modell, das korrigierte UGR-Verfahren, basiert auf den Korrekturfaktoren nach HARA. Hierfür konnte die bereits bestehende Datenbasis von drei weiteren Wissenschaftlern erheblich erweitert werden. Außerdem wurde ein verbessertes empirisches Modell zur Bestimmung der Korrekturfaktoren entwickelt. Sowohl das ursprüngliche Modell nach HARA als auch das verbesserte empirische Modell sind zur Blendungsbewertung von LED-Leuchten während der Leuchtenentwicklung, der Lichtplanung von Innenräumen und eingeschränkt der Messung von bestehenden Installationen geeignet.

Das zweite Modell, das erweiterte UGR-Verfahren, basiert auf den Untersuchungen von WOLF zur Detektion der leuchtenden Bereiche für Leuchtstofflampenleuchten. Dieses Verfahren wurde im Rahmen der Arbeit für LED-Leuchten erweitert, indem das Leuchtdichtebild entsprechend der physiologischen Eigenschaften des Auges geglättet wird und im Anschluss die blendenden Bereiche detektiert werden.

Abschließend werden Schlussfolgerungen für die Anwendung der Ergebnisse gegeben. Diese Empfehlungen für Leuchtenentwickler und Lichtplaner sollen dazu beitragen, die gesammelten Erfahrungen der Blendungsstudien auch in der Praxis korrekt anzuwenden. Dadurch kann die Lichtqualität bei Einsatz von LED-Leuchten verbessert und gleichzeitig eine hohe Lichtausbeute und Gestaltungsfreiheit beibehalten werden.





## Abstract

This thesis deals with discomfort glare rating of artificial lights in indoor environments. It tests the validity of existing discomfort glare rating models for non-uniform LED luminaires and discusses possible extensions of the models. For that test, this work poses four research hypotheses and hence describes the concept, realization and results of a psychometric study. Finally, it gives practical guidance for discomfort glare evaluation and glare reduction.

In an initial literature overview it becomes obvious that discomfort glare is not only influenced by the acknowledged technical parameters – namely the average luminance of the glare source, the solid angle of the glare source, the position of the glare source relative to the viewing direction of the observer and the average background luminance – but also by the luminous structure of the glare source and physiological-psychological characters of the observer, such as the eye pigmentation, the age and individual glare sensibility. The chromaticity of the glare sources has only a small impact on discomfort glare for white light in indoor environments.

Therefore the study was designed to analyze the influence of the luminous structure of the glare sources on discomfort glare under realistic test conditions. During the test, the geometric and lighting parameters were varied in manifold ways over a wide, relevant range. The research hypotheses of the study are the following:

1. The perceived glare of a luminaire increases with rising luminance contrast inside the luminaire at equal average glare source luminance.
2. The relation, postulated in research hypothesis 1, reaches its maximum at direct view into the glare source and declines with increasing glare angle.
3. At equal average glare source luminance and equal contrast, luminaires with large distance of the luminous elements are more glaring.
4. The resulting perceived glare rating of several LED spots inside a luminaire is greater than the sum of the single glare ratings of the LEDs.

As a result of the psychometric study, the first and second hypothesis can be verified, whereas the third and the fourth hypothesis can be disproved. The distance of LEDs inside the luminaire and the distribution of LEDs inside the luminaire have no impact on discomfort glare for nine, 49 and 121 LEDs at different luminance contrasts and glare angles.

Based on these findings two improved glare evaluation methods for LED luminaires have been developed. The first model, the corrected UGR procedure, is based on the correction factor according to HARA. For that model, the existing data of three glare studies could be extended significantly with this study. Furthermore a new improved empirical model for the determination of the correction factor was developed. The original model as well as the improved model are suitable for glare evaluation of LED luminaires during luminaire development, lighting design in indoor environments and measurement of existing lighting installations.

The second model, the extended UGR procedure, is based on the research of WOLF on the detection of the luminous parts of fluorescent lamp luminaires. That model is extended for LED luminaires by smoothing the luminance pic-

ture according to physiological characters of the eye and subsequently detecting the glaring areas.

Finally this thesis gives conclusions for the application of the results. These recommendations for luminaire developers and lighting designers shall help to correctly transfer the collected experiences of the glare studies in practice. As a result, the lighting quality of LED luminaire applications can be improved while keeping high luminous efficacy and design freedom.



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. sc. nat. habil. Christoph Schierz für die fachliche Betreuung und kritische Durchsicht der Arbeit, die zahllosen Anregungen und wissenschaftlichen Diskussionen sowie für die Möglichkeit, bei ihm am Fachgebiet zu arbeiten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Stephan Völker danke ich herzlich für die Impulse, über den Tellerrand der Innenbeleuchtung hinaus zu schauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Paul W. Schmits danke ich besonders für die zahlreichen Anregungen zum Versuchsdesign und Diskussionen hinsichtlich der psychophysischen Grundlagen der Blendung.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen und Masteranden vom Fachgebiet Lichttechnik für ihre Unterstützung bedanken. Besonderer Dank gilt hierbei Frau Dr.-Ing. Cornelia Vandahl und Herrn Dr.-Ing. Stefan Wolf für ihre Hilfe bei Vorbereitung und Auswertung der Probandenversuche sowie die kritische Durchsicht der Arbeit. Den Herren Dipl.-Ing. Rainer Nolte, Dipl.-Ing. Ingo Herzog, Dr.-Ing. Guido Kramer, M. Sc. Stephan Meier, M. Sc. Christoph Hupe, M. Sc. Michael Deter und Matthias Menz möchte ich für Ihre Unterstützung beim Aufbau und der lichttechnischen Vermessung des Untersuchungsraums danken. Für die Unterstützung bei den Probandenversuchen

danke ich Frau M. Sc. Ulla Hartwig, Frau M. Sc. Carolin Horst, Herrn M. Sc. Stefan Haag, Herrn M. Sc. Johannes Michl und Herrn B. Sc. Benjamin Stolle.

Dank gilt weiterhin Herrn Dipl.-Ing. (FH) Horst Varga und der Firma Osram Opto Semiconductors GmbH für die kostenfreie Bestückung der LED-Platinen sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Husar und Herrn Dipl.-Ing. András Katai für die kostenfreie Bereitstellung des Eyetrackers. Herrn Dr.-Ing. Markus Görres und der Firma ERCO GmbH danke ich für die Unterstützung der Probandenversuche im Rahmen einer Forschungs Kooperation.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh danke ich sehr für die wertvollen Hinweise zur systematischen Aufarbeitung des Forschungsstands.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Gall, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Franz Schmidt, Herrn Dipl.-Ing. Peter Dehoff und Herrn Dipl.-Ing. Matthias Fassian stellvertretend für das Expertenforum Innenbeleuchtung sowie besonders Herrn Dipl.-Ing. Tobias Porsch danke ich und Anregungen zur praktischen Anwendung der Ergebnisse dieser Arbeit.

Schließlich danke ich mich herzlich bei meinen Eltern und meiner Frau Mareike für Ihre Unterstützung und das Korrekturlesen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>xix</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen und Einheiten .....</b>	<b>xxi</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>xxv</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>xxxiii</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Einordnung des Themas .....	1
1.2 Aufgabenstellung.....	1
1.3 Aufbau der Arbeit.....	2
<b>2 Stand des Wissens.....</b>	<b>3</b>
2.1 Begriffsdefinitionen .....	3
2.2 Physiologische Grundlagen der Blendung.....	6
2.2.1 Physiologische Blendung.....	6
2.2.2 Psychologische Blendung .....	7
2.3 Bewertung der physiologischen Blendung.....	13
2.4 Bewertungsverfahren der psychologischen Blendung.....	14
2.4.1 Entwicklung der Bewertungsverfahren der psychologischen Direktblendung.....	14
2.4.2 Das VCP-Verfahren.....	15
2.4.3 Das UGR-Verfahren .....	16
2.4.4 Vergleich zwischen UGR und VCP .....	18
2.5 Bekannte Untersuchungen zur Erweiterung des UGR- Verfahrens.....	21
2.6 Vorschläge zur Erweiterung des UGR-Verfahrens .....	23
2.7 Zwischenfazit.....	27

<b>3</b>	<b>Methodik .....</b>	<b>29</b>
3.1	Präzisierung der Aufgabenstellung und Hypothesen .....	29
3.2	Untersuchungskonzept.....	30
3.2.1	Parametervariation.....	30
3.2.2	Untersuchungsmethode.....	32
3.3	Untersuchungsaufbau.....	36
3.3.1	Anforderungen an den Untersuchungsaufbau.....	36
3.3.2	Realisierung der Blendquelle .....	39
3.3.3	Aufbau des Untersuchungsraums.....	44
3.4	Lichttechnische Vermessung des Untersuchungsraums .....	48
3.5	Untersuchungsablauf.....	52
3.6	Unsicherheitsbetrachtung .....	53
3.7	Probanden.....	58
3.8	Voruntersuchungen zur Blendempfindlichkeit .....	59
3.9	Zwischenfazit .....	68
<b>4</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>69</b>
4.1	Einfluss der Leuchtdichtestruktur von LED-Leuchten auf die Blendung .....	69
4.1.1	Einfluss des LED-Abstands innerhalb der Blendquelle.....	69
4.1.2	Additivität von LED-Punkten .....	71
4.1.3	Einfluss der unmittelbaren Umgebung.....	73
4.1.4	Einfluss des Kontrasts .....	74
4.2	Vergleich der Probandenurteile mit berechneten UGR-Werten.....	76
4.2.1	Bestimmung der UGR-Werte .....	76
4.2.2	Einfluss des Blendwinkels und der Hintergrundleuchtdichte auf die Blendung.....	79
4.2.3	Vergleich der gemessenen UGR-Werte bei unterschiedlichen Auflösungen.....	81



4.3	Berechnung von Korrekturfaktoren nach HARA.....	82
4.3.1	Berechnung der Korrekturfaktoren.....	82
4.3.2	Bestimmung der Einflussgrößen auf die Korrekturfaktoren.....	83
4.3.3	Bestimmung eines Gesamtkorrekturfaktors.....	87
4.4	Vergleich der Probandenurteile mit berechneten UGR-Werten nach WOLF.....	88
4.4.1	Berechnung der UGR-Werte nach WOLF.....	88
4.4.2	Erweiterung des Algorithmus für LED-Leuchten.....	90
<b>5</b>	<b>Schlussdiskussion .....</b>	<b>95</b>
5.1	Überprüfung der Forschungshypothesen.....	95
5.2	Vergleich der Probandenurteile mit den Ergebnissen der Voruntersuchungen.....	96
5.3	Vergleich der Ergebnisse mit anderen Arbeiten.....	98
5.3.1	Einfluss der Leuchtdichtestruktur.....	98
5.3.2	Korrelation von Probandenurteilen und UGR-Werten.....	100
5.3.3	Korrekturfaktoren nach HARA.....	103
5.3.4	Bestimmung der effektiv leuchtenden Fläche.....	104
5.4	Schlussfolgerungen für die Anwendung der Ergebnisse.....	105
5.4.1	Blendungsbewertung von LED-Leuchten in Innenräumen.....	105
5.4.2	Blendungsbegrenzung bei LED-Leuchten.....	107
5.5	Ausblick.....	108
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>111</b>
	<b>Sonstige verwendete Literatur.....</b>	<b>129</b>
	<b>Im Rahmen der Dissertation entstandene Publikationen.....</b>	<b>137</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>141</b>
A.1	Konfigurationen der Blendquelle.....	141
A.2	Versuchseinweisung der Probanden.....	144

A.3	Diagramme zum Einfluss des LED-Abstands innerhalb der Blendquelle.....	146
A.4	Diagramme zur Additivität von LED-Punkten .....	155
A.5	Diagramme zum Einfluss der unmittelbaren Umgebung.....	167
A.6	Diagramme zum Einfluss des Kontrasts .....	173
A.7	Diagramme zur Gruppierung der Korrekturfaktoren nach HARA.....	179

# Abkürzungsverzeichnis

BCD	Between comfort and discomfort
CCD	Charge-coupled Device
CCT	Correlated Colour Temperature, Ähnlichste Farbtemperatur
CGI	CIE Glare Index
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage, Internationale Beleuchtungskommission
DALI	Digital Addressable Lighting Interface
DGR	Discomfort Glare Rating
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
I-DT	Dispersion-Threshold-Identification
I-VT	Velocity-Threshold-Identification
IDMT	Institut für digitale Medientechnologie
LITG	Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V.
LED	Licht emittierende Diode, Light emitting diode
LMK	Leuchtdichtemesskamera
LVK	Lichtstärkeverteilungskurve
KLT	Konzentrations-Leistungs-Test
MW	Mittelwert
PWM	Pulsweitenmodulation
TI	Threshold Increment, Schwellenwerterhöhung
TU	Technische Universität
UGR	Unified Glare Rating
VCP	Visual Comfort Probability



## Verzeichnis der Formelzeichen und Einheiten

Zeichen	Bedeutung	Einheit	Bemerkung
A	Fläche	m <sup>2</sup>	
A <sub>p</sub>	Projizierte Fläche	m <sup>2</sup>	
a	Korrekturfaktor bei TASHIRO		
b	Exponent bei TASHIRO		
C	Leuchtdichtekontrast		
D <sub>M</sub>	Durchmesser der perzeptiven Felder	°	
d	Abstand zur Blendquelle	m	
E <sub>glare</sub>	Blendbeleuchtungsstärke am Auge	lx	
F	gemittelte Leuchtdichte aus Raumbegrenzungsflächen und Blendquellen	fL	
G	Blendungsgrad		
I	Intensität / Pupillenlichtstärke	td	auf S. 8
	Lichtstärke	cd	ab S. 12
I <sub>glare</sub>	Blendlichtstärke	cd	
i	Iterationsvariable in den Blendungsformeln		
j	Iterationsvariable in den Blendungsformeln		
k	Korrekturfaktor nach HARA		

$L_0$	Leuchtdichte in footLambert	fL	$L_0 = 1 \text{ fL}$
$L_b$	Hintergrundleuchtdichte	$\text{cd}/\text{m}^2$	b: background
$L_d (1/2)$	Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung der LEDs bzw. der dunklen Bereiche der Blendquelle	$\text{cd}/\text{m}^2$	d: dunkel 1: innen 2: außen (vgl. Abb. 3.1)
$L_b$	Leuchtdichte der sichtbaren LEDs bzw. der hellen Bereiche der Blendquelle	$\text{cd}/\text{m}^2$	h: hell
$L_{ij}$	Leuchtdichte (pixelweise)	$\text{cd}/\text{m}^2$	
$L_s$	Leuchtdichte der Blendquelle	$\text{cd}/\text{m}^2$	s: source
$L_{\text{eff}}$	Effektive Leuchtdichte bei TASHIRO et al.	$\text{cd}/\text{m}^2$	
$L_{\text{veil}}$	Äquivalente Schleierleuchtdichte	$\text{cd}/\text{m}^2$	
m	Exponenten der Blendungsstudien		
n	Anzahl der Blendquellen in den Blendungsformeln		
P	Positionsindex		
p	Augenpigmentation		$0 \leq p \leq 1$
$R^2$	Bestimmtheitsmaß (aus Mittelwerten)		$0 \leq R^2 \leq 1$
$R_a$	Farbwiedergabeindex (vgl. [Cie 95a])		$R_a \leq 100$
r	Abstand zw. Beobachter und Blendquelle	m	
U	Uniformity nach HARA		$0 \leq U \leq 1$

$U_0$	Gleichmäßigkeit nach DIN EN 12665		$0 \leq U_0 \leq 1$
$(V_T/V_m)$	Normalisierte Zapfenantwort		$0 \leq (V_T/V_m) \leq 1$
WF	Wichtungsfaktor nach TASHIRO		
x	Unabhängiger Korrelationsparameter (Selbsteinschätzung der Probanden)		
$\alpha_{LED}$	Abstand der LEDs innerhalb der Leuchte aus Beobachtersicht	°	
$\beta$	Parameter der nichtlinearen Regression		
$\vartheta$	Blendwinkel, Exzentrizität	°	$-90^\circ \leq \vartheta \leq 90^\circ$
$\varrho_D, \varrho_W, \varrho_B$	Reflexionsgrade der Decke (D), Wand (W) und des Bodens (B)		$0 \leq \varrho \leq 1$
$\sigma_{Lb}$	Standardabweichung des Mittelwerts der Hintergrundleuchtdichte	cd/m <sup>2</sup>	
$\sigma_m$	Standardabweichung des Mittelwerts der Probandenurteile / der Korrekturfaktoren		
$\phi$	Lichtstrom	lm	
$\varphi$	Umlaufwinkel zur Vertikalen	°	$0 \leq \varphi < 360^\circ$
$\omega_s$	Raumwinkel der Blendquelle	sr	s: source





# Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Definition der Parameter einer LED-Blendquelle.....	5
Abb. 2.2:	Physiologische Blendung und Schleierüberlagerung durch Streuzentren im Auge [SCHie 12].....	6
Abb. 2.3:	Auflösung des Auges abhängig vom Abstand zur Retina [And 91, S. 56].....	8
Abb. 2.4:	Schematische Darstellung der klassischen Flächen-summationsgesetze [STra 03, S. 169].....	8
Abb. 2.5:	Normalisierte Zapfenantwort ( $V_T/V_m$ ) und Intensität ( $I$ ) [Val 83, S. 1542].....	9
Abb. 2.6:	Das System für visuellen Diskomfort und Schmerz [STon 09, S. 115].....	11
Abb. 2.7:	Verhältnis zwischen der UGR- und der VCP-Skala (nach Gl. 2.11).....	20
Abb. 2.8:	Verhältnis zwischen der UGR- und der VCP-Skala [Mis 99, S. 94].....	20
Abb. 2.9:	Vergleich der Korrekturfaktoren von [Har 11; Hig 13; Tas 15] mit der Uniformity [Har 15, S. 28].....	25
Abb. 3.1	Leuchtdichtestrukturen der Blendquelle in vier Serien geordnet.....	31
Abb. 3.2	Skizze der Blendquelle zur Variation der Strukturen – Variante A.....	39
Abb. 3.3	Skizze der Blendquelle zur Variation der Strukturen – Variante B.....	39
Abb. 3.4	3D-Modell der Blendquelle.....	42
Abb. 3.5	Vergrößerter Schnitt durch das 3D-Modell der Leuchte sowie schematische Wassereinspeisung.....	42
Abb. 3.6	Foto der montierten Leuchte ohne Diffusor (Bildbearbeitung: INGO HERZOG).....	43
Abb. 3.7	Foto der Leuchte mit Steuerungselektronik und Anschluss an den Wasserkreislauf [Mei 14, S. 29] (Bildbearbeitung: INGO HERZOG).....	43
Abb. 3.8	Position des Probanden im Untersuchungsraum.....	45
Abb. 3.9	Probandin während Aufgabe 1 (Foto: CHRISTOPH HUPE).....	47
Abb. 3.10	Ambientbeleuchtung aus Sicht des Monitors. (Foto: CHRISTOPH HUPE).....	47
Abb. 3.11	Proband während Aufgabe 7. (Foto: CHRISTOPH HUPE).....	47
Abb. 3.12	Proband während Aufgabe 9. (Foto: CHRISTOPH HUPE).....	47

Abb. 3.13	Messaufbau zur lichttechnischer Vermessung des Untersuchungsraums [Mei 14, S. 31] .....	49
Abb. 3.14	Messregionen zur Leuchtdichte- (grün: 4 und 8) und Farbortmessung (rot: 1, 2, 3, 5, 6 und 7) im Halbraum, ähnlich [Mei 14, S. 43] .....	49
Abb. 3.15	Leuchtdichtebildquerschnitt von Konfiguration 2 .....	50
Abb. 3.16	Leuchtdichtebildquerschnitt aus Konfiguration 41 .....	50
Abb. 3.17	Leuchtdichte bild in Falschfarbendarstellung des Halbraums .....	51
Abb. 3.18	Leuchtdichte bild in Falschfarbendarstellung der Blendquelle.....	51
Abb. 3.19	Schema des Untersuchungsablaufs .....	52
Abb. 3.20	Mittlere Hintergrundleuchtdichten der einzelnen Aufgaben .....	55
Abb. 3.21	Leuchtdichte bildquerschnitt aus Konfiguration 62 .....	57
Abb. 3.22	Verteilung der Augenfarbe der Probanden bei Versuchsreihe 1 .....	60
Abb. 3.23	Verteilung der richtige erkannten Landoltringe der Probanden beim Nyktometertest bei Versuchsreihe 1.....	61
Abb. 3.24	Verteilung der Antworten auf die Frage: „Fühlen Sie sich häufig im Alltag geblendet?“ .....	62
Abb. 3.25	Verteilung der Antworten auf die Frage: „Inwiefern würden Sie sich als blendempfindlich bezeichnen?“ .....	62
Abb. 3.26	Untersuchungsaufbau zur Einstellung der Blendquelle bei direktem Blick in die LED .....	63
Abb. 3.27	Verteilung der eingestellten Lichtströme während des 1. und 2. Untersuchungstermins als Mittelwert aus jeweils drei eingestellten Werten.....	63
Abb. 3.28	Korrelation von eingestelltem LED-Lichtstrom (1. Untersuchungstermin) und Selbsteinschätzung der Blendempfindlichkeit.....	64
Abb. 3.29	Mittlere Pupillengröße aller Probanden bei dunklen (Konfiguration 1-12) und hellen Blendquellenkonfigurationen (Konfiguration 37-71) während Aufgabe 1 .....	66
Abb. 3.30	Mittlere Pupillengröße aller Probanden bei dunklen (Konfiguration 1-12) und hellen Blendquellenkonfigurationen (Konfiguration 37-71) während Aufgabe 5.....	66

Abb. 3.31	Lidschlagrate aller Probanden bei dunklen (Konfiguration 1-12) und hellen Blendquellenkonfigurationen (Konfiguration 37-71) während Aufgabe 1 [Hup 15, S. 45] .....	67
Abb. 3.32	Anteil der mittels I-DT als Fixationen klassifizierten Fixationsblickpunkte bei dunklen (Konfiguration 1-12) und hellen Blendquellenkonfigurationen (Konfiguration 37-71) während Aufgabe 2.....	68
Abb. 4.1	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1, $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ ) .....	70
Abb. 4.2	Korrelation von Probandenurteilen und logarithmierter, mittlerer Blendquellenleuchtdichte bei verschiedenen LED-Abständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1) .....	70
Abb. 4.3	Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 4 und 7 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1).....	71
Abb. 4.4	Korrelation von Probandenurteilen und logarithmierter, mittlerer Blendquellenleuchtdichte (Aufgabe 1).....	72
Abb. 4.5	Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 4 und 7 aus Abb. 3.1 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 5) .....	73
Abb. 4.6	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Größen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 5, $L_h = 400000 \text{ cd/m}^2$ ) .....	74
Abb. 4.7	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte bei direktem Blick in die Leuchte (Aufgabe 5) .....	75
Abb. 4.8	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und mittlerer Blendquellenleuchtdichte bei einem Blendwinkel von $15^\circ$ (Aufgabe 3) .....	75
Abb. 4.9	Vergleich der Probandenurteile (Mittelwerte und Standardfehler) mit den berechneten UGR-Werten bei Aufgabe 1 .....	77
Abb. 4.10	Vergleich der Probandenurteile (Mittelwerte) mit den berechneten UGR-Werten für die erste Versuchsreihe .....	77
Abb. 4.11	Vergleich der Probandenurteile (Mittelwerte) mit den berechneten UGR-Werten für die zweite Versuchsreihe.....	78
Abb. 4.12	Vergleich der Probandenurteile (Mittelwerte) mit den berechneten UGR-Werten.....	78

Abb. 4.13	Vergleich der Ausgleichsgeraden bei Verwendung der Positionsindizes nach [Kim 11].....	81
Abb. 4.14	Vergleich der Ausgleichsgeraden bei reduzierter Messauflösung.....	82
Abb. 4.15	Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Kontraste bei Aufgabe 1 .....	84
Abb. 4.16	Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Kontraste bei Aufgabe 5 .....	84
Abb. 4.17	Vergleich der Korrekturfaktoren mit der Uniformity innerhalb der Leuchte.....	85
Abb. 4.18	Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung bei Aufgabe 1 .....	86
Abb. 4.19	Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung bei Aufgabe 5.....	86
Abb. 4.20	Korrelation zwischen empirischen und dem nach HARA berechneten Korrekturfaktor.....	88
Abb. 4.21	Korrelation zwischen empirischen und dem nach dem Modell aus dieser Arbeit berechneten Korrekturfaktor.....	88
Abb. 4.22	Leuchtdichtebild des Untersuchungsraums mit Fischauge-Objektiv.....	89
Abb. 4.23	Leuchtdichtehistogramm der Konfiguration 35.....	89
Abb. 4.24	Gefiltertes und geglättetes Leuchtdichtehistogramm mit Leuchtdichteschwelle.....	89
Abb. 4.25	Vergleich der Blendurteile mit den UGR-Werten nach WOLF für die reduzierte Messauflösung mit Fischauge-Objektiv.....	90
Abb. 4.26	Schematische Darstellung der Winkel $\vartheta_0$ , $\vartheta_{25\text{mm}}$ und $\vartheta_{\text{eff}}$ bei Zusammensetzung der beiden Leuchtdichtebilder.....	91
Abb. 4.27	Verwendung eines Messbilds mit höherer Auflösung zur Verbesserung der Blendquellenauflösung.....	92
Abb. 4.28	Ausschnitt der Blendquelle im Raumbild.....	92
Abb. 4.29	Schematische Darstellung der Herunterskalierung der Auflösung des Leuchtdichtebilds entsprechend der Auflösung des Auges .....	93
Abb. 4.30	Vergleich der Blendurteile mit den UGR-Werten nach WOLF für die Messauflösung gemäß der Auflösung des Auges und Positionsindizes nach [Kim 11] .....	94

Abb. 5.1	Vergleich der Blendurteile mittleren Pupillengröße von 26 Probanden bei verschiedenen Blendwinkeln und Aufgabenschwierigkeiten .....	96
Abb. 5.2	Mittlere Pupillengröße von 26 Probanden bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte bei Aufgabe 5.....	97
Abb. 5.3	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Linienabständen und verschiedenen Blendwinkeln [Ebl 08, S. 182] .....	100
Abb. A.1	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1-3, $L_h = 8000 \text{ cd/m}^2$ ).....	146
Abb. A.2	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 4-6, $L_h = 8000 \text{ cd/m}^2$ ).....	147
Abb. A.3	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 7-9, $L_h = 8000 \text{ cd/m}^2$ ).....	148
Abb. A.4	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1-3, $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ ).....	149
Abb. A.5	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 4-6, $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ ).....	150
Abb. A.6	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 7-9, $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ ).....	151
Abb. A.7	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1-3, $L_h = 400000 \text{ cd/m}^2$ ) .....	152
Abb. A.8	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 4-6, $L_h = 400000 \text{ cd/m}^2$ ) .....	153
Abb. A.9	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 7-9, $L_h = 400000 \text{ cd/m}^2$ ) .....	154
Abb. A.10	Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 3 und 7 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1-3).....	155

Abb. A.11	Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 3 und 7 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 4-6).....	156
Abb. A.12	Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 3 und 7 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 7-9).....	157
Abb. A.13	Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 4 und 8 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1-3).....	158
Abb. A.14	Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 4 und 8 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 4-6).....	159
Abb. A.15	Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 4 und 8 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 7-9).....	160
Abb. A.16	Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 3 und 6 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1-3).....	161
Abb. A.17	Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 3 und 6 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 4-6).....	162
Abb. A.18	Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 3 und 6 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 7-9).....	163
Abb. A.19	Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 4 und 7 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1-3).....	164
Abb. A.20	Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 4 und 7 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 4-6).....	165
Abb. A.21	Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 4 und 7 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 7-9).....	166
Abb. A.22	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Größen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 1-3, $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ ).....	167
Abb. A.23	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Größen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 4-6, $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ ).....	168

Abb. A.24	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Größen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 7-9, $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ ).....	169
Abb. A.25	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Größen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 1-6, $L_h = 400000 \text{ cd/m}^2$ ).....	170
Abb. A.26	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Größen und Leucht-dichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 1-6, $L_h = 400000 \text{ cd/m}^2$ ).....	171
Abb. A.27	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Größen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 7-9, $L_h = 400000 \text{ cd/m}^2$ ).....	172
Abb. A.28	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte (Aufgabe 1-3) .....	173
Abb. A.29	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte (Aufgabe 4-6) .....	174
Abb. A.30	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte (Aufgabe 7-9) .....	175
Abb. A.31	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte (Aufgabe 1-3) .....	176
Abb. A.32	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte (Aufgabe 4-6) .....	177
Abb. A.33	Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte (Aufgabe 7-9) .....	178
Abb. A.34	Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Kontraste (Aufgabe 1-3).....	179
Abb. A.35	Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Kontraste (Aufgabe 4-6).....	180
Abb. A.36	Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Kontraste (Aufgabe 7-9).....	181
Abb. A.37	Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 1-3) .....	182

Abb. A.38	Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 4-6) .....	183
Abb. A.39	Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 7-9) .....	184



## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Exponenten der Blendungsgleichung [Lit 03, S. 13] .....	15
Tab. 2.2	Zuordnung der Bewertungsskalen nach Söllner und Guth [Lit 03, S. 26] .....	19
Tab. 2.3	Zuordnung Güteklasse, Blendungsgrad sowie VCP und UGR-Wert .....	19
Tab. 3.1	Auflistung der Parameterwerte .....	44
Tab. 3.2	Übersicht der Aufgaben, Blickrichtungen und mittleren Hintergrundleuchtdichten .....	46
Tab. 3.3	Auflistung der mittleren Hintergrundleuchtdichten aller Aufgaben sowie mittlerer Standardfehler im Leuchtdichte- bild, jeweils unter Angabe des Variationsbereichs .....	56
Tab. 4.1	Schema der Mittelwertbildung der Probandenurteile für eine Aufgabe .....	69
Tab. 4.2	Positionsindizes einzelnen Aufgaben in der Studie im Vergleich zu [Luc 49] und [Kim 11] .....	80
Tab. 4.3	Ermittelte Parameter aus der nichtlinearen Regression .....	87
Tab. 5.1	Mindestabschirmwinkel für Lampenleuchtdichten [Lit 03, S. 45] .....	107
Tab. A.1	Konfigurationen der Blendquelle – einzelne LED-Punkte (Teil 1) .....	141
Tab. A.2	Konfigurationen der Blendquelle – einzelne LED-Punkte (Teil 2) .....	142
Tab. A.3	Konfigurationen der Blendquelle – homogene Flächen .....	143



# 1 Einleitung

## 1.1 Einordnung des Themas

Im Zuge der Effizienzsteigerung von Licht emittierenden Dioden (LEDs) ersetzen diese zunehmend die konventionellen Leuchtmittel in allen Beleuchtungsbereichen. In einer 2012 veröffentlichten Studie von McKinsey wird erwartet, dass halbleiterbasierte Lampen, die 2011 noch 9 Prozent des weltweiten Lichtmarktes ausmachten, bereits ab 2020 in zwei Drittel aller neu installierten Leuchten zu finden sein werden [Mck 12, S. 22]. Abgesehen von einem besseren Wirkungsgrad bieten LEDs in der Arbeitsstättenbeleuchtung weitere Vorteile gegenüber Leuchtstofflampen und Kompaktleuchtstofflampen. Dazu zählen eine längere Lebensdauer, volle Dimmfähigkeit und aufgrund der kompakten Bauform vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten.

Neben den beschriebenen Vorteilen weisen LEDs auch Nachteile auf, die aus der kompakten Bauform und den relativ hohen Leuchtdichten resultieren. Um eine ausreichend große Beleuchtungsstärke auf der Nutzeroberfläche zu erhalten, müssen mehrere LEDs pro Leuchte eingesetzt werden. Folglich ergibt sich eine sehr ungleichmäßig leuchtende Fläche mit hohen Leuchtdichtekontrasten zwischen den hellen und den dunklen Flächen innerhalb der Leuchte. Die Ungleichmäßigkeit innerhalb der Leuchte kann man zwar mit Streuscheiben reduzieren, dadurch wird aber die Lichtausbeute und Gestaltungsfreiheit deutlich eingeschränkt. Um diese Parameter im Leuchtendesign und der Lichtplanung größtmöglich ausschöpfen zu können, sind strukturierte LED-Leuchten unabdingbar. Dieser strukturierte Aufbau wird jedoch vor allem bei direktem Blick in die Leuchte als sehr störend empfunden [Tak 07; Van 12; SCHmi 2014]. Inwiefern sich die ungleichmäßig leuchtende Fläche auf die psychologische Blendung auswirkt, ist bis jetzt noch nicht hinreichend geklärt, da die vorhandenen Blendungsbewertungsverfahren im Wesentlichen auf Untersuchungen mit geringen Leuchtdichtekontrasten innerhalb der Leuchte beruhen.

## 1.2 Aufgabenstellung

Demzufolge wird in dieser Arbeit beschrieben, inwiefern Leuchtdichteunterschiede innerhalb der Blendquelle einen Einfluss auf die Blendungsbewertung bei psychologischer Direktblendung haben. Neben der Entwicklung eines geeigneten Bewertungsmodells werden auch Parameter bei der Bestimmung des Blendwerts mit Leuchtdichtemesskameras (LMK) in Betracht gezogen. Der

Fokus der Arbeit liegt in der Innenraumbeleuchtung und der Einfluss von Tageslicht wird vernachlässigt.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Im Kapitel 2 (Stand des Wissens) werden nach der Klärung von wichtigen Begriffen die vorhandenen Bewertungsverfahren der Direktblendung vorgestellt. Ebenso werden neuere Untersuchungen im Hinblick auf LED-Leuchten und Vorschläge zur Erweiterung der Blendungsbewertungsverfahren diskutiert.

Anhand der ermittelten offenen Punkte werden in Kapitel 3 (Methodik) die notwendigen Forschungsschritte zur LED-Blendungsbewertung abgeleitet und die Aufgabenstellung der Arbeit präzisiert. In diesem Kapitel werden ebenfalls der Untersuchungsaufbau inklusive aller verwendeten Geräte präsentiert, der Versuchsablauf geschildert sowie mögliche Unsicherheiten aufgezeigt. Darüber hinaus wird das Probandenkollektiv einschließlich der Voruntersuchungen zum Blickverhalten und zur Blendempfindlichkeit beschrieben.

Im Kapitel 4 (Ergebnisse) werden die Ergebnisse der Probandenversuche für verschiedene Leuchtdichtestrukturen vorgestellt. In diesem Kapitel werden weiterhin die bekannten Bewertungsmodelle und deren Erweiterungen auf die Probandenurteile angewandt. Des Weiteren wird in diesem Kapitel auf die Messauflösung bei der Blendungsbewertung eingegangen.

Im letzten Kapitel (Schlussdiskussion) werden die Ergebnisse mit den Arbeiten anderer Wissenschaftler verglichen und praktische Empfehlungen zur Anwendung der Ergebnisse sowie ein Ausblick auf künftige Forschungsaufgaben gegeben. Zudem wird in diesem Kapitel der Zusammenhang zwischen Voruntersuchungen und den Probandenurteilen diskutiert.

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Begriffsdefinitionen

In der Publikation 20:2003 der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft e.V. (LiTG) wird ein umfassender Überblick über die Ursachen und Wirkungen sowie über die geschichtliche Entwicklung der Blendungsbewertung gegeben [Lit 03, S. 6ff.]. Nachfolgend sollen die wichtigsten Begriffe für das Verständnis dieser Arbeit definiert werden.

#### *Blendung*

In der DIN EN 12464-1:2011 „Beleuchtung von Innenräumen“ wird Blendung definiert als eine „Empfindung, die durch helle Flächen im Gesichtsfeld, wie beleuchtete Oberflächen, Teile von Leuchten, Fenster und/oder Dachoberlichter, hervorgerufen wird. Um Fehler, Ermüdung und Unfälle zu vermeiden, muss Blendung begrenzt werden. Blendung kann entweder als psychologische Blendung oder als physiologische Blendung erfahren werden“ [Nor 11a, S. 14]. Geht die Blendung von Primärstrahlern aus, spricht man von Direktblendung, bei der Reflexion von Primärstrahlern hoher Leuchtdichte auf spiegelnden Oberflächen hingegen von Reflexblendung.

#### *Physiologische Blendung*

Die physiologische Blendung (*disability glare*) ist nach DIN EN 12665:2011 „Blendung, die eine Herabsetzung der Sehfunktionen zur Folge hat, ohne dass damit ein unangenehmes Gefühl verbunden sein muss.“ [Nor 11b, S. 11]

#### *Psychologische Blendung*

Die psychologische Blendung (*discomfort glare*) ist nach DIN EN 12665:2011 „Blendung, bei welcher ein unangenehmes Gefühl hervorgerufen wird, ohne dass damit eine merkbare Herabsetzung des Sehvermögens verbunden sein muss.“ [Nor 11b, S. 11] Neben der psychologischen Blendung im engeren Sinne spielt zunehmend auch die „Überkopf-Blendung“ (*overhead glare*) eine Rolle, bei der sich die Blendquelle über dem Beobachter und außerhalb seines Gesichtsfeldes befindet. In einer ausführlichen Studie zum *overhead glare* untersuchten NGAI und BOYCE [Nga 00; Boy 03] den Einfluss von Leuchtdichte, Größe und Position der Leuchte außerhalb des Gesichtsfeldes. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass „das Phänomen der Überkopf-Blendung lediglich eine Erweiterung der psychologischen Blendung ist und kein gänzlich eigenständiges Phänomen.“ [Nga 00, S. 36. Übers. d. Verf.]

### *Allgemein verwendete Einflussgrößen bei der Blendungsbewertung*

Zu den wichtigsten in der Blendungsbewertung üblichen Begriffen zählen die Größe der Blendquelle, die (mittlere) Leuchtdichte der Blendquelle, die Position der Blendquelle, die (mittlere) Hintergrundleuchtdichte sowie die Blendbeleuchtungsstärke am Auge des Beobachters. Die Größe der Blendquelle wird – meist basierend auf dem geometrischen Rahmen der Leuchte – relativ zum Beobachter in Steradian angegeben [Cie 95b]. Die mittlere Leuchtdichte der Blendquelle wird richtungsabhängig als arithmetisches Mittel der Einzelleuchtdichten über die Größe der Blendquelle bzw. als Quotient von Lichtstärke in Beobachtersrichtung und projizierter Fläche der Leuchte bestimmt [Cie 95b]. Die Position der Blendquelle wird in Bezug zur Blickrichtung des Beobachters als Blendwinkel  $\vartheta$ , ggf. unter zusätzlicher Angabe des Umlaufwinkels  $\varphi$  angegeben. In diesem Zusammenhang spiegelt der Positionsindex P (z. B. nach LUCKIESH und GUTH [Luc 49]) die Gewichtung der Blendung als Funktion der Position ( $\vartheta, \varphi$ ) wider. Als vierte Größe bei Blendungsuntersuchungen wird die mittlere Leuchtdichte des Hintergrunds angegeben, die als arithmetisches Mittel der Einzelleuchtdichten (ohne Blendquellen) über den betrachteten Halbraum bzw. als Quotient von indirekter Beleuchtungsstärke am Auge des Beobachters und  $\pi$  berechnet wird. Somit wird die Blendquelle bei der Bestimmung der Hintergrundleuchtdichte nicht berücksichtigt [Cie 95b]. Deshalb muss die Hintergrundleuchtdichte getrennt von der Adaptationsleuchtdichte, auf die das Auge an der Fovea adaptiert ist, betrachtet werden. Alternativ zur Größe und mittleren Leuchtdichte der Blendquelle wird vor allem in der Straßenbeleuchtung auch die (vertikale) Blendbeleuchtungsstärke am Auge verwendet, um die physiologische Blendung zu beurteilen.

### *Merkmale der Blendquelle bei strukturierten LED-Leuchten*

Da in dieser Arbeit die Blendungsbewertung von strukturierten LED-Leuchten bzw. LED-Matrix-Leuchten untersucht wird, werden an dieser Stelle die wichtigsten verwendeten Begriffe beschrieben (zur Übersicht vgl. Abb. 2.1). Unter LED-Matrix-Leuchten werden in dieser Arbeit LED-Leuchten bezeichnet, bei denen die LEDs in einem kartesischen Koordinatensystem gleichabständig in horizontaler und vertikaler Richtung auf der Leuchte angeordnet sind. Strukturierte LED-Leuchten im Allgemeinen und LED-Matrix-Leuchten im Speziellen weisen immer einen deutlichen (Leuchtdichte-)Kontrast innerhalb der Blendquelle auf. Dieser kann als Verhältnis zwischen maximaler Leuchtdichte der LEDs zur (mittleren) Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung oder über andere Gleichmäßigkeits- und Kontrastdefinitionen beschrieben werden. Hierzu zählen:

- die Gleichmäßigkeit  $U_0$  [Nor 11b], die das Verhältnis von kleinster zu mittlerer Leuchtdichte angibt

- der Weberkontrast
- der Michelsonkontrast
- die Standardabweichung der mittleren Leuchtdichte (= Standardfehler)
- das Verhältnis von Minimalwert zu Maximalwert oder
- das Verhältnis von Mittelwert zu Maximalwert, was der Uniformity U nach HARA [Har 11; Har 15] entspricht

Zusätzlich zum Leuchtdichtekontrast besitzen vor allem LED-Matrix-Leuchten einen Leuchtdichtegradienten, der als örtliche Leuchtdichteänderung, z. B. zwischen LEDs und unmittelbarer Umgebung, definiert ist. Kombiniert man die Leuchtdichtegradienten und -kontraste innerhalb einer Leuchte, lassen sich noch weitere Homogenitätskennzahlen definieren [Völ 06; Die 09]. Die unmittelbare Umgebung besitzt je nach Leuchte unterschiedliche Größen und Farborte. Weiterhin können LED-Leuchten beschrieben werden durch den Farbort, den Abstand, die Größe und die Anzahl der LEDs sowie deren Anordnung in bestimmten Mustern. Die häufigste Bauweise von strukturierten LED-Leuchten stellen LED-Matrixleuchten dar. Es existieren aber auch Leuchten mit linienartigen, komplexen oder unregelmäßigen Mustern.

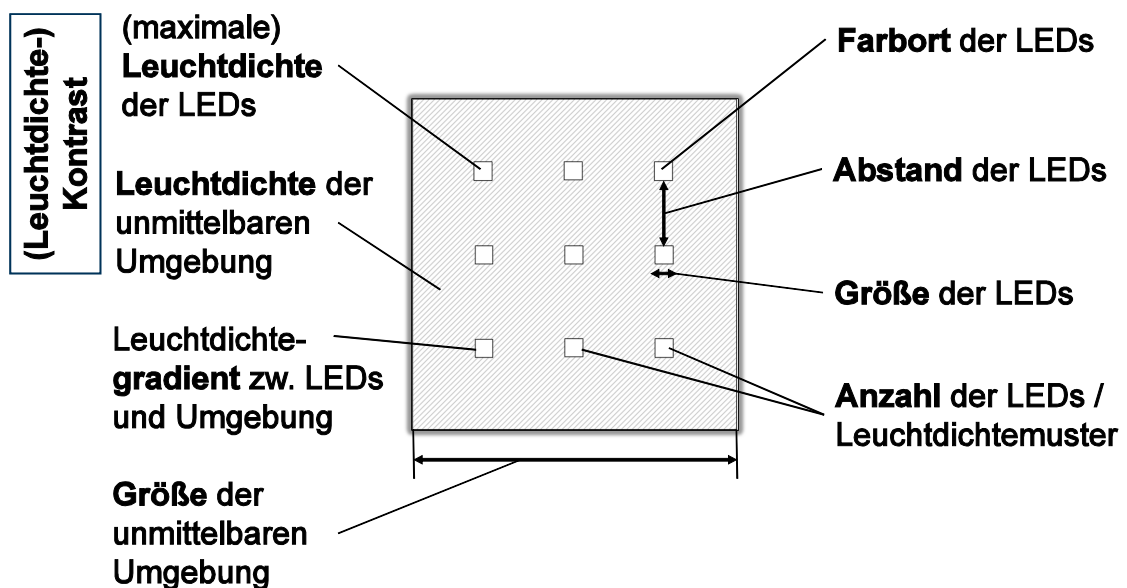


Abb. 2.1 Definition der Parameter einer LED-Blendquelle

## 2.2 Physiologische Grundlagen der Blendung

### 2.2.1 Physiologische Blendung

Blendung entsteht im Allgemeinen durch hohe Leuchtdichtekontraste innerhalb des Gesichtsfelds, wobei die Blendquellen eine ungewünschte Erhellung der Retina verursachen. Beim Aspekt der physiologischen Blendung entsteht diese Erhellung durch Streuung an den Proteinlamellen in der Augenlinse und kolloidal gelösten Makromolekülen im Glaskörper sowie Retroreflexionen an der Retina und der Augenlinse (vgl. Abb. 2.2) [SCHie 12]. Diese Streuzentren verteilen das Licht einer kleinen, hellen Blendquelle und bewirken eine Schleier-Überlagerung des anvisierten Sehobjekts und dessen Umgebung. Folglich wird die quantitative Größe der physiologischen Blendung durch die äquivalente Schleierleuchtdichte bzw. die Blendbeleuchtungsstärke am Auge und den Blendwinkel ausgedrückt (vgl. Kap. 2.3).

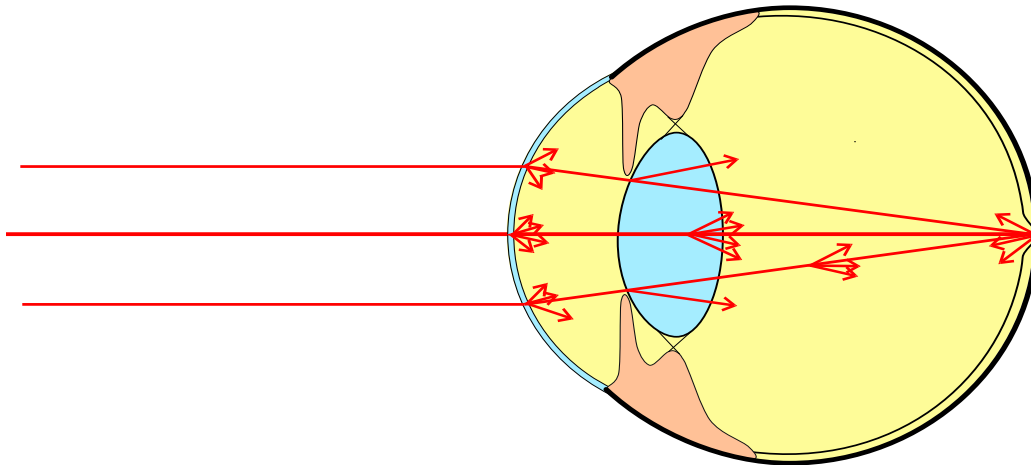


Abb. 2.2 Physiologische Blendung und Schleierüberlagerung durch Streuzentren im Auge [SCHie 12]

Da im Alter die Streuzentren im Auge unter anderem durch die Linsentrübung zunehmen, sind ältere Personen generell blendempfindlicher als jüngere Personen [Cie 02a]. Auch die Augenfarbe spielt eine Rolle bei der Blendempfindlichkeit, da eine dunkle, stark pigmentierte Iris mit niedrigem Transmissionsgrad weniger Licht peripher einfallen lässt als eine helle Iris [Cie 02a]. In zahlreichen Probandenuntersuchungen (u.a. [Luc 25; Hol 26], zur Übersicht [Cie 02a]) konnte man die wesentlichen lichttechnischen und geometrischen Einflüsse auf die physiologische Blendung identifizieren. Neben der Größe und mittleren Leuchtdichte der Blendquelle, ausgedrückt durch die Blendbeleuchtungsstärke am Auge, hat vor allem der Blendwinkel einen Einfluss auf die Blendung. Die bekannten physiologischen und technischen Parameter sind in aktuellen Be-



wertungsmodellen der (fovealen) physiologischen Blendung berücksichtigt (vgl. Kap. 2.3).

## 2.2.2 Psychologische Blendung

Im Gegensatz zur physiologischen Blendung sind die genauen Ursachen der psychologischen Blendung bis heute nicht vollständig geklärt. Psychologische Blendung tritt nach HOWARTH [How 93, S. 41] auf, wenn ein kleiner Teil des Gesichtsfeldes eine spürbar hellere Leuchtdichte als die Umgebungsleuchtdichte, auf die das Auge insgesamt adaptiert ist, aufweist. Dabei wird die wahrgenommene Störung durch zahlreiche individuelle physiologische und psychologische Faktoren beeinflusst. Hierzu zählen die wahrgenommene Helligkeit der Blendquelle, die Augenpigmentierung, das Alter sowie zahlreiche externe Einflüsse wie Tageszeit, Koffeinkonsum, aktuelle Tätigkeit und momentanes Stresslevel.

Ein Parameter stellt die wahrgenommene Helligkeit der Blendquelle [SCHie 07] dar, die unter anderem durch die Auflösung des Auges und die Größe der rezeptiven Felder beeinflusst wird, welche beide abhängig vom Netzhautort sind [STra 03]. Die Auflösung des Auges, ausgedrückt durch den Visus, kann für Normalsichtige entsprechend Abb. 2.3 bestimmt werden [Low 51; And 91; Wat 14].

Die Größe der rezeptiven Felder – bzw. bei psychologischer Blendung nach WESTHEIMER und OEHLER [Wes 65; Wes 67; Oeh 85; STra 03] die Größe der perzeptiven Felder – beeinflusst ebenfalls die Kontrastwahrnehmung. Die perzeptiven Felder bestimmen die Größe, in denen die Flächensumme von Lichtreizen nach den Gesetzen von RICCÒ und PIPER gelten (vgl. Abb. 2.4 und [STra 03, S. 168ff.]). Sie besitzen die gleiche Größe wie die rezeptiven Felder und können, abhängig von der retinalen Exzentrizität  $\vartheta$ , nach Gleichung 2.1 abgeschätzt werden [STra 03, S. 182ff.].

$$D_M = 0,1773 + 0,0342 \cdot \vartheta \quad (2.1)$$

Da das Auge auf optimales Kontrastsehen spezialisiert ist, spielt der Infeld-Umfeld-Antagonismus der rezeptiven Felder ebenfalls eine Rolle bei der Störungswirkung von Lichtquellen. So führen periodische und unnatürliche Muster zu einem größeren visuellen Diskomfort als ineinander übergehende, natürliche Muster [Wil 84; Tua 05]. Dies gilt insbesondere für foveal dargebotene Linien, die jeweils  $0,33^\circ$  voneinander entfernt sind [Fin 84; Wil 84; Wil 15].

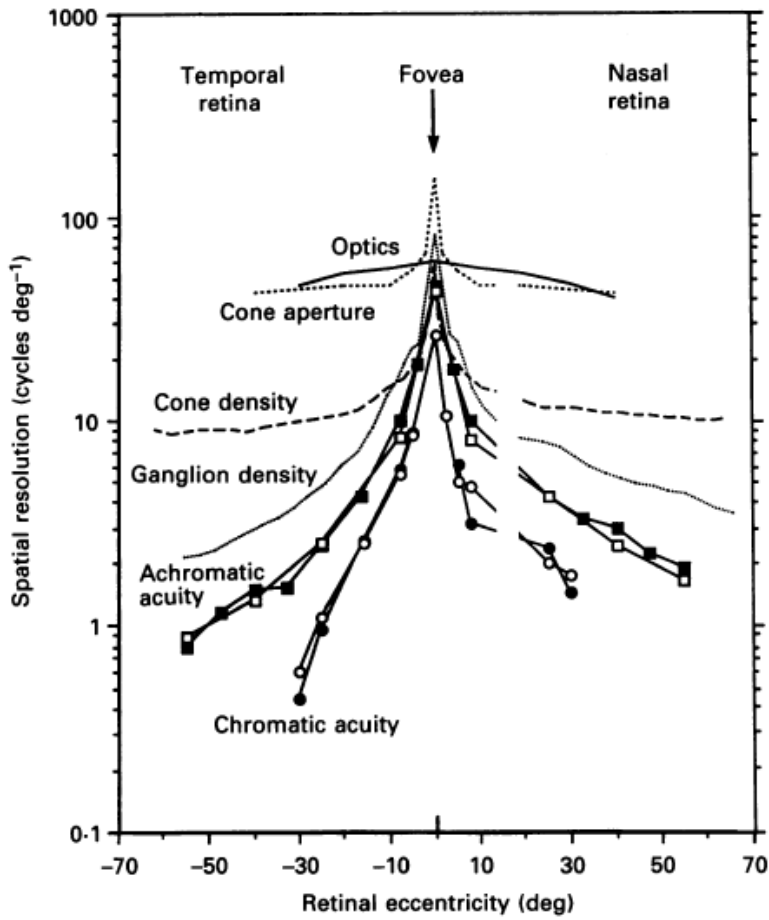


Abb. 2.3 Auflösung des Auges abhängig vom Abstand zur Retina [And 91, S. 56]

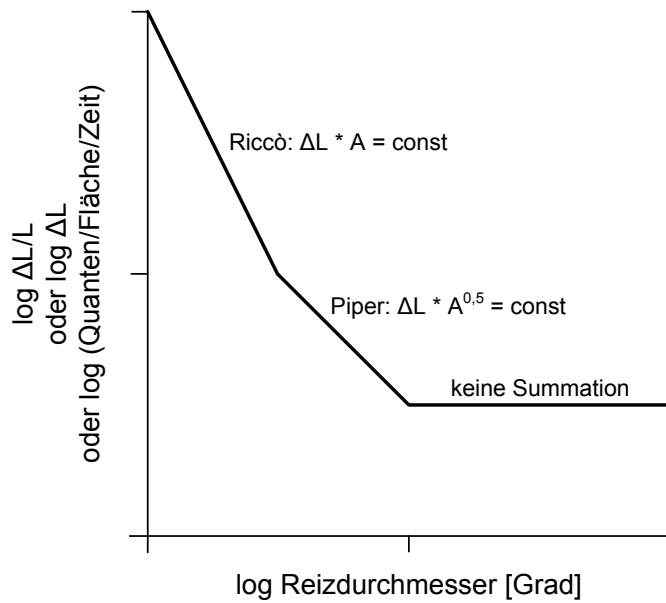


Abb. 2.4 Schematische Darstellung der klassischen Flächensummationsgesetze [STra 03, S. 169]

Neben Netzhautort und Auflösung des Auges hängt die wahrgenommene Helligkeit auch von der tatsächlichen Reizantwort der Zapfen ab. Diese wurde von VALETON anhand des Rhesusaffens bestimmt [Val 83] (vgl. Abb. 2.5).

In Abb. 2.5 wird deutlich, dass bei Dunkeladaptation ( $I = 10^{3,2}$  td) bereits bei etwa  $10^{4,5}$  td (dies entspricht bei 4 mm Pupillendurchmesser rund  $10^5$  cd/m<sup>2</sup>) 90% der Zapfensättigung erreicht ist und damit die maximal wahrnehmbare Leuchtdichte nach oben beschränkt ist.

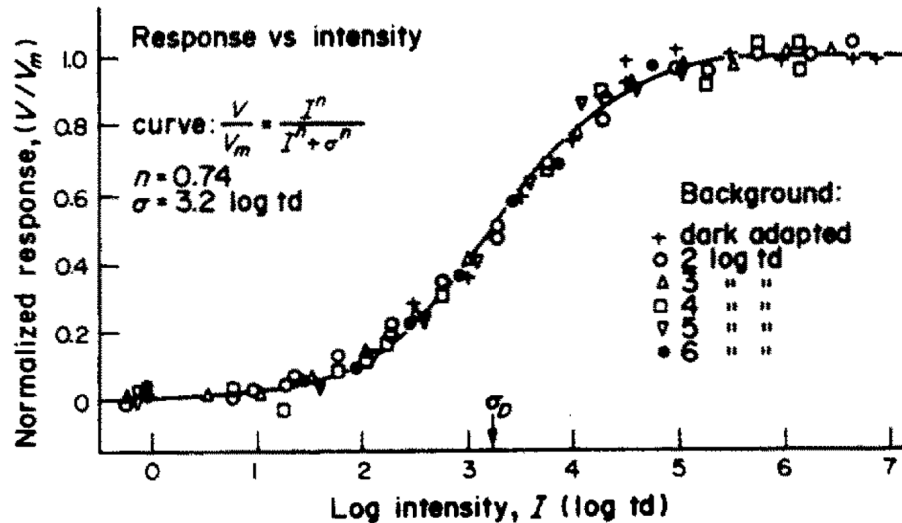


Abb. 2.5 Normalisierte Zapfenantwort ( $V_T/V_m$ ) und Pupillenlichtstärke ( $I$ ) [Val 83, S. 1542]

Ebenso wie bei der physiologischen Blendung beeinflussen die Augenfarbe und das Alter der Menschen die wahrgenommene Störung. Der Einfluss der Augenfarbe wurde u. a. von BENNETT [Ben 77] untersucht, mit dem Ergebnis, dass die Augenpigmentierung sich auf die psychologische Blendung auswirkt. Blauäugige Probanden fühlten sich tendenziell im Mesopischen stärker geblendet als braunäugige Probanden, jedoch konnte in der Studie nur eine geringe Abhängigkeit ( $R^2 = 0,16$ ) festgestellt werden. Da mit zunehmendem Alter u. a. die Anzahl der Streuzentren im Auge ansteigt, liegt die Vermutung nahe, dass auch die psychologische Blendung bei älteren Personen stärker auftritt als bei jüngeren. Diese These wurde von BENNETT [Ben 77] für eine mattierte Glühlampe im mesopischen Bereich und von HARA und HASEGAWA für verschiedene LED-Leuchten im Innenraum [Har 11] bestätigt. HARA und HASEGAWA fanden außerdem heraus, dass der Unterschied zwischen älteren (60-69 Jahre) und jüngeren Probanden (20-29 Jahre) bei steigender Blendung zunimmt. Im Gegensatz dazu stellten WOLSKA und SAWICKI in ihrer Untersuchung mit zwei Lichtsituationen und längerer Lichtexposition eine gegenteilige Tendenz fest [Wol 14]. Die älteren Probanden (51-69 Jahre) fühlten sich weniger gestört als die jüngeren Versuchspersonen (19-34 Jahre). Die unterschiedlichen Studiener-

gebnisse können nicht abschließend erklärt werden, da sich beide Studien stark voneinander unterscheiden. Da die Augenpigmentierung und das Alter sich auf die physiologische und psychologische Blendung auswirken, werden beide Parameter in den Voruntersuchungen zur Blendempfindlichkeit in dieser Arbeit dokumentiert.

Bis zum Ende des 20. Jahrhunderts vermutete man, dass der Diskomfort durch die sich ständig wechselnde Adaptation, bedingt durch die Blendquelle, ausgelöst wird. Dies wurde in diversen Untersuchungen überprüft [Fug 56; Hop 56; Fry 75; How 93, Lin 15], in denen die Größe bzw. Größenänderungen der Pupille (als ein kleiner Teil der Adaptation) mit der Blendempfindung bei verschiedenen Beleuchtungssituationen korreliert wurden. Als Ergebnis wurde festgehalten, dass psychologische Blendung bei flackernden oder blinkenden Blendquellen vermehrt auftritt [Fug 56; Lin 88] und dass diese Empfindung durch Änderungen der Pupillengröße messbar ist [Fug 56; Lin 15]. Bei zeitlich konstanter Blendleuchtdichte hingegen, stellt HOWARTH [How 93, S. 39ff.] fest, dass Größenänderungen der Pupille unabhängig von der empfundenen Blendung sind.

Eine weitere Untersuchung der neurologischen Prozesse der psychologischen Blendung wurde von BERMAN et al. durchgeführt [Ber 94] und von MURRAY et al. fortgeführt [Mur 02]. In diesen Studien wurden die Reaktionen der augenahen Gesichtsmuskeln während verschiedener Blendszenarien mittels Elektromyogramm aufgezeichnet. Als Ergebnis konnte eine signifikante Korrelation von Blendung und (fouriertransformierter) Gesichtsmuskelaktivität festgestellt werden, auch wenn die intra- und interpersonellen Streuungen relativ hoch waren. Aufbauend auf diesen Studien untersuchten LIN et al. [Lin 15] die Augenbewegungen mittels Elektroofokulografie. Sie präsentierten die Blendquelle nur für eine relativ kurze Dauer von 3 s und erhielten eine Korrelation zwischen mittlerer Augapfelgeschwindigkeit und wahrgenommener Blendung. Dieser Zusammenhang war für ältere Probanden stärker ausgeprägt, auch wenn die Streuung bei den älteren Probanden höher war.

Die komplexen Wechselwirkungen der oben beschriebenen Beobachtungen über psychologische Blendung wurden von STONE [Sto 09] mit einem neurologisch-psychologisches Modell zusammengeführt, in welchem das visuelle System als Servosystem betrachtet wird. Die Bestandteile des Servosystems sind dabei ständig bestrebt, die visuelle Leistung, welche nach [Cie 81] eine Funktion aus Sehzeichengröße, Kontrast und Hintergrundleuchtdichte ist, zu verbessern (vgl. Abb. 2.6).

Falls bei diesem Optimierungsprozess „Schwierigkeiten“ auftreten, sodass laut STONE kein „stabiler Optimalzustand“ hergestellt werden kann, aktiviert das

*light control system* die Schmerzempfindung in den Hirnnervenkernen des Drillingnsnervs (*trigeminal nucleus*), welche zusammen mit höheren Hirnregionen die Diskomfort- und Schmerzempfindung organisieren. Dies geschieht beispielsweise, wenn der Leuchtdichtekontrast zwischen Sehzeichen und Hintergrund zu klein ist oder eine Blendquelle eine deutlich höhere Leuchtdichte als der Rest des Raums besitzt (großer Kontrast im Gesichtsfeld). Damit werden auch die Beobachtungen von WILKINS et al. [Wil 84; Wil 15] in diesem Modell berücksichtigt.

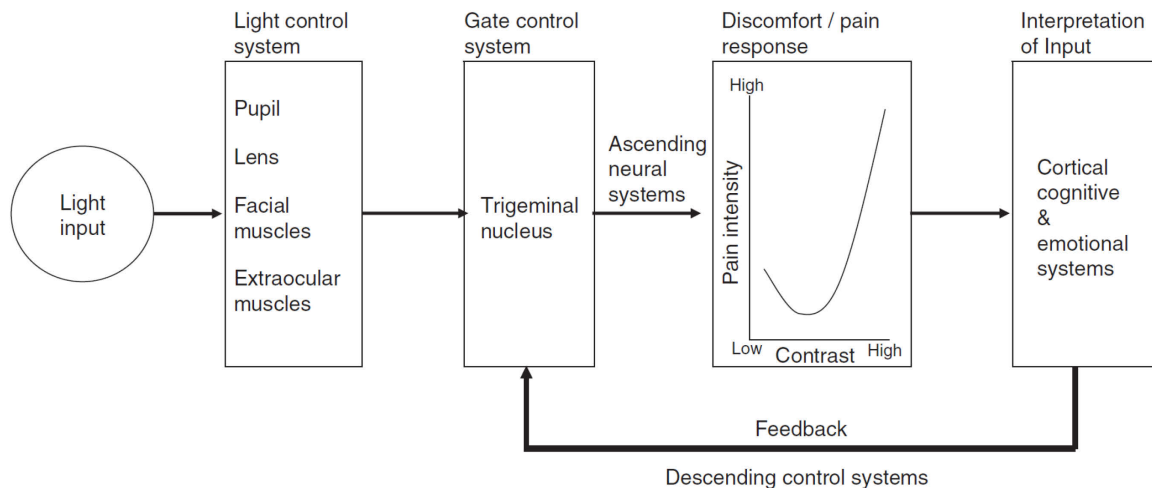


Abb. 2.6 System für visuellen Diskomfort und Schmerz. Das Lichtkontrollsystem (Auge) sendet an die Hirnnervkerne des Drillingnsnervs (*trigeminal nucleus*), die zusammen mit den höheren Hirnzentren die Diskomfort- und Schmerzempfindung organisieren. Die Kurve zeigt einen hypothetischen Zusammenhang zwischen dem Leuchtdichtekontrast und der empfundenen Störung [STon 09, S. 115].

In der Realität ist dieser Prozess der Schmerzempfindung deutlich komplexer als hier beschrieben. So führt STONE an, dass die Informationen zur Schmerzempfindung neben dem eigentlichen Reiz auch aus anderen höheren Hirnzentren stammen. Da die psychologische Blendung (Störung) laut STONE einen gewissen Bezug zur Schmerzempfindung besitzt, konnten verschiedene psychologische Einflüsse auf die Störungsempfindung bereits identifiziert werden. Zu diesen Einflüssen zählen Angst [Öst 75; Ben 77], Erinnerungen (an vorangegangene Experimente) [Pro 08, S. 476] und andere motivationsabhängige und kognitive Faktoren. Als Beispiel argumentiert er, dass bei kritischen Tätigkeiten, die volle Konzentration verlangen, die Schmerzempfindung zumindest zeitweise begrenzt bzw. abgeschaltet wird. Damit wird erklärt, warum psychologische Blendung aufgabenabhängig ist, wie in einigen Studien aufgezeigt wird [Hop 59; Öst 75; Siv 89; Hub 05; Sur 08; SCHmi 14; Sar 15]. SIVAK et al. beo-

bachteten in ihrer Studie, dass während der Durchführung von schwierigen visuellen Aufgaben die Störwirkung einer nahe der Blickrichtung positionierten Blendquelle ( $\vartheta = 2,5^\circ$ ) als kritischer bewertet wurde. SAREY-KHANIE et al. stellen übereinstimmend mit SCHMITS und MOSKVINA fest, dass abhängig von der Aufgabe am Arbeitsplatz unterschiedliche Blickschwerpunkte und Blickstreuungen auftreten. Damit liegt die Vermutung nahe, dass auch die Empfindlichkeit gegenüber psychologischer Blendung an Büroarbeitsplätzen von der Aufgabenart abhängig ist. Außerdem erläutert das Modell der Schmerzempfindung die teilweise großen Unterschiede zwischen einzelnen Studien und den einzelnen Probanden. So wirken sich neben der Tageszeit [Ken 15a] und der kulturellen Herkunft [Mel 11; Gee 14] auch weitere neurologische und psychologische Einflüsse auf die Blendungsbewertung aus, wie z. B. Chronotyp und der Koffeinkonsum [Ken 15b, Alt 15]. Folglich wurden diese Parameter, falls bekannt, in der vorliegenden Studie dokumentiert.

Obwohl STONES Modell die Phänomene der psychologischen Blendung detaillierter beschreibt als die bisherigen Beobachtungen hinsichtlich Pupillen- und Muskelbewegungen sowie retinaler Physiologie, sind die Ursachen der Blendungsempfindung bis heute unklar. Eine Hypothese dazu wurde u. a. von HOWARTH [How 93] formuliert: Die psychologische Blendung sei ein Impuls, den Blick von der Blendquelle zu entfernen um die Retina vor Schäden durch die Blendquelle zu schützen. Er stützt sich bei seiner These auf die Ergebnisse von MARSHALL [Mar 87], welcher die Schäden von hellem Licht auf das neuronale Gewebe der Netzhaut dokumentiert.

Im Gegensatz dazu existieren Studien, die einen (unterdrückten) Blick in die Blendquelle nahe legen. So weisen helle, blinkende Leuchten aber auch helle, konstante Lichtquellen eine sehr hohe Signal- und Aufmerksamkeitswirkung auf [Ger 54; Ger 57] und lenken, wie beispielsweise elektronische Werbetafeln, die Blickbewegungen von Autofahrern ab [Duk 13; Ket 14]. Weiterhin tendieren Probanden, die an einer Abzweigung stehen dazu, den heller beleuchteten Gang zu betreten. Bei steigendem Beleuchtungsstärkeverhältnis von hellerem zu dunklerem Gang nimmt diese Tendenz bis zu einem Verhältnis von 100:1 zu [Tay 74]. Diese Tatsache kann ebenfalls bei vielen Insekten beobachtet werden, die sich auf Lichtquellen hinbewegen.

Diese beiden Hypothesen wurden im Rahmen einer vom Verfasser betreuten Masterarbeit [Hup 15] untersucht, von der ausgewählte Ergebnisse in Kap. 3.8 präsentiert werden.

### 2.3 Bewertung der physiologischen Blendung

Zu den Bewertungskriterien der physiologischen Blendung zählen die Blendbeleuchtungsstärke am Auge, die äquivalente Schleierleuchtdichte sowie in der Straßenbeleuchtung der TI-Wert (Threshold Increment, Schwellenwerterhöhung).

Die Blendbeleuchtungsstärke am Auge, als Maß des auf die Pupille treffenden Lichts der Blendquelle, wird gemäß Gl. 2.2 berechnet. Darin ist  $d$  der Abstand zur Blendquelle in m.

$$E_{glare} \approx \frac{I_{glare} \cdot \cos\vartheta}{d^2} \cdot \omega\Omega_0 \quad (2.2)$$

Aus dieser Größe kann die äquivalente Schleierleuchtdichte  $L_{veil}$  für die Fovea berechnet werden. Die äquivalente Schleierleuchtdichte basiert in ihrer ursprünglichen Form auf den Untersuchungen von HOLLADAY, STILES und CRAWFORD [Hol 26; Hol 27; STil 29a; STil 29b; STil 37] und wurde zuerst in [Cie 42] veröffentlicht. Die Gleichung gilt für Punktlichtquellen und im Winkelbereich von  $1^\circ$  bis  $30^\circ$  und wird als Stiles-Holladay-Gleichung bezeichnet (vgl. Gl. 2.3 [Cie 02a, S. 3]). Die Größen besitzen folgende Einheiten:  $L_{veil}$  in  $\text{cd}/\text{m}^2$ ,  $E_{glare}$  in lx und  $\vartheta$  in  $^\circ$ .

$$\frac{L_{veil}}{E_{glare}} = \frac{10}{\vartheta^2} \quad (2.3)$$

Diese Gleichung wurde in [Cie 02a] für einen größeren Blendwinkelbereich von  $0,1^\circ$  bis  $100^\circ$  erweitert. Darin wurden auch physiologische Merkmale, wie das Alter (in Jahren) und die Augenfarbe ( $p = 0$  für schwarze Augen,  $p = 1$  für helle Augen), berücksichtigt (vgl. Gl. 2.4 [Cie 02a, S. 9]). Jedoch ist der Geltungsbereich von bis zu  $100^\circ$  fraglich, da die Blendbeleuchtungsstärke bei  $90^\circ$  Null wird.

$$\frac{L_{veil}}{E_{glare}} = \frac{10}{\vartheta^3} + \left[ \frac{5}{\vartheta^2} + \frac{0,1p}{\vartheta} \right] \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\text{Alter}}{62,5} \right)^4 \right] + 0,0025p \quad (2.4)$$

Das TI-Verfahren ist in DIN EN 13201-3:2003 und die Grenzen für die Straßenbeleuchtung in DIN EN 13201-2:2003 [Nor 03a] beschrieben. Beim TI-Verfahren wird die vorhandene äquivalente Schleierleuchtdichte zur mittleren Fahrbahnleuchtdichte ins Verhältnis gesetzt, um die tatsächliche Kontrastminderung abzuschätzen (vgl. Gl. 2.5 [Nor 03b, S. 31]).

$$TI = \frac{65}{(\text{mittlere Fahrbahnleuchtdichte})^{0,8}} \cdot L_{veil} \% \quad (2.5)$$

Die äquivalente Schleierleuchtdichte berechnet sich in dieser Norm als Summation aller sichtbaren Blendquellen nach der Stiles-Holladay-Gleichung (vgl. Gl 2.6 [Nor 03b, S. 31]).

$$L_{veil} = 10 \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{\vartheta_i^2} = \frac{E_1}{\vartheta_1^2} + \frac{E_2}{\vartheta_2^2} + \dots + \frac{E_n}{\vartheta_n^2} \quad (2.6)$$

Im Gegensatz zur Straßenbeleuchtung ist bei künstlich beleuchteten Arbeitsstätten im Innenraum „...die physiologische Blendung in der Regel kein wesentliches Problem, wenn die Grenzen für psychologische Blendung eingehalten werden.“ [Nor 11a, S. 14]

## 2.4 Bewertungsverfahren der psychologischen Blendung

### 2.4.1 Entwicklung der Bewertungsverfahren der psychologischen Direktblendung

Da die Ursachen der psychologischen Blendung bis heute nicht durch ein Modell erfasst werden können, wurden die Einflussfaktoren auf die psychologische Blendung durch zahlreiche empirische Studien erarbeitet. Die ersten Arbeiten dazu entstanden ab 1945 nach der Einführung der langgestreckten Leuchtstofflampen [Lit 03, S. 12ff.]. Verschiedene Forschergruppen aus Deutschland, England, den Niederlanden und den USA identifizierten unabhängig voneinander die wichtigsten Einflussfaktoren auf den psychologischen Blendungsgrad  $G$ : Die Leuchtdichte der Blendquelle  $L_s$ , die Hintergrundleuchtdichte  $L_b$ , den Raumwinkel  $\omega_s$ , unter dem die Blendquelle dem Beobachter erscheint, sowie die Position der Blendquelle im Gesichtsfeld (Positionsindex  $P$ ) [Lit 03, S. 12]:

$$G = \frac{L_s^{m_1} \cdot \omega_s^{m_2}}{L_b \cdot P^{m_1}} \quad (2.7)$$

Von den einzelnen Forschergruppen wurden unterschiedliche Exponenten  $m_1$  und  $m_2$  ermittelt (vgl. Tab. 2.1).

Die Unterschiede zwischen den Exponenten sind in erster Linie auf die unterschiedlichen Untersuchungsaufbauten und empirischen Methoden zurückzuführen. Abgesehen davon sind die Streuungen im Beobachterkollektiv abhängig von der empirischen Methode teilweise sehr groß [Lit 03].



Tab. 2.1 Exponenten der Blendungsgleichung [Lit 03, S. 13]

<b>Autor</b>	<b>Jahr</b>	<b>m<sub>1</sub></b>	<b>m<sub>2</sub></b>
VERMEULEN und DE BOER [Ver 52]	1952	1,7	0,5
LUCKIESH und GUTH [Luc 49]	1949	2,3	0,8
PETHERBRIDGE und HOPKINSON [Pet 50]	1950	1,6	0,8
ARNDT, BODMANN und MUCK [Arn 59a]	1959	1,5	0,5

Neben den primären Einflussfaktoren wurden die sekundären Einflüsse, wie z.B. die Form der Lichtquelle, Leuchtdichteunterschiede innerhalb und in unmittelbarer Nähe der Blendquelle, die Lichtfarbe sowie Probandeneinflüsse, zunächst vernachlässigt. Erstmals wurde 1957 von HOPKINSON die Leuchtdichte in der unmittelbaren Umgebung als wichtiger Einflussfaktor erwähnt [Hop 57].

In den folgenden Jahrzehnten wurden verschiedene Blendungsbewertungssysteme entwickelt, die immer weiter optimiert wurden (vgl. [Lit 03] zur Übersicht, sowie [Hop 57; Ies 67; Ein 69; Lit 76; Ein 79; Cie 83; Cie 86; Nor 90]). Nach mehreren Harmonisierungsschritten existieren heute das UGR-Verfahren (Unified Glare Rating) und das VCP-Verfahren (Visual Comfort Probability) als offizielle Blendungsbewertungsverfahren. Diese sollen nachfolgend vorgestellt und miteinander verglichen werden.

#### 2.4.2 Das VCP-Verfahren

Das Berechnungsverfahren zur Bestimmung des VCP-Werts gehen im Wesentlichen auf die Untersuchungen von LUCKIESH und GUTH [Luc 49; Gut 63] sowie HOPKINSON [Hop 57] zurück [Rea 00]. In weiteren Arbeiten wurde das Verfahren verifiziert und erstmalig 1966 vorgestellt [Gut 66; Ies 66]. Seither wird es vor allem in Nordamerika verwendet. Das Ergebnis des VCP-Verfahrens ist die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Beobachter sich bei einer konkreten Beleuchtungssituation wohlfühlt oder sich an der Grenze zwischen Komfort und Diskomfort befindet (Borderline between Comfort and Discomfort - BCD). Um diese Wahrscheinlichkeit zu berechnen benötigt man zunächst den „Discomfort Glare Rating“-Wert [Rea 00, S. 9-27]:

$$DGR = \left( \sum_{i=1}^n \frac{0,5 \cdot L_s/L_0 \cdot (20,4\omega_s + 1,52\omega_s^{0,2} - 0,075)}{P \cdot F^{0,44}} \right)^{n^{-0,0914}} \quad (2.8)$$

mit  $DGR$  Discomfort Glare Rating  
 $n$  Anzahl der Blendquellen  
 $L_s$  Leuchtdichte der Blendquelle (in fL)  
 $\omega_s$  Raumwinkel, unter dem die Blendquelle erscheint (in sr)  
 $P$  Positionsindex nach [Luc 49] ( $1 \leq P \leq 16$ )  
 $F$  gemittelte Leuchtdichte aus Raumbegrenzungsflächen und Blendquellen, Annahme: Blickfeld von 5 sr (in fL)

Anschließend kann man den VCP-Wert berechnen bzw. aus einem Diagramm ablesen [Rea 00, S. 9-27]:

$$VCP = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{6,374 - 1,3227 \ln DGR} e^{-j^2/2} dj \quad (2.9)$$

Generell gilt das VCP-Verfahren nur für gleichmäßig helle Leuchten. Das Verhältnis aus maximaler und mittlerer Leuchtdichte der Blendquelle muss kleiner als 5:1 sein. Außerdem dürfen die Leuchten abhängig vom Ausstrahlungswinkel eine bestimmte Leuchtdichte nicht überschreiten. Die zulässige Leuchtdichte liegt zwischen 7710 cd/m<sup>2</sup> bei 45° zur Lotrechten und sinkt bis 1695 cd/m<sup>2</sup> bei 85° zur Lotrechten [Rea 00]. Aufgrund der Komplexität des Verfahrens wird jedoch meist ein Tabellenverfahren mit weiteren Randbedingungen angewandt [Rea 00]. Eine Beleuchtung gilt als gut entblendet, wenn der VCP-Wert größer oder gleich 70 ist.

### 2.4.3 Das UGR-Verfahren

Das UGR-Verfahren ist weltweit das Standardverfahren zur Blendungsbewertung in Innenräumen. Es ist ein harmonisiertes Verfahren, das aus der CGI-Blendungsformel der CIE (CIE – Commission Internationale de l'Éclairage, Internationale Beleuchtungskommission) hervorgegangen und erstmalig in der CIE-Publikation 117 veröffentlicht worden ist [Cie 95b]. Nach [Lit 03] wurden bei der Entwicklung des UGR-Verfahrens folgende Bedingungen vorausgesetzt:

- Bei der Unterteilung ausgedehnter Lichtquellen soll die Blendungsrechnung widerspruchsfreie Ergebnisse liefern. Deshalb muss der Exponent von  $\omega_s$  gleich 1 sein.
- Die Blendungsformel sollte die Aufstellung einfach anzuwendender Standardtabellen ermöglichen. Deshalb musste auf die Berücksichtigung der Kovarianz (s. Kap. 2.4.4) und auf die Einführung eines Korrekturterms zu empfindungsgemäßerer Summation von Blendquellen, wie von [Arn 59b; Aka 96] vorgeschlagen, verzichtet werden.

- Die sich aus der Formel ergebenden Blendungswerte sollten mit bekannten Werten korrespondieren (vgl. [Lit 03]). Daraus wurden die Konstanten in der UGR-Formel bestimmt.

Das CIE Unified Glare Rating wird durch Gleichung 2.10 bestimmt [Cie 95b, S. 2]. Die Einteilung der Blendungsstufen erfolgt in 3 UGR-Schritten. Dabei gelten Unterschiede in der psychologischen Blendung erst ab 3 UGR-Einheiten als wahrnehmbar [Col 62].

$$UGR = 8 \cdot \lg \left[ \frac{0,25}{L_b} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_s^2 \cdot \omega_s}{P^2} \right] \quad (2.10)$$

- mit
- $UGR$  Unified Glare Rating ( $10 \leq UGR \leq 31$ )
  - $n$  Anzahl der Blendquellen
  - $L_s$  Leuchtdichte der Blendquelle (in  $\text{cd}/\text{m}^2$ ), berechnet aus Lichtstärke aus Beobachterposition und projizierter Fläche der Blendquelle
  - $\omega_s$  Raumwinkel, unter dem die Blendquelle erscheint ( $0,0003 \text{ sr} \leq \omega_s \leq 0,1 \text{ sr}$ )
  - $P$  Positionsindex nach [Luc 49] ( $1 \leq P \leq 16$ )
  - $L_b$  Hintergrundleuchtdichte (in  $\text{cd}/\text{m}^2$ ), berechnet aus indirekter Beleuchtungsstärke am Auge

Da sich die Größe einer Blendquelle sowohl auf ihre mittlere Leuchtdichte (durch Mittelung der Leuchtdichten über alle identifizierten Raumwinkelelemente) und ihren Raumwinkel (Summation der Raumwinkelelemente) auswirkt, muss die tatsächliche Blendquellengröße exakt ermittelt werden. Im Optimalfall entspricht die tatsächliche Größe der Blendquelle der wahrgenommenen Größe. Bei real existierenden Leuchten wurden deshalb aufgrund der Leuchtdichteunterschiede innerhalb der Leuchte einheitliche Kriterien zur Abgrenzung zwischen Blendquelle und Hintergrund gefordert [Ies 73; Cie 83]. Eine Möglichkeit zur Bestimmung der blendenden Fläche ist die Verwendung einer Leuchtdichteschwelle, ab welcher die Elemente der Leuchte zur Blendquelle zugeordnet werden. Dafür wurden in den CIE Publikationen 55:1983 und 117:1995 [Cie 83; Cie 95b, S. 25] bereits verschiedene Leuchtdichteschwellen ( $300 \text{ cd}/\text{m}^2$ ,  $500 \text{ cd}/\text{m}^2$ ,  $750 \text{ cd}/\text{m}^2$  und  $1000 \text{ cd}/\text{m}^2$ ) für Leuchtstofflampenleuchten, abhängig vom Leuchtendesign, definiert. Für LED-Leuchten existieren keine derartigen Leuchtdichteschwellen.

Eine weitere Möglichkeit zur messtechnischen Bestimmung von UGR-Werten für Spiegelrasterleuchten wird in [Lit 03] aufgeführt. Dieses Verfahren basiert auf dem von WOLF [Wol 04] entwickelten Leuchtdichteanalysator mit adaptiver Leuchtdichteschwellen-Berechnung. Zur Bestimmung der Leuchtdichte-

schwelle werden die Histogramme der Leuchtdichtebilder ausgewertet und im ersten lokalen Minimum des Histogramms (oberhalb von  $100 \text{ cd/m}^2$ ) die Leuchtdichteschwelle definiert (näheres in Kap. 4.4.1 sowie [Wol 04]). Die Idee hinter dieser Methode liegt darin begründet, dass die Blendquellen in der Regel viel heller als der Hintergrund sind. Das Verfahren wurde bereits als lichttechnische Bewertungsmethode bei zahlreichen Probandenversuchen mit Leuchtstofflampen-, Halogenlampen- und Hochdruckentladungslampenleuchten in Innenräumen eingesetzt und als geeignet zur Blendungsbewertung in Büro- und Industriearbeitsplätzen befunden [Gal 98; Hes 98; Jor 98; Lit 03; Wol 03; Wol 04]. Ebenso wird ein ähnliches Verfahren von WIENOLD und CHRISTOFFERSEN sowie OSTERHAUS ET AL. [Wie 06; Ost 08] zur Detektion von Tageslicht-Blendquellen in Innenräumen eingesetzt. Jedoch existieren auch bei diesem Verfahren keine Informationen über die Anwendbarkeit auf LED-Leuchten.

#### 2.4.4 Vergleich zwischen UGR und VCP

Eine besondere Eigenschaft beider Verfahren liegt in den Skalen begründet, denn es handelt sich jeweils um eine Intervallskala. Die Werte beim UGR-Verfahren reichen von 10 bis 31 und sind jeweils in 3er-Schritten unterteilt (10, 13, 16, ...). Beim VCP-Verfahren liegen typische Werte zwischen 30 und 99 % und sind in 5 %-Schritte aufgeteilt. Hierdurch lassen sich die Abstände zwischen den Zahlen wahrnehmbaren psychologischen Unterschieden zuordnen [Cie 95b]. Legt man die Bewertungsskala von GUTH oder SÖLLNER [Cie 83] zu Grunde (vgl. Tab. 2.2), ergeben sich die Zusammenhänge nach Tab. 2.3. Bei Beleuchtungsanlagen mit einem UGR-Wert kleiner als 10 geht man davon aus, dass keine Blendung mehr auftritt [Lit 03, S. 28].

Erste Untersuchungen zur Vergleichbarkeit von UGR und VCP wurden u. a. von SØRENSEN durchgeführt, der einen analytisch hergeleiteten Zusammenhang mit den Randbedingungen  $VCP_{UGR=16} = 80$  sowie  $VCP_{UGR=19} = 70$  hergestellt hat [Sør 91, S. 58]:

$$VCP_{UGR} = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{2,5335-0,1057 \cdot UGR} e^{-t^2/2} dt \quad (2.11)$$

Das Ergebnis dieser Gleichung lässt sich für den erprobten UGR-Bereich ( $10 \leq UGR \leq 31$ ) auch graphisch darstellen (vgl. Abb. 2.7).

Anhand von Abb. 2.7 und 2.8 kann man erkennen, dass sich die UGR- und die VCP-Skala zueinander annähernd linear verhalten. So identifizierten auch MISTRICK und CHOI [Mis 99] einen linearen Zusammenhang zwischen UGR und VCP, nachdem sie eine große Zahl von Beleuchtungsszenarios mit beiden Sys-

temen berechnet hatten (vgl. Abb. 2.8). Obwohl die Regressionsgerade ähnliche Werte wie bei SØRENSEN abbildet, fallen die beträchtlichen Streuungen ab  $VCP = 75$  auf ( $R^2 = 0,68$ ). Diese haben nach MISTRICK und CHOI folgende Ursachen:

- unterschiedliche Potenzen der Blendparameter in den Gleichungen
- Korrekturterm bei VCP-Verfahren zur Berücksichtigung der Blendquellenanzahl
- Berücksichtigung der Blendquellenleuchtdichte bei der Bestimmung der mittleren Hintergrundleuchtdichte (Kovarianz) im VCP-Verfahren

Tab. 2.2 Zuordnung der Bewertungsskalen nach Söllner und Guth [Lit 03, S. 26]

<b>Blendungsgrad</b>	<b>Bewertungsskala nach Söllner</b>	<b>Bewertungsskala nach Guth</b>
0	Keine Blendung	(No glare)
1	Blendung zwischen nicht vorhanden und merkbar	Unnoticeable
2	Blendung merkbar	Acceptable
3	Blendung zwischen merkbar und störend	Between comfort and discomfort (BCD)
4	Blendung störend	Perceptibly uncomfortable
5	Blendung zwischen störend und unerträglich	Just intolerable
6	Blendung unerträglich (unzumutbar)	(Intolerable)

Tab. 2.3 Zuordnung Güteklasse, Blendungsgrad sowie VCP und UGR-Wert (ähnlich [Lit 03, S. 27])

<b>CIE Güteklasse</b>	<b>Blendungsgrad</b>	<b>VCP-Wert</b>	<b>UGR-Wert</b>
A	1,15	75 %	13 / 16
B	1,5	65 %	19
C	1,85	55 %	
D	2,2	45 %	22
E	2,55	35 %	25 / 28

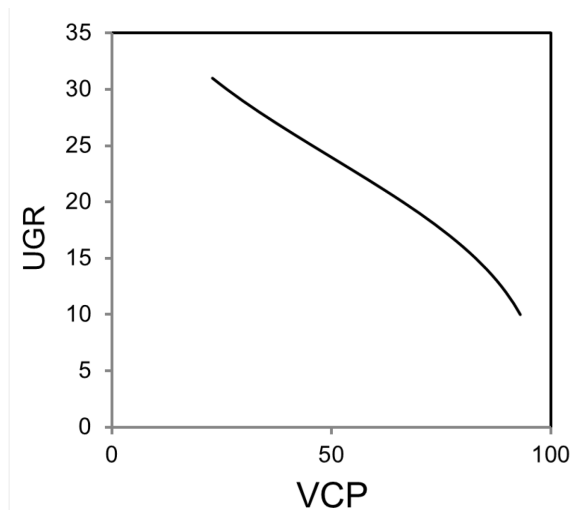


Abb. 2.7 Verhältnis zwischen der UGR- und der VCP-Skala (nach Gl. 2.11)

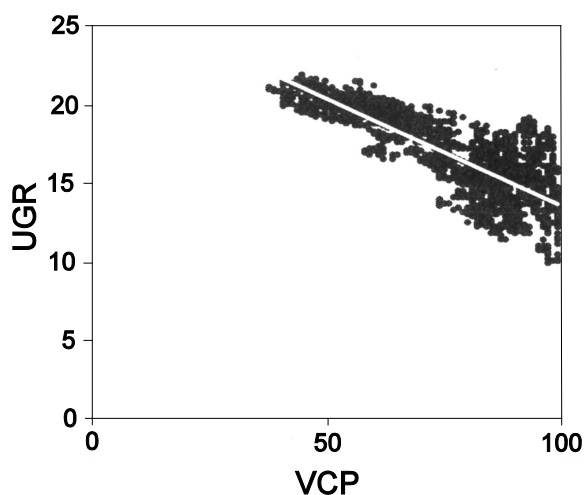


Abb. 2.8 Verhältnis zwischen der UGR- und der VCP-Skala [Mis 99, S. 94]

Insbesondere den letzten Punkt untersuchten von MISTRICK und CHOI näher. Da eine Erhöhung der Blendquellenanzahl bzw. der Blendquellengröße in der Wahrnehmung nicht vollständig durch die Erhöhung der Hintergrundleuchtdichte ausgeglichen wird und somit das Blendempfinden erhöht, spricht man in diesem Zusammenhang von Kovarianz [Lit 03, S. 103f.]. In einer theoretischen Überlegung statteten sie einen Raum jeweils mit verschiedenen Leuchten (diffus oder gerichtet abstrahlend) aus und nahmen die Blendungsbewertung an zwei Positionen mit UGR und VCP vor. Während das UGR-Verfahren bei den Spiegelrasterleuchten im Gegensatz zu VCP eine große Veränderung vorher sagte, wurden bei den diffus abstrahlenden prismatischen Leuchten genau die umgekehrten Blendungsbewertungen von den Verfahren ermittelt (UGR: keine Veränderung, VCP: starke Veränderung). Nach Einschätzung von MISTRICK und CHOI bewertet das UGR-Verfahren die Situation insgesamt realistischer, da bei Spiegelrasterleuchten entscheidend ist, ob die Lampen sichtbar sind. Aufgrund der grundsätzlichen Vergleichbarkeit der beiden Blendungsbewertungssysteme soll in dieser Arbeit ausschließlich das UGR-Verfahren hinsichtlich der Beurteilung von inhomogenen LED-Matrix-Leuchten untersucht werden. Obwohl das UGR-Verfahren gewisse Anwendungsgrenzen insbesondere bei kleinen und großen Blendquellen besitzt, bietet es sich für eine solche Untersuchung eher an als das VCP-Verfahren. Das UGR-Verfahren ist einfacher anzuwenden und weiter verbreitet. Zusätzlich existiert für das UGR-Verfahren ein Grenzkurvenverfahren, welches für eine schnelle Leuchtenauslegung hilfreich ist [Cie 95b, Lit 03, S. 97ff.]. Außerdem existieren bereits mehrere Untersuchungen zur Erweiterung des UGR-Verfahrens für LED-Matrix-Leuchten.

Darüber hinaus wurde von JIANG et al. eine Transferfunktion bestimmt, um UGR-Wert und äquivalente Schleierleuchtdichte für bestimmte Raumanordnungen ineinander umzurechnen [Jia 13].

## 2.5 Bekannte Untersuchungen zur Erweiterung des UGR-Verfahrens

Da das UGR-Verfahren eine homogen leuchtende Fläche der Blendquelle zu Grunde legt, wurde in zahlreichen Untersuchungen der Einfluss der Leuchtdichtestruktur auf die tatsächlich wahrgenommene Blendung untersucht. In diesen Untersuchungen wurden der Leuchtdichtekontrast und der Leuchtdichtegradient zwischen LED-Lichtpunkten und unmittelbarer Umgebung, die Anzahl, die Größe, die Anordnung, der Abstand und die maximale Leuchtdichte der LED-Lichtpunkte innerhalb einer Leuchte sowie die Position der LED-Matrix-Blendquelle im Gesichtsfeld und die Hintergrundleuchtdichte variiert. Selbstverständlich wurden nicht alle Parameter innerhalb einer einzelnen Probandenstudie untersucht, da dies aufgrund der Vielzahl der Einstellmöglichkeiten einen aufwändigen Testaufbau und eine langwierige Untersuchungsprozedur nach sich ziehen würde.

In mehreren Studien blickten die Probanden auf einen Fixpunkt und die Blendquelle befand sich in einem festen Blickwinkel oberhalb ihrer Blickrichtung [Lee 07; Jun 09; Har 11; Tas 11; Mat 12; Aya 13; Tas 15, Yan 15a; Yan 15b], während die Struktur der Blendquelle verändert wurde. Als Ergebnis halten alle Autoren fest, dass LED-Matrix-Leuchten mit hohen Kontrasten innerhalb der Leuchte eine höhere Blendungsempfindung hervorrufen als Leuchten mit homogener Leuchtdichtestruktur bei gleicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte. Dabei konnten die Autoren jedoch nicht sicherstellen, dass die Probanden während des Tests doch einmal in Richtung oder gar direkt in die Blendquelle schauten. Deshalb wurden in einigen Untersuchungen die Testpersonen dazu aufgefordert, direkt in die Blendquelle zu schauen [Wat 95; Kas 06; Tak 07; Van 12; Hig 13; Lou 15; SCHei 15b]. Insbesondere TAKAHASHI et al., die die Blendquelle in 10°-Schritten von 0° bis 40° oberhalb der Sichtlinie darboten, kamen zu dem Schluss, dass die LED-Matrix-Leuchte vor allem bei direktem Blick in die Leuchte mehr stört. Bei zunehmendem Blendwinkel besteht jedoch irgendwann bezüglich der Wahrnehmung kein Unterschied zwischen einer strukturierten und einer homogenen Leuchte mit gleicher mittlerer Leuchtdichte mehr. HIGASHI et al., die in einem büroähnlichen Aufbau die Blendquellen in Winkeln von 0°, 16° und 37° oberhalb der Blicklinie darboten, machten ähnliche Beobachtungen. Bei ihnen wirkt sich die Leuchtdichteungleichmäßigkeit erst ab einem Kontrast  $L_{LED}/L_{Umgebung}$  von 100 und

bei einem Blendwinkel kleiner  $16^\circ$  aus. Auch KASAHARA et al., deren Blendquelle bei  $0^\circ$  und  $10^\circ$  Blendwinkel dargeboten wurde, fanden einen nennenswerten Einfluss des Leuchtdichtekontrasts vorwiegend bei direkter Betrachtung der LED. Zwar sind bei ihnen auch bei  $10^\circ$  Unterschiede zwischen der (einzelnen) homogenen Leuchtdichtesituation und den kontrastreichen Situationen erkennbar, jedoch unterscheiden sich die Blendungsbewertungen bei  $10^\circ$  im Kontrastbereich von 10 bis 10 000 nicht mehr. Folglich konnte auch hier kein signifikanter Einfluss des Kontrasts auf die psychologische Blendung bei nichtfovealer Betrachtung beobachtet werden.

Neben dem Kontrast innerhalb der Leuchte, der bei fovealer Betrachtung die psychologische Blendung erhöht, könnten noch andere Parameter von LED-Leuchten, die nicht vom UGR-Verfahren berücksichtigt werden, das Blendurteil beeinflussen. Dazu zählen beispielsweise Anzahl, Abstand, Größe und Farbort der LEDs, der Leuchtdichtegradient zwischen LEDs und unmittelbarer Umgebung sowie die Leuchtdichte und die Größe der unmittelbaren Umgebung der LEDs. Abgesehen vom Farbort und Leuchtdichtegradienten wurden diese Parameter in vorangegangenen Studien zur Blendung von LED-Leuchten in Innenräumen betrachtet [Wat 95; Pau 99; Kas 06; Lee 07; Tak 07; Jun 09; Tas 11; Har 11; Mat 12; Van 12; Aya 13; Hig 13; Kog 13; Gee 14; SCHei 15b; Tas 15; Lou 15; Yan 15a; Yan 15b]. Die Hintergrundleuchtdichten in diesen Studien bewegten sich, soweit bekannt, zwischen 18 und  $105 \text{ cd/m}^2$ . Die Autoren der Studien kommen zu dem Schluss, dass die genannten Parameter einen relativ geringen Einfluss auf die Blendung haben bzw. sie widersprechen sich hinsichtlich der Effektrichtung bei einzelnen Parametern. Beispielsweise nimmt bei sinkendem Abstand der LEDs in der Studie von EBLE-HANKINS [Ebl 08] die Blendung zu, während sie bei DONNERS et al. [Don 15] abnimmt und bei TASHIRO et al. [Tas 15] keinen Einfluss auf die Blendung besitzt. Im Gegensatz zu DONNERS et al. und TASHIRO et al. verwendet EBLE-HANKINS Streifenmuster und keine LED-Matrixleuchten. Außerdem bietet sie ebenso wie DONNERS et al., der die Blendung von LED-Straßenleuchten untersucht, einen kleineren Winkelbereich ( $0,037^\circ \dots 0,14^\circ$ ) als TASHIRO et al. ( $0,2^\circ \dots 5^\circ$ ) an. Die Hintergrundleuchten der beiden waren vergleichbar, da TASHIRO et al. mehrere Hintergrundleuchtdichten (von dunkel bis  $10 \text{ cd/m}^2$ ) verwendeten.

Dieses Beispiel zeigt, dass die Auswirkungen der oben genannten Parameter von den Umgebungsbedingungen abhängig sind und deshalb für LED-Leuchten noch weitere Forschungsarbeit notwendig ist. Abgesehen davon existierte zu Beginn der Probandenuntersuchungen für die vorliegende Arbeit kaum eine Untersuchung, in der ein Parameter allein analysiert wurde. Das heißt, dass in vielen bisherigen Probandentests beispielsweise sowohl die Anzahl als auch der Abstand der LEDs innerhalb der Leuchte gleichzeitig geän-



dert wurden. Gleiches gilt für den Kontrast innerhalb der Leuchte: In allen bekannten Untersuchungen wurde ausschließlich die Leuchtdichte der sichtbaren LEDs variiert und die Leuchtdichte des unmittelbaren Umfelds konstant gelassen. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten im Leuchtendesign von LED-Leuchten ist diese Vorgehensweise jedoch nicht ausreichend. Bei Verwendung verschiedener Farben, Diffusoren oder Optiken kann sich ebenfalls die Größe und Leuchtdichte des unmittelbaren Umfelds ändern. Deshalb wurde in dieser Arbeit besonders die Variation einzelner Parameter betrachtet. Dabei wurden die Gegebenheiten in Innenräumen berücksichtigt. Dazu zählen die typischen Hintergrundleuchtdichten, Entfernungen, Blendwinkel und Größenverhältnisse sowie die Aufgabe des Probanden während der Blendungsbewertung.

Hinsichtlich des Einflusses des Farborts und des Spektrums von LED-Leuchten auf die Blendung in Innenräumen konnte keine Studie gefunden werden. Lediglich für mesopische Bedingungen (dunkler Raum) liegen mehrere Studien [Koo 04; Fla 94; Bul 09; Bod 11; Kimu 11; Aka 13] vor. Deren Autoren stellen übereinstimmend fest, dass blaue Blendquellen bei gleicher Leuchtdichte mehr blenden als grüne, gelbe oder rote Lichtquellen. Das Spektrum kann nach [Nie 15] bei gleichem Farbort bei mesopischen Bedingungen vernachlässigt werden. Da bei der Arbeitsstättenbeleuchtung in der Regel keine Leuchtmittel mit gesättigten Farben eingesetzt werden, wird an dieser Stelle auf die Studien von HAUBNER und JOHANNI sowie BOYCE und CUTTLE Bezug genommen [Hau 70; Boy 90]. Beide fanden für Leuchtstofflampenleuchten mit „weißem“ Licht ( $2700\text{ K} \leq \text{CCT} \leq 6300\text{ K}$ ) einen vernachlässigbaren Einfluss, wenn die Leuchten die gleiche Farbtemperatur wie der Rest des Raums aufweisen und eine ausreichende Adaptationszeit gewährleistet ist. Folglich wurde der Parameter aufgrund des geringen zu erwartenden Einflusses in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.

## 2.6 Vorschläge zur Erweiterung des UGR-Verfahrens

In der CIE-Publikation 147 [Cie 02b] wurde erstmalig eine Erweiterung des UGR-Verfahrens für kleine Blendquellen vorgestellt. In dieser Schrift wurde eine Möglichkeit präsentiert, kleine Lichtquellen hinsichtlich der Blendung zu bewerten, die unterhalb der Limitation des UGR-Verfahrens von  $0,0003\text{ sr}$  liegen. Als Grundlage dient im Wesentlichen die Studie von PAUL und EINHORN [Pau 99] mit Glühlampen, welche ebenfalls hohe Leuchtdichten aufweisen können. Da bei so kleinen Lichtquellen das UGR-Verfahren zu hohe Werte vorhersagen würde, wird in dieser Schrift für extrafoveale Blendquellen die Lichtstärke als Bewertungskriterium für die psychologische Blendung vorge-

schlagen. Diese These deckt sich mit den Beobachtungen von SCHMITS [SCHmi 89], der die Blendung durch Lichtquellen hoher Leuchtdichte im peripheren Gesichtsfeld untersuchte. Bei großen Blendwinkeln ( $\vartheta > 45^\circ$ ) beobachtete er, dass die Beleuchtungsstärke am Auge die wahrgenommene Blendempfindung am besten beschreibt. Dies führt er u. a. auf das Verhältnis zwischen der Größe der Lichtquellen und der Größe der rezeptiven Felder bzw. der Ricco'schen Flächen zurück (vgl. Kap. 2.2).

Die Leuchtdichte in der CIE-Schrift wird deshalb für eine auf  $0,005 \text{ m}^2$  angenäherte Fläche folgendermaßen berechnet [Cie 02b, S. 15]:

$$L = \frac{I}{A_p} = 200 * I \quad (2.12)$$

Folglich berechnet sich der blendungsbestimmende Term in der UGR-Formel [Cie 02b, S. 16] gemäß Gl. 2.13.

$$\frac{L_s^2 * \omega_s}{P^2} = \frac{I^2 * A_p}{A_p^2 * r^2 * P^2} = \frac{I^2}{A_p * r^2 * P^2} = 200 * \frac{I^2}{r^2 * P^2} \quad (2.13)$$

Trotz ihres großen Gültigkeitsbereichs ( $\vartheta > 5^\circ$  und typische Innenraum-Abstände), ihrer Einfachheit und der Anlehnung an die Auflösungsfähigkeit des Auges hat sich diese Formel in der Praxis nicht durchgesetzt, da sie nur für sehr kleine Leuchten, wie beispielsweise Downlights gilt. Lediglich die Bestimmung der mittleren Leuchtdichte über Lichtstärke und projizierte Leuchtenfläche wird bspw. im UGR-Verfahren [Cie 95] oder in Hinweisen zur Beurteilung von Lichtimmissionen [Lai 12] verwendet. Die angenommene kleine Blendquelle konstanter Größe ist jedoch in diesen Schriften nicht enthalten. Bei komplexeren Leuchten mit mehreren direkt sichtbaren LEDs ist die Anwendbarkeit von Gl. 2.13 unklar, da hierfür die sichtbaren LEDs separat betrachtet werden müssen um den gesamten UGR-Wert der Leuchte zu ermitteln. Es stellt sich deshalb die Frage, ab welchen Leuchtdichtekontrasten bzw. -gradienten innerhalb der Leuchte dieses Verfahren angewandt werden kann.

Der zweite Vorschlag zur Erweiterung des UGR-Verfahrens für strukturierte LED-Leuchten wurde von HARA und HASEGAWA aus ihren Untersuchungsergebnissen abgeleitet [Har 11]. Um den Einfluss der Ungleichmäßigkeit in die UGR-Formel mit aufzunehmen, schlagen sie deshalb einen Korrekturfaktor zur Berechnung der „äquivalenten Blendquellenleuchtdichte“ aus der mittleren Blendquellenleuchtdichte vor (Gl. 2.14):

$$L_{s,eq} = k * L_{s,m} \quad (2.14)$$

Folglich berechnet sich der korrigierte UGR-Wert nach Gl. 2.15:

$$UGR_k = 8 * \lg \left( \frac{0,25}{L_b} \sum \frac{L_{s,eq}^2 * \omega_s}{P^2} \right) = 8 * \lg \left( \frac{0,25}{L_b} \sum \frac{(k * L_{s,m})^2 * \omega_s}{P^2} \right) \quad (2.15)$$

Nach HARA und HASEGAWA kann der Korrekturfaktor entweder für jede Leuchte mit Probandenversuchen bestimmt werden oder man verwendet ein empirisches Modell. Dafür schlagen sie die Zusammenführung von mehreren Studienergebnissen vor, um das Modell zu verifizieren [Har 15]. Ihre erste Hypothese für Matrix-Leuchten stellt einen direkten Zusammenhang zwischen der „Luminance Uniformity“ innerhalb der Leuchte und dem Korrekturfaktor her (vgl. Gl. 2.16). Die „Luminance Uniformity U“ berechnet sich aus der mittleren Leuchtdichte geteilt durch die maximale Leuchtdichte der Blendquelle, jeweils in Hauptabstrahlrichtung.

$$k = 10^{-0,15 \cdot \lg U} = U^{-0,15} \quad (2.16)$$

Wie aus den uneinheitlichen Korrekturfaktoren in Abb. 2.9 zu erkennen ist, müssen zur Verifizierung des Modells noch weitere Daten durch Probandenversuche gesammelt werden.

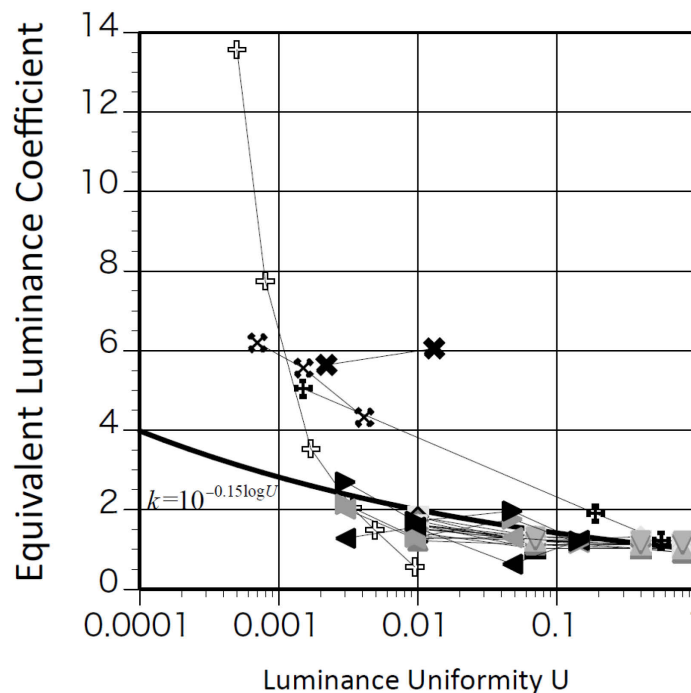


Abb. 2.9 Vergleich der Korrekturfaktoren (Equivalent Luminance Coefficient k) von [Har 11] (=zur Seite zeigende Dreiecke) [Hig 13] (=nach oben/unten zeigende Dreiecke) und [Tas 15] (=Kreuze) mit der Uniformity [Har 15, S. 28]

Auch HIGASHI et al. [Hig 13] schlagen einen Korrekturfaktor auf Basis der Uniformity vor, dessen Bestimmung jedoch abhängig davon ist, ob die Blend-

quelle peripher oder foveal wahrgenommen wird. Bei ihrem Vorschlag wird jedoch die UGR-Formel geändert, weshalb er an dieser Stelle nicht näher diskutiert wird.

Im Gegensatz zu HARA und HASEGAWA schlagen SCHEIR et al. eine alternative Berechnung des UGR-Werts anhand der wirksamen blendenden Fläche vor [SCHei 15a; SCHei 15b]. Diese tatsächlich störenden Bereiche der Leuchte unterscheiden sich vor allem bei LED-Lampen und -Leuchten stark von der projizierten, geometrischen Fläche der gesamten Blendquelle [Erd 12]. Dazu wird eine Leuchtdichteschwelle von 5 % bis 50 % des maximal auftretenden Pixels im Leuchtdichtebild berechnet. Mit der alternativen Berechnung des UGR-Werts erhalten sie eine bessere Anpassung für ihre Probandenstudie mit ungleichmäßigen LED-Leuchten bei direktem Blick in die Leuchte [SCHei 15b]. Ebenso wie der zweite und dritte Vorschlag basiert auch der vierte Vorschlag zur Erweiterung des UGR-Verfahrens auf einem größeren Probandenversuch, in diesem Fall jedoch von TASHIRO et al. [Tas 15]. Sie berechnen aus ihren Leuchtdichtebildern eine „effektive Blendquellenleuchtdichte  $L_{eff}$ “, für deren Berechnung die Leuchtdichte jedes Pixels ( $i,j$  = Pixelpositionen im Leuchtdichtebild) einen empirisch ermittelten Exponenten  $b$  und einen Korrekturfaktor  $a$  erhält. Beide Parameter sind abhängig von der Hintergrundleuchtdichte. Bei den von TASHIRO untersuchten Hintergrundleuchtdichten ( $0,1 \text{ cd/m}^2$ ;  $1 \text{ cd/m}^2$  und  $10 \text{ cd/m}^2$ ) bewegen sich die beiden Parameter im Bereich von  $a = 7 \dots 4$  und  $b = 0,605 \dots 0,471$  und nehmen mit steigender Hintergrundleuchtdichte ab (vgl. Gl. 2.17).

$$L_{eff} = \frac{\sum WF_{ij} \cdot L_{ij}}{i_{max} \cdot j_{max}} \quad (2.17)$$

$$WF = a * 10^{-4} * L_{ij}^b \quad (2.18)$$

Des Weiteren wird die UGR-Formel zur Anpassung an ihre Ergebnisse verändert (vgl. Gl. 2.19).

$$UGR_{Tashiro} = 0,6 \cdot \lg \left[ \frac{0,25}{L_b} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_{eff}^2 \cdot \Omega_s}{P^2} \right] + 5,41 \quad (2.19)$$

Ein wesentlicher Kritikpunkt an ihrem Vorschlag liegt in der Veränderung der UGR-Formel, da diese sich bereits in zahlreichen Anwendungsfällen für konventionelle Leuchten bewährt hat. Außerdem ist unklar, inwiefern sich eine Auflösungsänderung bzw. andere LED-Größen und Distanzen auf ihre Ergebnisse auswirken.

Neben den beschriebenen Vorschlägen zur Erweiterung des UGR-Verfahrens schlagen NAKAMURA et al., OSTERHAUS und DONNERS et al. jeweils zwei neuartige Messverfahren zur Blendungsbewertung für zahlreiche Anwendungsfälle vor, die auf Leuchtdichtebildern basieren [Nak 07; Ost 08; Nak 15; Don 15]. Die Bildverarbeitung beider Verfahren ist angelehnt an die Auflösungsfähigkeit des Auges (vgl. Kap. 2.2.2). Da diese Verfahren jedoch keine Erweiterung des UGR-Verfahrens darstellen und ihre Anwendung auf weitere Studiendaten aussteht, werden sie an dieser Stelle nicht näher diskutiert.

## 2.7 Zwischenfazit

Als Ergebnis dieses Kapitels lässt sich festhalten, dass das UGR-Verfahren aufgrund seiner breiten Anwendungsmöglichkeiten und jahrelangen Erprobung das beste bekannte Verfahren zur Bewertung der psychologischen Blendung in Innenräumen darstellt. Jedoch werden neben der Beeinflussung der Adaptation durch die Blendquelle auch Einflüsse vernachlässigt, die aus der Struktur der Blendquelle resultieren. Dazu zählen der Abstand, die Leuchtdichte und Größe der LEDs sowie die Leuchtdichte und Größe der unmittelbaren Umgebung. Diese Parameter sollen in der vorliegenden Studie für verschiedene Blickrichtungen und Hintergrundleuchtdichten näher untersucht werden. Der Einfluss der Farbtemperatur für weißes Licht stellte sich zumindest bei Leuchtstofflampen als sehr gering heraus und wird daher nicht weiter betrachtet.

Der bisher vielversprechendste Vorschlag zur Erweiterung des UGR-Verfahrens stammt von HARA und HASEGAWA [Har 11]. Ihre Hypothese von der Abhängigkeit des Korrekturfaktors soll deshalb mit Hilfe verschieden strukturierter Leuchtdichteszenen überprüft werden. Im Gegensatz dazu wird der Ansatz von TASHIRO et al. aufgrund seines experimentellen Charakters nicht weiter verfolgt. Alternativ lässt sich gegebenenfalls mit Hilfe der geplanten Studie auch ein Verfahren finden, das unter Berücksichtigung physiologischer Prozesse die Blendung durch LED-Leuchten besser vorhersagen kann.



## 3 Methodik

### 3.1 Präzisierung der Aufgabenstellung und Hypothesen

Wie in Kapitel 2 geschildert, beeinflussen vor allem bei LED-Leuchten zahlreiche Faktoren die psychologische Blendung, von denen nur wenige im UGR-Verfahren berücksichtigt sind. Folglich werden in der vorliegenden Arbeit folgende Blendquellenparameter näher betrachtet:

- Abstand der LEDs
- Anzahl der LEDs
- Leuchtdichte der LEDs
- Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung
- Größe der unmittelbaren Umgebung

Alle Parameter der Blendquelle wurden unter Berücksichtigung verschiedener Blendwinkel und Hintergrundleuchtdichten in einem realistischen Versuchsraum an Probanden dargeboten und variiert (vgl. Kap. 3.2.1). Bei der Wahl der lichttechnischen und geometrischen Verhältnisse wurden typische Leuchten und Bürosituationen berücksichtigt (vgl. Kap. 3.3.1). Zur Überwachung der Reaktion der Probanden während der Untersuchung kam ein Eye-Tracking-System zum Einsatz.

Mit Hilfe der Probandenergebnisse wird schließlich ein messtechnisches Verfahren vorgestellt, welches, angelehnt an das konventionelle UGR-Verfahren, die psychologische Blendung von strukturierten LED-Leuchten in Innenräumen besser vorhersagt. Abgesehen von diesem beschreibenden Verfahren werden in dieser Arbeit allgemeingültige Aussagen über die Blendung durch LED-Leuchten getroffen, die innerhalb der Grenzen der Untersuchung gelten. Dafür wurden nachfolgende Forschungshypothesen formuliert:

1. Die von einer Leuchte ausgehende Blendung steigt mit zunehmendem Leuchtdichtekontrast innerhalb der Leuchte bei gleicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte.
2. Der in Forschungshypothese 1 postulierte Zusammenhang ist bei direktem Blick in die Blendquelle maximal und nimmt mit zunehmendem Blendwinkel ab.
3. Bei gleicher mittlerer Leuchtdichte weisen Leuchten mit großem Lichtquellenabstand mehr Blendung auf.

4. Der gesamte wahrgenommene Blendwert mehrerer LED-Punkte einer Leuchte ist größer als die Summe der wahrgenommenen Einzelblendwerte der LEDs.

Die erste Forschungshypothese ist ähnlich dem Ergebnis vieler bisheriger Untersuchungen. Jedoch haben diese Untersuchungen immer die Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung konstant gehalten. Deshalb wird mit dieser Forschungshypothese untersucht, ob tatsächlich der Leuchtdichtekontrast oder doch die maximale Leuchtdichte die psychologische Blendung beeinflusst. In der zweiten Forschungshypothese wird die vermutete stärkere Blendung kontrastreicher LED-Leuchten im Vergleich zu homogenen Blendquellen detaillierter betrachtet. Dabei werden die in Kap. 2.5 beschriebenen Untersuchungen aufgegriffen sowie der Einfluss der Auflösung des Auges und der rezeptiven Feldgröße auf die Blendung näher analysiert (vgl. Kap. 2.2.2). Mit der dritten Forschungshypothese wird der Vermutung nachgegangen, dass LED-Leuchten aufgrund der orts aufgelösten Struktur der Leuchtdichtepunkte eine höhere Ablenkungswirkung bei weiter entfernten Lichtpunkten aufweisen. Für sehr geringe Blendwinkel konnte dies DONNERS et al. [Don 15] bereits zeigen. Die vierte Forschungshypothese ist angelehnt an die zweite: Bei LED-Leuchten spielen der Hypothese gemäß lokale Fixations- und Verstärkungseffekte eine Rolle bei der psychologischen Blendung, sodass einzelne LED-Punkte mehr stören als die Summe dieser LED-Punkte bzw. eine gleich große, gleich helle, homogene Leuchtfläche.

Zusammenfassend kann man für die Untersuchung folgende Variablenklassifikation festhalten: Als Prädiktorvariable gilt der berechnete UGR-Wert, der mit einer Leuchtdichtemesskamera bestimmt wird. Die Kriteriumsvariable bildet das Blendempfinden der Probanden. Als Kontrollvariablen dienen die Struktur der Leuchte sowie die Position der Leuchte zur Blickrichtung und die Hintergrundleuchtdichte. Dagegen wurden die Lichtfarbe, der Gesamtraumwinkel der Leuchte, die Möblierung, die Raumtemperatur, die Luftfeuchtigkeit sowie die Beleuchtungsdauer und Dunkeldauer während des Probandenversuchs konstant gehalten. Nicht berücksichtigt wurden Tageslicht (kein Tageslicht vorgesehen) und Raumklima.

## **3.2 Untersuchungskonzept**

### **3.2.1 Parametervariation**

Zur Variation der oben genannten Parameter wurde eine Blendquellenanordnung gewählt, welche an die von EBERBACH [Ebe 74] für den mesopischen



Bereich durchgeführte Untersuchung angelehnt ist (vgl. Abb. 3.1). Diese Blendquellenanordnung hat den Vorteil, dass mit relativ wenigen Strukturen viele Vergleiche gezogen werden können. Beispielsweise kommt die gleiche Struktur Nummer 6 in drei Serien vor. Durch Vergleich der Serien 1 und 2 lässt sich die Summation von LED-Lichtquellen auf die Blendung überprüfen (Forschungshypothese 4). Dabei stellt Struktur Nummer 5 die homogen leuchtende Standard-Blendquelle dar. Ein Vergleich innerhalb der 3. Serie ermöglicht Aussagen über den Abstand der LED innerhalb einer Leuchte (Forschungshypothese 3). Mithilfe der 4. Serie wird die Größe und Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung bei LED-Lichtquellen untersucht (Teilaspekt von Forschungshypothese 1). Alle Strukturen wurden bei verschiedenen Blendwinkeln dargeboten, um die Forschungshypothese 2 zu überprüfen.

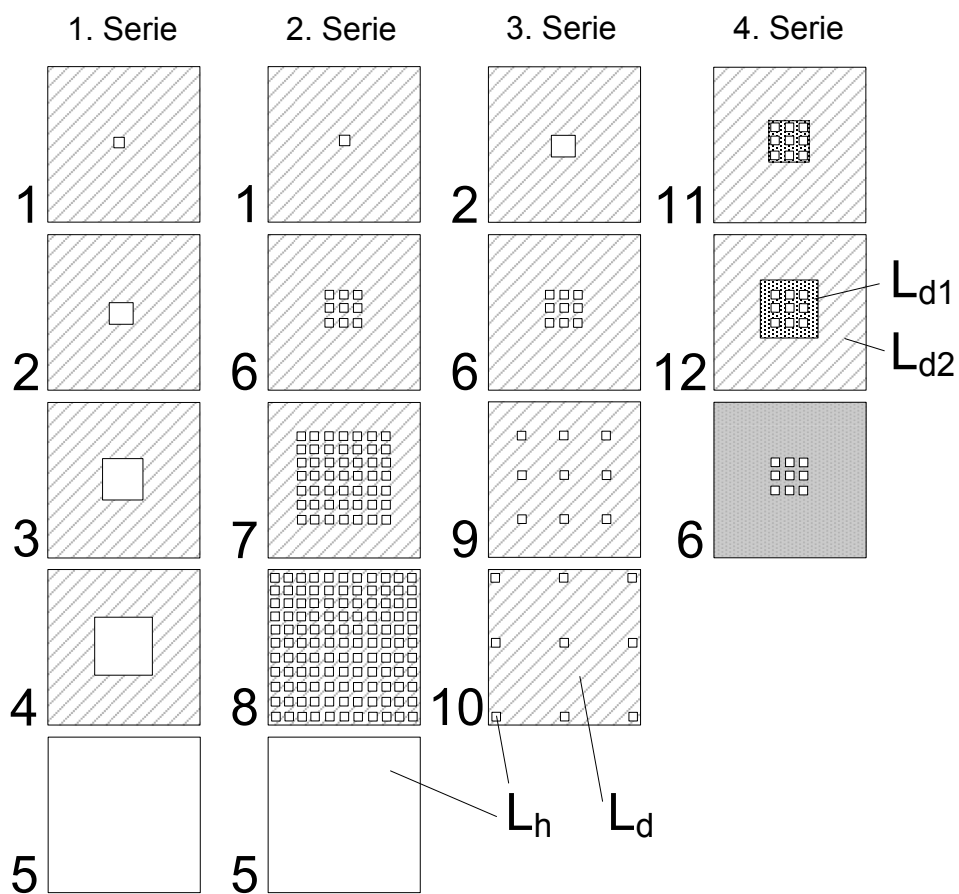


Abb. 3.1 Leuchtdichtestrukturen der Blendquelle in vier Serien geordnet. Die schraffierten Bereiche kennzeichnen die „dunklen“ Bereiche, die gepunkteten Bereiche die unmittelbare Umgebung der LEDs, die weißen symbolisieren die „hellen“ Bereiche der Blendquelle.

Während der Untersuchung wurden den Probanden in zufälliger Reihenfolge verschiedene Strukturen dargeboten, wobei jede Struktur mit unterschiedlichen Leuchtdichten sowohl für die hellen als auch für die dunklen Bereiche der Blendquelle gezeigt wird. Durch den Einsatz eines großen Leuchtdichte- und Kontrastbereichs steigt der Gültigkeitsbereich der Untersuchung. Alle Parametervariationen bzw. Konfigurationen der Blendquelle(n) (vgl. Tab. 3.1 und Anhang A.1) wurden bei mehreren Hintergrundleuchtdichten und Blendwinkeln präsentiert (vgl. Tab. 3.2).

### 3.2.2 Untersuchungsmethode

Für aussagekräftige Aussagen im Anschluss an die Untersuchung sollte die verwendete Untersuchungsmethode ein möglichst hohes Skalenniveau aufweisen. Zur Bildung von Boxplots ist mindestens eine Ordinalskala erforderlich. Wenn Mittelwerte und Standardfehler berechnet werden sollen, wird eine Intervallskala benötigt. Folglich wurde dieses Skalenniveau für die vorliegende Studie angestrebt.

Als Bewertungsmethode für die psychologische Blendung sind zum einen die Verwendung mehrstufiger Bewertungsskalen und zum anderen die Suche nach der „Grenze zwischen Komfort und Diskomfort“ („between comfort and discomfort“, BCD-Methode) üblich.

Die BCD-Methode hat ihren Ursprung vermutlich in der Arbeit von NUTTING [Nut 16; SCHmi 89] und wird heute nur noch selten verwendet (z. B. in [Kim 11; Aka 13]). In ihrer ursprünglichen Form stellt diese Methode ein Herstellungsverfahren dar – der Proband verstellt so lange einen bestimmten Parameter der Blendquelle bzw. des Hintergrunds, bis er die Situation als „zwischen Komfort und Diskomfort“ empfindet. Diese Methode zeichnet sich durch eine relativ lange Versuchsdauer und eine annähernd normalverteilte Streuung der logarithmierten BCD-Leuchtdichte aus [SCHmi 89].

Weitaus häufiger als die BCD-Methode werden vor allem im internationalen Kontext mehrstufige Bewertungsskalen (= Rating-Skalen) für die Blendungsbewertung eingesetzt. Die bekannteste Skala stellt dabei die DE BOER-Skala dar. Diese neunstufige Skala reicht von 1 = „unerträglich“ bis 9 = „keine Blendung wahrnehmbar“. Sie besitzt fünf wörtliche Bewertungen und vier Zwischenstufen. Durch die relativ kleinen Intervalle gibt sie den Probanden eine gute Möglichkeit zur Differenzierung [Bor 05] und besitzt damit zumindest bei Blendungsuntersuchungen in der Straßenbeleuchtung für das Probandenkollektiv von [Ols 84] eine relativ kleine Standardabweichung von ca. einer halben Ur-

teilsbreite [SCHmi 89]. Jedoch ist ihre Aufteilung irreführend für den Probanden: eine höhere Störungsempfindung sollte auch in einer höheren zahlenmäßigen Blendungsbewertung resultieren. Deshalb wird die DE BOER-Skala in den letzten Jahren meist als invertierte Skala (1 = „keine Blendung wahrnehmbar“ bis 9 = „unerträglich“) eingesetzt (z. B. in [Nie 15]). Sie ist vor allem bei Blendungsuntersuchungen von Straßenleuchten und Fahrzeugscheinwerfern die Standardmethode. Im Innenraum existieren im weltweiten Kontext verschiedene Skalen. Diese bewegen sich zwischen vier und elf Stufen [Gut 63; Aka 96; Kim 10; Har 11; Tas 11, Wol 14], meist mit ähnlichen wörtlichen Beschreibungen [Fot 15]. Dabei überwiegen die sieben- und neunstufigen Skalen. Im deutschsprachigen Raum hat sich die siebenstufige SÖLLNER-Skala etabliert [Söl 65; Cie 83], die von 0 = „keine Blendung wahrnehmbar“ bis 6 = „unerträglich“ reicht. Die Standardabweichung der Bewertungsverteilung dieser Urteilsskala beträgt nach [Söl 65; SCHmi 89] im Mittel  $\pm 1$  der Urteilsskala. Weiterhin wurden von HAUBNER und JOHANNI [Hau 70] gezeigt, dass es sich bei der Söllner-Skala um eine intervallskalierte Skala handelt.

Neben der vorgestellten Herstellmethode und mehrstufigen Bewertungsmethode existieren noch andere Bewertungsverfahren und -methoden. Dazu zählen Rangordnungen, Dominanz-Paarvergleiche, Ähnlichkeits-Paarvergleiche, stufenlose Bewertungsskalen und Magnitude-Skalen [Bor 05; Kin 10].

Rangordnungen sind aufgrund des geringen Skalenniveaus nicht geeignet für Blendungsuntersuchungen zur Erweiterung des UGR-Verfahrens.

Die Methode des Paarvergleichs wurde aufgrund ihrer geringen zu erwartenden Streuungen unter anderem von COLLINS, SCHMITS und SCHEIR et al. eingesetzt [Col 62; SCHmi 89; SCHei 15b]. Dabei wurden die Vergleichsblendquellen entweder gleichzeitig [Col 62; SCHei 15b] oder abwechselnd [SCHmi 89] zu der relevanten Blendquelle präsentiert. Bei SCHEIR et al. wurde als Bewertungsskala das Magnitude Estimation Rating (Vergleichsblendquelle gleich 100) eingesetzt. In der dieser Arbeit zugrunde liegenden Studie war nur ein abwechselnder Paarvergleich ähnlich [SCHmi 89] denkbar, da die Blendquelle sowohl in der Peripherie als auch foveal dargeboten wurden. Durch dieses Vorgehen verdoppelt sich jedoch die Versuchszeit, da jedes Mal die Vergleichsblendquelle präsentiert werden muss.

Stufenlose Ratingskalen mit Ober- und Untergrenze bieten nach BORTZ und DÖRING „gute Voraussetzungen für intervallskalierte Ratings“ [Bor 05, S. 178]. Darüber hinaus ist es für eine präzise und effiziente Auswertung sinnvoll, dass die Probanden ihre Urteile selbst am PC durchführen.

Die stufenlose Bewertung ohne Ober- und Untergrenze (Free Magnitude Estimation) wurde für Blendungsversuche erstmals von SCHMITS [SCHmi 89] eingesetzt, da sie in psychometrischen Experimenten meist geringere Streuun-

gen als die üblichen Blendungsbewertungsmethoden aufweist [SCHmi 89]. In seinen Vorversuchen funktionierte die Methode relativ gut, jedoch merkte er an, dass insbesondere unerfahrene Probanden Schwierigkeiten bei der Verwendung der Methode hatten. Die erhoffte Reduzierung der Streuung konnte somit nicht beobachtet werden.

Da die Methode des Paarvergleichs zwar kleinere Streuungen aber eine längere Versuchsdauer im Vergleich zur mehrstufigen Bewertungsmethode aufweist, wurde für diese Studie die SÖLLNER-Skala als intervallskalierte Skala gewählt. Damit wird außerdem eine bessere Vergleichbarkeit mit bisherigen Studien zur Erweiterung des UGR-Verfahrens gewährleistet. Die Vergleichbarkeit zwischen mehreren Blendungsstudien ist generell von hoher Bedeutung. Aus diesem Grund wurden zusätzlich zwei homogene Blendquellenkonfigurationen (vgl. Struktur 5 in Abb. 3.1) vorgesehen.

Neben der Bewertung der Blendung muss für jede Probandenstudie auch die Tätigkeit definiert werden, die der Proband während der Exposition mit der zu bewertenden Lichtsituation ausführt. In vielen Studien wird der Proband dazu aufgefordert, auf einen Fixpunkt am Ende eines Raumes zu blicken. Dadurch bleiben die Blicklinie und der Blendwinkel während der Versuchsdauer annähernd konstant und der Proband kann sich gut auf die geforderte Blendungsbewertung konzentrieren. In diversen Studien wurde jedoch beobachtet, dass die Schwierigkeit der Aufgaben sowohl einen Einfluss auf das Blickverhalten als auch auf die letztliche Blendungsbewertung haben (vgl. Kap. 2.2.2). Da das Blickverhalten insbesondere bei LED-Leuchten in dieser Studie mit untersucht werden soll, müssen für die Untersuchung auch mehrere Aufgaben durch die Probanden ausgeführt werden. In mindestens einer Versuchsreihe soll dabei eine bloße Fixation erfolgen. Für die anderen Versuchsreihen ist es denkbar, die Probanden eine Tätigkeit ausführen zu lassen, die an die typischen Aufgaben an einem Büroarbeitsplatz angelehnt ist. Derartige Tätigkeiten finden meist bei ungefähr horizontalem Blick am Computerbildschirm statt und fordern eine mehr oder weniger ausgeprägte Aufmerksamkeit und mentale Beanspruchung vom Computernutzer ab. Folglich ist es naheliegend, eine solche Tätigkeit oder einen standardisierten Test, der die entsprechende Tätigkeit simuliert, für die Studie zu verwenden.

Weltweit existieren mehrere derartige psychologische Tests, die auch bereits in Beleuchtungsstudien eingesetzt wurden (z. B. der d2-Test, der Konzentrations-Leistungs-Test (KLT) [Bri 02]). Die meisten dieser Tests werden auf Papierbögen ausgeführt, um Geschwindigkeit und Fehlerquote besser beurteilen zu können. Diese beiden Parameter spielen in der geplanten Untersuchung jedoch keine Rolle, weshalb der Test für die Bearbeitung am Computerbild-

schirm angepasst wurde, um den Blick auf den Bildschirm beizubehalten. Für die Computerimplementation bietet sich beispielsweise der KLT an. Beim KLT müssen zwei einfache Rechenaufgaben gelöst und miteinander verrechnet werden, z. B.:

$$2 + 6 - 5 = ?$$

$$1 + 9 + 2 = ?$$

In der Schwierigkeitsstufe C für Kinder bis ca. 12 Jahren muss der kleinere der beiden Werte vom größeren abgezogen werden. In der Schwierigkeitsstufe D für Erwachsene erfolgt eine Fallunterscheidung: Wenn das obere Zwischenergebnis größer als das untere ist, wird das untere subtrahiert, andernfalls werden beide addiert. Das Lösen von KLT-Aufgaben erfordert nach BRICKENKAMP [Bri 02, S. 286] die Koordination folgender Einzeltätigkeiten: Auffassen, Rechnen, Merken, Vorstellen und Entscheiden. Damit spiegelt der KLT typische Büroaufgaben vergleichsweise gut wieder und gleichzeitig bleibt die Blickrichtung der Probanden am Monitor. Aus diesen Gründen wurde der KLT mit Schwierigkeitsstufe C als Hauptsehaufgabe gewählt. Die Schwierigkeitsstufe C ist zwar im eigentlichen psychologischen Test für Kinder konzipiert, jedoch stellte sich in Vorversuchen heraus, dass die Probanden bereits mit dieser Schwierigkeitsstufe hinreichend beschäftigt waren.

Neben dem visuellen KLT wurde auch ein auditiver KLT durchgeführt, der im weitesten Sinne ein Telefongespräch simulieren soll. Die KLT-Aufgaben wurden für diesen Versuch von einer männlichen Computerstimme angesagt. Um den Einfluss der Aufgabenschwierigkeit auf die Blendungsbewertung zu überprüfen, wurde zusätzlich eine einfache Punktsehaufgabe auf dem Monitor dargeboten, um den Blick zu fixieren. In einer weiteren Aufgabe sollte der Proband kurz in die Blendquelle schauen und sein Blendurteil für diese Situation abgeben.

Die Darbietungsdauer einer Lichtsituation orientiert sich somit an der erforderlichen Bearbeitungszeit einer KLT-Aufgabe, damit der Proband ständig den Monitor im Blick behält. Zusätzlich wurde ein während der Vorversuche bestimmter Puffer vorgesehen, damit die Probanden nicht unnötig in Zeitnot geraten und gestresst werden. In Vorversuchen stellte sich eine Zeit von 15 s als geeignet zur bequemen Lösung der Aufgabe und zur Nennung der Blendungsbewertung heraus. Wenn der Proband keinen KLT-Test absolvieren muss, reicht auch eine kürzere Darbietungszeit. Für den Versuch wurde eine Zeit von 7 s ausgewählt. Da die Probanden zuerst das Rechenergebnis und anschließend die Blendungsbewertung nennen, wurde die Blendungsbewertung wie in [Hau 70] von A (keine Blendung) bis G (Blendung unerträglich) abgegeben, um eine Verwechslung der Zahlen zu verhindern.

### 3.3 Untersuchungsaufbau

#### 3.3.1 Anforderungen an den Untersuchungsaufbau

Der Untersuchungsaufbau sollte, ebenso wie die Aufgabe des Probanden während der Untersuchung, möglichst realitätsgetreu umgesetzt werden und außerdem die in Kap. 3.1 beschriebene Variablenklassifikation ermöglichen. Für eine realitätsnahe Gestaltung sollte der Untersuchungsraum büroähnlich gestaltet (Höhe: ca. 3 m, Länge/Breite: jeweils ca. 3...8 m) und die Blendquellen an der Decke des Raums angebracht werden. Die Leuchtdichteverhältnisse in einem typischen Büro sollten ebenfalls eingehalten werden – dunkler Fußboden ( $Q_B = 0,1 \dots 0,5$ ), hellere Wände ( $Q_W = 0,3 \dots 0,8$ ) und eine noch hellere Decke ( $Q_D = 0,6 \dots 0,9$ ) [Nor 11a; Tri 07]. Gemäß EN 12464-1:2011 bewegt sich die Leuchtdichte der Sehaufgabe bei einer horizontalen Beleuchtungsstärke von 500 lx bis 1000 lx und beträgt damit, abhängig vom Reflexionsgrad, zwischen 40 cd/m<sup>2</sup> und 240 cd/m<sup>2</sup>. Die minimale Leuchtdichte der Umgebung soll mindestens ein Drittel der Leuchtdichte der Sehaufgabe aufweisen. In [Ooy 87, S. 156] werden weiterhin optimale Wandleuchtdichten von 20 cd/m<sup>2</sup> bis 60 cd/m<sup>2</sup> und Arbeitsflächenleuchtdichten von 40 cd/m<sup>2</sup> bis 105 cd/m<sup>2</sup> festgehalten.

Weiterhin sollte der Proband aufrecht in diesem Untersuchungsraum sitzen und horizontal auf einen Monitor schauen. Dabei sollten die Blendquellen in möglichst kritischen Blendwinkeln dargeboten werden, um die Blendung durch LED-Leuchten für die kritischsten Situationen zu untersuchen und die Einflüsse der Leuchtdichtestruktur damit besser herauszustellen. Des Weiteren sollten für eine hohe Realitätstreue mehrere Blendquellen dargeboten werden, die jeweils die gleiche Struktur und Helligkeitseinstellung aufweisen.

Im Gegensatz dazu bot es sich aus untersuchungsmethodischer Sicht an, im ersten Schritt nur eine Blendquelle mit einem definierten Blendwinkel zu verwenden. Ebenso mussten die jeweils konstant gehaltenen Variablen präzise eingehalten werden, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Dazu zählen das Sicherstellen einer genauen Blickrichtung, das Bereitstellen einer konstanten Hintergrundleuchtdichte während eines Untersuchungsblocks sowie eine gleichmäßige und farbneutrale Gestaltung des Untersuchungsraums, damit der Blick des Probanden auf dem Monitor fixiert bleibt. Um die Versuche an realistische Bürosituationen anzulehnen, sollten auch Versuchsblöcke mit freiem Blick und variabler Hintergrundleuchtdichte realisiert werden, in denen die Blendquelle die Hintergrundleuchtdichte bestimmt. Bei der Konzeption der Blendquelle war vor allem die Umsetzung der in Abb. 3.1 dargestellten Leuchtdichtestrukturen gefordert. Damit die Blendquelle hinsichtlich ihrer lichttechnischen Eigenschaften ebenfalls möglichst realitätsnah gestaltet wird, wurde im Januar und Februar 2013 eine Marktstudie zu LED-Leuchten in Innenräumen

durchgeführt, um die Anforderungen an die Blendquelle und den Untersuchungsaufbau zu definieren.

In der Marktstudie wurden die LED-Innenraum-Deckenleuchten von großen, europaweit aktiven Leuchtenherstellern hinsichtlich der Eigenschaften ihrer Innenraumleuchten aufgelistet und hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht. Die Herstellersuche erfolgte über den Herstellerkatalog der Lichtsimulationssoftware DIALux®. Zu den untersuchten Leuchten zählten Einbauleuchten (ca. 25 % der gefundenen Leuchtentypen), Anbauleuchten (ca. 25 %), Pendelleuchten (ca. 17 %) und Downlights (ca. 33 %). Schwenkbare Spotlights, Mehrfach-Downlights, Lichtschläuche und Hybridleuchten (bspw. bestehend aus LEDs und Leuchtstofflampen) wurden nicht mit aufgenommen. Als Ergebnis lassen sich folgende Punkte festhalten:

- Abgesehen von den Downlights, welche zu fast 100 % direkt, also ohne Diffusor abstrahlen, weisen die meisten Leuchten (> 70 %) eine diffuse Abstrahlung mit einer Lambert-ähnlichen Lichtstärkeverteilung auf. Bei den verbleibenden direkt abstrahlenden, flächigen Leuchten werden zwischen 5 und 200 LEDs verbaut. Darüber hinaus werden zur Lichtlenkung zunehmend Linsen oder Reflektoren eingesetzt [Düe 13].
- Mehr als die Hälfte der gefundenen LED-Deckeneinbauleuchten besitzen das Format 60 cm x 60 cm bzw. 120 cm x 30 cm. Bei Anbau- und Pendelleuchten sowie Downlights handelt es sich meist um kleinere Leuchten, die entweder rund (Durchmesser: 10 cm bis 50 cm) oder rechteckig (20...120 cm x 20...40 cm) geformt waren.
- Der Leuchtenlichtstrom bewegt sich zwischen 100 lm und 10000 lm, mit einer Häufung zwischen 1000 lm und 4000 lm.
- Die ähnlichste Farbtemperatur (CCT) beträgt meist 4000 K, bei Downlights eher 3000 K. Farbveränderliche Leuchten bilden mit weniger als 10 % Häufigkeit eher die Ausnahme.
- Der Farbwiedergabeindex  $R_a$  [Cie 95a] wurde nicht mit aufgenommen, bewegt sich jedoch, falls er mit angegeben war, meist zwischen 80 und 90.

Aus diesen Ergebnissen lassen sich folgende Anforderungen an die Blendquelle ableiten:

- Bei der Blendquelle soll es sich um eine Deckeneinbauleuchte handeln. Die Gesamtgröße der Blendquelle sollte 60 cm x 60 cm betragen.
- Die Leuchte soll eine annähernd Lambertsche Abstrahlung der hellen und dunklen Bereiche der Blendquelle besitzen.

- Die Leuchte soll einen Lichtstrombereich von etwa 100 lm bis über 10000 lm bereitstellen. Damit lassen sich in Verbindung mit der Lambertschen Abstrahlcharakteristik theoretische UGR-Werte im Bereich kleiner 10 (keine Blendung wahrnehmbar) bis größer als 28 (unerträglich) realisieren (vgl. [Aka 96]).
- Die ähnlichste Farbtemperatur (CCT) der hellen und dunklen Bereiche soll 4000 K betragen.
- Der Farbwiedergabeindex der Leuchte soll  $R_a \geq 80$  betragen.

Des Weiteren wurden noch untersuchungsrelevante Parameter der Leuchte definiert. Dazu zählt die Einstufung des Leuchtdichte- und Kontrastbereichs. Da die Probandenurteile später bei verschiedenen Leuchten-Leuchtdichtekontrasten verglichen werden, bot sich eine Stufung der Leuchtdichtewerte in Zehnerschritten ähnlich [Ebe 74] an. Um klare Aussagen über die Wirkungsrichtung und Linearität der Untersuchungsparameter treffen zu können, wurden jeweils mindestens drei Leuchtdichte- und Kontraststufen präsentiert. In der minimalen LeuchtdichteEinstellung des dunklen Bereichs soll dieser ausgeschaltet sein. In der maximalen LeuchtdichteEinstellung der hellen Bereiche sollen möglichst die maximal vorkommenden LED-Leuchtdichten erreicht werden. Maximal lassen sich mit LEDs Leuchtdichten bis ca.  $2 \cdot 10^7$  cd/m<sup>2</sup> [Osr 10] realisieren. Diese Leuchtdichten kommen in Innenräumen jedoch sehr selten vor, da derart helle LEDs meist keine Lambertsche Lichtstärkeverteilung aufweisen und nicht in Blickrichtung angebracht sind – ihre Leuchtdichte in Beobachterraumrichtung ist somit geringer. Abgesehen davon besitzen die perzeptiven Felder bereits ab Blendwinkeln von ca. 5° eine derartige Größe, sodass diese hohen Leuchtdichten nur in Ausnahmefällen, bei fovealem Blick senkrecht zur Raumdecke, wahrgenommen werden [STra 03].

Weiterhin soll ein präzises Dimmen der hellen und dunklen Bereiche für alle Leuchtdichtestrukturen gewährleistet werden, sodass die eingestellten Leuchtdichten maximal innerhalb der Messunsicherheit des Messsystems abweichen. Das Dimmen der LEDs erfolgt mit Pulsweitenmodulation (PWM), um die Lichtfarbe während der Untersuchung relativ konstant zu halten [Kha 15]. Beim Dimmen mit PWM müssen ausreichend hohe PWM-Frequenzen sichergestellt werden, damit Flimmer-Erscheinungen vermieden werden. In einer Untersuchung von POLIN und KHANH [Pol 13] wurden ab 400 Hz keine Flimmererscheinungen mehr festgestellt. Schließlich muss für alle LEDs und alle wärmebeanspruchten elektronischen Bauteile eine ausreichende Kühlung vorgesehen werden, um Temperatur- und damit Leuchtdichteschwankungen während des Versuchs zu minimieren [Kha 15].



### 3.3.2 Realisierung der Blendquelle

Gemäß der oben genannten Anforderungen sollte die Blendquelle eine hohe Variabilität aufweisen, damit alle in Abb. 3.1 dargestellten Leuchtdichtestrukturen mit einer Blendquelle schnell eingestellt werden können. Aus untersuchungspraktischer Sicht sollte dies elektronisch erfolgen, sodass während des Blendungsversuchs keine aufwändigen mechanischen Arbeiten an der in 3 m Höhe befindlichen Leuchte getätigt werden müssen. Eine wichtige Fragestellung betrifft dabei die Darstellung von sowohl homogenen Leuchtdichtestrukturen als auch punktuell hohen Leuchtdichten. Dafür wurden zwei Konzepte entwickelt, die an dieser Stelle kurz diskutiert werden (vgl. Abb. 3.2 und 3.3).

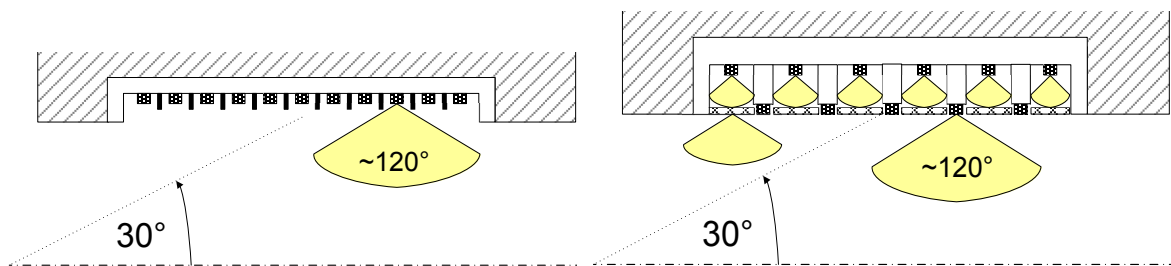


Abb. 3.2 Skizze der Blendquelle zur Variation der Strukturen – Variante A

Abb. 3.3 Skizze der Blendquelle zur Variation der Strukturen – Variante B

Variante A stellt eine Blendquelle mit einer großen Anzahl sehr nah beieinanderliegender LEDs dar, welche einzeln angesteuert werden und in Kombination die geforderten Leuchtdichtestrukturen erzeugen. Besonders kritisch ist die Darstellung von zusammenhängenden Flächen, damit diese auch bei direktem Blick in die Leuchte als homogen wahrgenommen werden können. Als Abhilfe könnte man einen zusätzlichen Diffusor vor den LEDs implementieren, jedoch würden dadurch die zu untersuchende LED-Charakteristik, kleine Lichtpunkte mit hohen Spitzenleuchtdichten, erheblich abgeschwächt. Außerdem sind für die Darstellung einer homogenen Fläche gemäß der Auflösungsfähigkeit des Auges sehr viele LEDs erforderlich. Bei direktem Blick und 1' Auflösung sind für eine 60 cm x 60 cm große Leuchte über 10000 eng beieinanderliegende Singlechip-LEDs (z. B. [Osr 13]) erforderlich.

In Variante B wird dieses Problem durch einen gestuften Aufbau vermieden, indem die homogenen Strukturen maßgeblich durch einen hinterleuchteten Diffusor und die aufgetrennten Strukturen durch weiter hervorstehende, direkt sichtbare LEDs umgesetzt werden. Dadurch benötigt man erheblich weniger LEDs, jedoch sind bei dieser Variante die gleichmäßige Ausleuchtung zusammenhängender Strukturen sowie die Kühlung der direkt sichtbaren LEDs von

hoher Bedeutung, damit deren Distanzstücke keine thermischen und somit lichttechnischen Hystereseeffekte hervorrufen. Insgesamt überwiegen bei Variante B jedoch die Vorteile, da bei Variante A insbesondere das Untersuchungsziel – der Vergleich zusammenhängender und getrennter leuchtender Bereiche – nicht sichergestellt ist.

Der nächste Schritt bei der Entwicklung der Blendquelle betraf die Auswahl der direkt sichtbaren LEDs, welche durch ihre Anzahl und Fläche die Größe der hellen Flächen bestimmen. Damit der Vergleich von separierter und zusammenhängender Fläche für einen weiten Größenbereich gültig ist, wurden unter Berücksichtigung des technischen Aufwands für die größten erhältlichen Multichip-LEDs mit sehr kleiner umgebender Fläche gewählt. Die umgebende Fläche sollte möglichst klein sein, um für die zusammenhängenden Strukturen eine möglichst geringe Abschattung zu erreichen. Bei den entsprechenden LEDs handelt es sich um Bridgelux® BXRA-40E0950-B-00, mit folgenden Merkmalen [Bri 11]:

- max. Lichtstrom  $\approx 1000$  lm
- max. Leistung = 10,5 W
- annähernd Lambertsche Lichtstärkeverteilungskurve (LVK)
- Durchmesser der Leuchtstoffschicht = 19 mm
- CCT = 4000 K
- $R_a \geq 80$ .

Die Anzahl, welche gemäß Abb. 3.1 eine ungerade Quadratzahl sein sollte, wurde auf 121 festgelegt. Damit bleiben die Abstände zwischen den LEDs größer als die LEDs selbst und es bestehen hinreichende Möglichkeiten für eine diffuse Ausleuchtung, auch der unbeleuchteten Teile der Multichip-LEDs. Wenn man den geometrischen Durchmesser des Leuchtstoffs der LEDs als Grundlage für die leuchtende Fläche wählt, ergibt sich damit eine wirksame, leuchtende Gesamtfläche der sichtbaren LEDs von  $0,0343$  m<sup>2</sup>. Die theoretische, mittlere Leuchtdichte der LEDs (Lambertstrahler) ergibt sich aus Gleichung 3.1 [Gal 04, S. 100].

$$L = \frac{\Phi}{A \cdot \pi \cdot \Omega_0} = \frac{1000 \text{ lm} \cdot 4}{(0,019\text{m})^2 \cdot \pi^2 \cdot \Omega_0} = 1,1 * 10^6 \text{ cd/m}^2 \quad (3.1)$$

Jedoch ergeben sich bei der maximalen Aussteuerung aller LEDs ein Lichtstrom von über  $10^6$  lm und eine elektrische Anschlussleistung von über 1000 W – ohne Berücksichtigung der Beleuchtung der dunklen Bereiche. Dieser Größenbereich liegt weit über dem von in der Realität vorkommenden Leuchten und erfordert neben einer entsprechenden Kühlleistung, besonders bei niedrigen angesteuerten Leuchtdichten, eine sehr hohe Auflösung des PWM-Bereichs. Außerdem sollten die mit dem Diffusor beleuchteten Bereiche

ebenfalls die maximalen Leuchtdichten erreichen, was bei über  $10^6 \text{ cd/m}^2$  nur schwer zu realisieren ist, da die Leuchtdichte der umgebenden LEDs durch den Diffusor stark reduziert wird. Folglich werden die erreichbaren Lichtströme und mittleren Leuchtdichten der LEDs durch Absenkung des Konstantstroms auf theoretisch 200 lm bzw.  $2 \cdot 10^5 \text{ cd/m}^2$  reduziert. Damit lassen sich auch ohne Beleuchtung der dunklen Bereiche UGR-Werte von

$$UGR = 8 \cdot \lg \left[ \frac{0,25}{50 \text{ cd/m}^2} \cdot \frac{\left( \frac{0,0343 \text{ m}^2}{0,36 \text{ m}^2} \cdot 2 \cdot 10^5 \text{ cd/m}^2 \right)^2 \cdot 0,02 \text{ sr}}{3,35^2} \right] = 28,1 \quad (3.2)$$

erzielen. Ein UGR-Wert von 28,1 ist für eine Leuchte deutlich oberhalb der in [Nor 11a] für Büros geforderten UGR-Werte. Deshalb wurden die mittleren LED-Leuchtdichten auf  $80000 \text{ cd/m}^2$  für 121 LEDs reduziert. Damit erhält man ohne Berücksichtigung der dunklen Bereiche theoretische UGR-Werte von 21,7 bei  $30^\circ$  Blendwinkel und 30,1 bei direktem Blick in die Leuchte. Wendet man die geplante 10er-Stufung auf diese maximale Leuchtdichte an, ergeben sich mittlere Leuchtdichten von  $8 \cdot 10^4 \text{ cd/m}^2$ ,  $8 \cdot 10^3 \text{ cd/m}^2$  und  $8 \cdot 10^2 \text{ cd/m}^2$ . Niedrigere Leuchtdichten der hellen Bereiche der Blendquelle sind aufgrund der geringen zu erwartenden Blendwirkung nicht sinnvoll. Für die dunklen Bereiche, welche jeweils mindestens um Faktor 10 dunkler sein sollen um einen großen Leuchtdichtebereich abzudecken, resultieren damit  $8 \cdot 10^3 \text{ cd/m}^2$ ,  $8 \cdot 10^2 \text{ cd/m}^2$  und  $80 \text{ cd/m}^2$ . Da in den Messungen festgestellt wurde, dass die tatsächlich leuchtende Fläche der sichtbaren LEDs kleiner ist als angenommen (vgl. Kap. 3.4.1), wurden zusätzlich Leuchtenkonfigurationen mit maximal erreichbaren mittleren LED-Leuchtdichten von  $4 \cdot 10^5 \text{ cd/m}^2$  und entsprechenden Umgebungsleuchtdichten von  $4 \cdot 10^3 \text{ cd/m}^2$  und  $4 \cdot 10^2 \text{ cd/m}^2$  in die Versuchskonzeption mit aufgenommen. Eine Aufstellung der sich ergebenden Leuchtenkonfigurationen ist in Anhang A.1 zu finden.

Nachdem sowohl die Größe als auch die Leuchtdichte der hellen und dunklen Bereiche definiert wurde, konnte als nächstes die Hinterleuchtung des Diffusors ausgelegt werden. Als Diffusormaterial wurde PLEXIGLAS® XT WEIß WN 00770 mit 5 mm Dicke gewählt, welches eine sehr gute optische Durchmischung und eine breite Abstrahlung (etwas breiter als Lambertstrahler) besitzt [Röh 02]. Besonders die optische Durchmischung war für die Ausleuchtung der unbeleuchteten Teile der direkt sichtbaren LEDs wichtig, für welche eine Aussparung im Diffusor angebracht wurde. Als Lichtquelle für die Hinterleuchtung waren prinzipiell verschiedene LED-Fabrikate denkbar. Aufgrund des Aufbaus der Leuchte eigneten sich besonders SMD-LEDs mit 4000 K CCT und einem möglichst breitem Abstrahlwinkel, um die Bauhöhe der Leuchte so niedrig wie möglich zu halten. Da sich die Firma OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH für die Bestückung der Platinen bereit erklärt hatte, wurden 528 OSRAM OSLOM SSL LCW CQAR.EC-MRMT-5L7N-1 gleichmäßig

über die Leuchte verteilt. Dabei wurden der Transmissionsgrad des Diffusors, der Abstrahlwinkel und die höhere Packungsdichte in den hellen Bereichen berücksichtigt. Um die Leuchtdichtestrukturen 2 bis 4 in Abb. 3.1 mit einer klaren Abgrenzung der leuchtenden Fläche darstellen zu können, wurden Trennstege zwischen LED-Platinen und Diffusor angebracht.

Da sich die Gesamtleistung der Leuchte bei maximaler Aussteuerung nun auf  $(121 \cdot 2,1 \text{ W} + 584 \cdot 2,05 \text{ W} = 1718 \text{ W})$  erhöht hatte, musste eine Kühlung vorgesehen werden, welche die Temperatur jeder einzelnen LED auch bei stark schwankenden Leistungsaufnahmen während der Probandenuntersuchung konstant hielt. Hierfür wurde zunächst eine Luftkühlung mit freier bzw. erzwungener Konvektion in Betracht gezogen, welche aufgrund des limitierten Bauraums sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten aufweisen müsste. Diese Strömungsgeschwindigkeiten wären mit einer starken Geräuscentwicklung verbunden. Alternativ würden bei niedrigeren Luftströmen gewisse Einschwingzeiten vor der eigentlichen Blendbewertung zu methodischen Einschränkungen während des Probandenversuchs führen. Deshalb wurde ein wassergekühltes Konzept entwickelt, welches die Wärme jeder sichtbaren LED direkt an der Befestigungsplatte abgreift, um ein Aufheizen des Distanzstücks zu vermeiden und somit Hysteresezeiten zu minimieren.

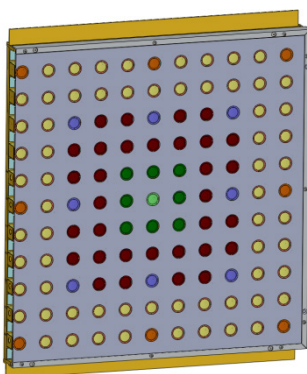


Abb. 3.4 3D-Modell der Blend-Quelle. Links ist der Schnitt durch die Leuchte angedeutet.

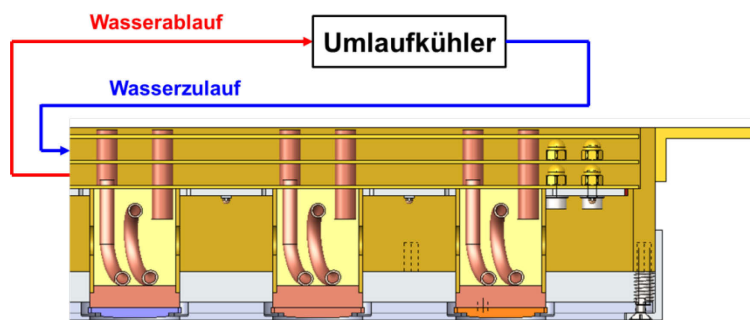


Abb. 3.5 Vergrößerter Schnitt durch das 3D-Modell der Leuchte sowie schematische Wassereinspeisung. Abgebildet sind die Wasserkammern, die Wasser- und Kabelführung, die direkten und indirekten LEDs sowie der Diffusor inkl. Höheneinstellung.

Die ausgeführte, genietete, geschraubte und gelötete Konstruktion (vgl. Abb. 3.4 bis 3.7) sieht zwei Wasserbehälter (Zulauf und Ablauf) innerhalb der Leuchte vor, an die die Kühlleitungen der LEDs parallel angeschlossen sind. Dadurch werden richtungsabhängige Effekte des Zu- oder Ablaufs weitestge-

hend vermieden. Die Spannungsversorgungsleitungen aller LEDs werden durch 121 weitere Kabelkanäle geführt. Diese angelöteten Kabelkanäle erhöhen die Stabilität der Leuchte und reduzieren die Kabellänge innerhalb des beleuchteten Bereichs. Alle mechanischen Elemente, abgesehen von Diffusor, Diffusor-Haltewinkeln und Schrauben, bestehen entweder aus Messing oder Kupfer, um eine gute Lötbarkeit und Wärmeleitfähigkeit zu gewährleisten. Vor der elektrischen Inbetriebsetzung der Leuchte wurden alle lichttechnisch relevanten Flächen mit weißem Klebestreifen überdeckt, um eine Verschiebung des Farborts durch Reflexionen am Leuchtenkörper weitestgehend zu verhindern. Zur Befestigung des Diffusors wurden die Haltewinkel mittels Schraubendruckfedern in der Höhe einstellbar gestaltet, um während der lichttechnischen Vermessung der Leuchte den Abschirmwinkel der sichtbaren LEDs gegebenenfalls zu optimieren. Die Wasserversorgung und -temperierung erfolgt durch den Umlaufkühler LAUDA VARIOCOOL VC 1200, welcher zur Geräuschminimierung in einem anderen Raum untergebracht wurde.

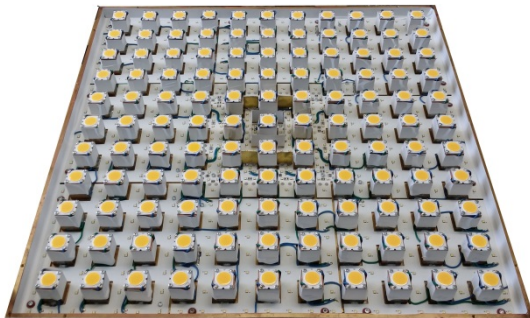


Abb. 3.6 Foto der montierten Leuchte ohne Diffusor. In der Mitte sind die äußeren Trennstegen noch nicht weiß überklebt. (Bildbearbeitung: INGO HERZOG)



Abb. 3.7 Foto der Leuchte mit Steuerungselektronik und Anschluss an den Wasserkreislauf [Mei 14, S. 29] (Bildbearbeitung: INGO HERZOG)

Die Steuerungselektronik der Leuchte wurde auf der Oberseite an drei Befestigungswinkeln angebracht, welche ebenfalls am Kühlkreislauf angeschlossen sind. Die Steuerung wurde im Rahmen einer Masterarbeit [Mei 14] entwickelt, welche vom Verfasser dieser Arbeit betreut wurde. Alle LEDs werden mit Konstantstromquellen betrieben und sind in elf Schaltgruppen aufgeteilt, um die in Abb. 3.1 dargestellten Leuchtdichtestrukturen umsetzen zu können. Die PWM-Dimmung erfolgt jeweils in 4096 Schritten mit einer PWM-Frequenz von 750 Hz über einen Mikrocontroller und die Software LabVIEW mit einem Steuerrechner. Über den Mikrocontroller wurden auch drei Temperatursenso-

ren und fünf Feuchtigkeitssensoren abgerufen, um den Betriebszustand der Leuchte während der Untersuchung zu überwachen [Mei 14].

### 3.3.3 Aufbau des Untersuchungsraums

Die Untersuchungen wurden in einem büroähnlichen Untersuchungsraum (insgesamt 6,6 m x 3,5 m, Höhe 2,8 m) durchgeführt (vgl. Abb. 3.8). Gemäß den in Kap. 3.3.1 beschriebenen Anforderungen wurde die Blendquelle in die abgehängte Decke eingehängt. Der Proband befindet sich 3 m von der Blendquelle entfernt und sieht die Blendquelle bei horizontaler Betrachtung in einem Winkel von 30°. Dieser Winkel wird vom Verfasser als besonders kritisch angesehen, da er im Bereich der in [Lit 03, S. 45] geforderten Abschirmwinkel (0°...30°) liegt. Dadurch ergeben sich als Blendquellenparameter die Werte in Tab. 3.1, welche im Anhang A.1 als Leuchtenkonfigurationen detailliert aufgeführt sind.

Tab. 3.1 Auflistung der Parameterwerte.  $L_h$  Leuchtdichte des hellen Bereichs;  $\omega_s$  Raumwinkel des hellen Bereichs;  $\varphi_{LED}$  Abstand der sichtbaren LED innerhalb der Leuchte (bei Struktur 6, 9 und 10);  $L_d$  Leuchtdichte des dunklen Bereichs

<b>Leuchtdichte</b> $L_h$ (cd/m <sup>2</sup> )	<b>Raumwinkel</b> $\omega_s$ (sr)	<b>Abstand</b> $\alpha_{LED}$ (°)	<b>Leuchtdichte</b> $L_d$ (cd/m <sup>2</sup> )
800	(1 LED) $1,58 \cdot 10^{-5}$	0,0	80
8 000	(9 LED) $1,39 \cdot 10^{-4}$	1,0	400
80 000	(49 LED) $7,74 \cdot 10^{-4}$	2,9	800
400 000	(121 LED) $1,90 \cdot 10^{-3}$	4,8	4 000
	(homogen) $2,20 \cdot 10^{-2}$		8 000

Der Monitor zur Darbietung der KLT-Aufgaben wurde an der gegenüberliegenden Wand angebracht, damit die Blickrichtung des Probanden während der Untersuchung klar definiert blieb. Wie in Abb. 3.8 zu erkennen ist, befand sich der Monitor einmal auf Augenhöhe des Probanden und einmal ca. 1,2 m höher, um den Blendwinkel in weiteren Untersuchungsblöcken auf 15° zu reduzieren und damit Einflüsse der Leuchtdichtestruktur noch deutlicher herauszustellen. Dieses Ziel wurde auch in einem abschließenden Untersuchungsblock (Nr. 5) verfolgt, in dem der Proband aufgefordert wurde, direkt in die Blendquelle zu schauen. Eine Übersicht der Untersuchungsblöcke, die in Abb. 3.8 durch eingekreiste Zahlen symbolisiert werden, ist in Tab. 3.2 zu finden. Die Definition der Hintergrundleuchtdichten orientierte sich an Bedingungen an

realen Arbeitsplätzen (vgl. Kap. 3.3.1). In der ersten Versuchsreihe (Aufgaben 1 bis 5) wurden die Ambientleuchten konstant gehalten. Eine Veränderung der Hintergrundleuchtdichte ergibt sich folglich aus den Indirektanteilen der variierten Blendquelle (vgl. dazu auch Abb. 3.18). Dagegen wurden in der zweiten Versuchsreihe (Aufgaben 6 bis 9) die Ambientleuchten je nach Lichtstrom der Blendquelle reguliert, um eine möglichst gleiche Hintergrundleuchtdichte über alle Leuchtdichtekonfigurationen zu erhalten. Die Variation der „hellen“ ( $L_b > 100 \text{ cd/m}^2$ ) und „dunklen“ ( $L_b \approx 50 \text{ cd/m}^2$ ) Hintergrundleuchtdichte wurde dabei durch variable Wandbehänge und einen unterschiedlich hellen Teppich realisiert. Da der Reflexionsgrad der Decke aus versuchspraktischen Gründen nicht geändert wurde, sind Schwankungen der mittleren Hintergrundleuchtdichte insbesondere bei Aufgabe 9 zu beobachten.

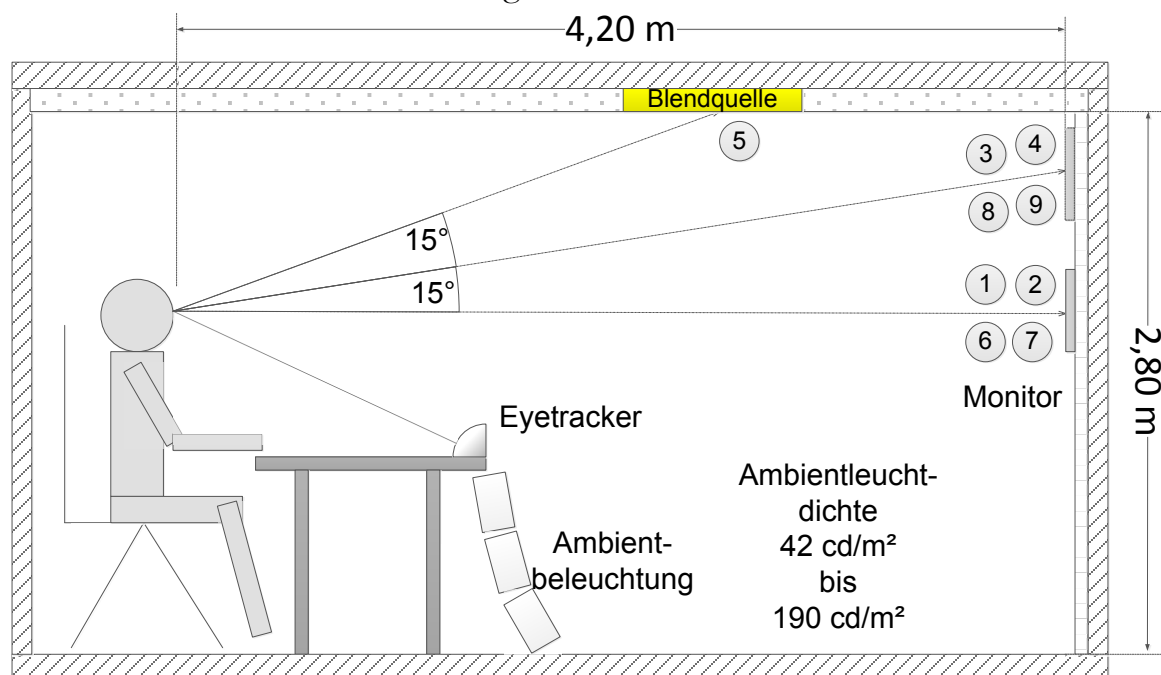


Abb. 3.8 Position des Probanden im Untersuchungsraum. Die Zahlen 1 bis 9 symbolisieren die Aufgabennummern bei den einzelnen Blickrichtungen.

Da die mittlere Hintergrundleuchtdichte im Rahmen des Versuchs separat zum Leuchtenlichtstrom gesteuert werden sollte, wurden zusätzlich neun Ambientleuchten installiert, die für den Probanden nicht sichtbar positioniert wurden. Während im UGR-Verfahren die mittlere Hintergrundleuchtdichte aus dem Halbraum in Beobachterichtung ohne Blendquellen ermittelt wird, wurde in diesem Versuch als Bewertungsbereich für die mittlere Hintergrundleuchtdichte der Bereich von  $\pm 20^\circ$  zur Blickrichtung gewählt (gemäß UGR-Verfahren ohne Berücksichtigung der Blendquelle). In diesem Bereich werden bei inhomogenen Hintergründen gemäß BÖRNER [Bör 14] über 90 % der Adaptations-

leuchtdichte bestimmt. Deshalb wurde besonders in diesem Bereich eine hohe Gleichmäßigkeit angestrebt (vgl. Kap. 3.6). Aber auch für die restlichen sichtbaren Raumbegrenzungsflächen wurden eine gute Gleichmäßigkeit und eine ähnliche Leuchtdichteverteilung aller Leuchtdichtekonfigurationen durch Simulationen mit Software DIALux und Leuchtdichte-Messungen gewährleistet (vgl. Kap. 3.4.1). Eine vollkommen gleichmäßige Ausleuchtung des gesamten sichtbaren Halbraums würde für diese Untersuchung zu einem unverhältnismäßig hohen technischen Aufwand führen, insbesondere wenn die Ambientleuchten nicht sichtbar bleiben sollten. Fünf von diesen Leuchten waren Langfeld-Leuchtstofflampenleuchten (3x PHILIPS TCS287B6Q158I 1x58W/840, 2x PHILIPS TBS411 1x14W/840 HFD D8 PI). Sie wurden zur allgemeinen Aufhellung verwendet. Die anderen vier Leuchten waren LED-Downlights (4x PHILIPS LUX SPACE ACCENT ST520B 1xSLED2000/840 PSD-E 25) zur Aufhellung der Ecken des Raums (vgl. Abb. 3.9 bis 3.12).

Tab. 3.2 Übersicht der Aufgaben, Blickrichtungen und mittleren Hintergrundleuchtdichten. Aufgaben 1 bis 5 bzw. 6 bis 9 wurden jeweils in einer separaten Versuchsreihe durchgeführt.

<b>Aufg. Nr.</b>	<b>Beschreibung der Aufgabe</b>	<b>Dauer</b>	<b><math>\vartheta</math> (Blendwinkel)</b>	<b>Hintergrundleuchtdichte <math>L_b</math></b>
1	KLT visuell	15 s	30°	42...71 cd/m <sup>2</sup>
2	KLT auditiv	15 s	freier Blick	42...71 cd/m <sup>2</sup>
3	KLT visuell	15 s	15°	58...89 cd/m <sup>2</sup>
4	Punkt fixieren	7 s	15°	58...89 cd/m <sup>2</sup>
5	kurzer Blick in die Leuchte	7 s	0°	57...94 cd/m <sup>2</sup>
6	KLT visuell	15 s	30°	42...44 cd/m <sup>2</sup>
7	KLT visuell	15 s	30°	172...190 cd/m <sup>2</sup>
8	KLT visuell	15 s	15°	56...62 cd/m <sup>2</sup>
9	KLT visuell	15 s	15°	161...183 cd/m <sup>2</sup>

Alle Leuchten besaßen eine ähnlichste Farbtemperatur von 4000 K und wurden mit dem Kontrollrechner mittels LabVIEW<sup>®</sup> über DALI (Digital Address-



sable Lighting Interface) angesteuert. Alle Raumbegrenzungsflächen wurden vor der Inbetriebnahme der Leuchten mit farbneutralen Stoffen (Pappe, Vertikallamellen und Teppich) ausgestattet, deren Reflexionsgrade mit Hilfe von Lichtsimulationen in DIALux bestimmt wurden.



Abb. 3.9 Probandin während Aufgabe 1. Oben im Bild ist die Blendquelle auf eine homogene Leuchtdichte von  $8000 \text{ cd/m}^2$  eingestellt.  
(Foto: CHRISTOPH HUPE)



Abb. 3.10 Ambientbeleuchtung gesehen aus Richtung des Monitors  
(Foto: CHRISTOPH HUPE)



Abb. 3.11 Proband während Aufgabe 7. Oben im Bild ist die Blendquelle auf eine inhomogene Leuchtdichtestruktur eingestellt. (Foto: CHRISTOPH HUPE)



Abb. 3.12 Proband während Aufgabe 9. Oben im Bild ist die Blendquelle auf eine inhomogene Leuchtdichtestruktur eingestellt. (Foto: CHRISTOPH HUPE)

In der Nähe des Probanden wurden der Eyetracker und die dafür notwendige Infrarotlichtquelle angebracht (vgl. Abb. 3.9). Zur sicheren Pupillendetektion durch den Eyetracker wurde der Kopf des Probanden mit einer verstellbaren

Kinnstütze fixiert. In der Nähe der Kinnstütze befand sich ein Merkblatt, auf dem die wörtlichen Blendungsbewertungen und deren Zuordnung von A bis G vermerkt waren (vgl. Abb. 3.9 und Abb. 3.26).

### 3.4 Lichttechnische Vermessung des Untersuchungsraums

Zur lichttechnischen Vermessung zählen folgende Aspekte:

- Einstellung der Ansteuerwerte der Blendquelle und der Ambientleuchten
- Vermessung der Langzeitstabilität und Reproduzierbarkeit während des Probandentests
- Bewertung der photobiologischen Sicherheit

**Einstellung der Ansteuerwerte.** Für die Einstellung der Ansteuerwerte muss das Gesichtsfeld der Probanden ortsaufgelöst vermessen werden, um die Soll-Leuchtdichten der Wandflächen und der einzelnen leuchtenden Bereiche der Blendquelle nicht nur hinsichtlich eines bestimmten Punktes, sondern auch hinsichtlich ihrer Gleichmäßigkeit erreichen zu können. Generell bietet sich zur ortsaufgelösten Vermessung eines großen Bereichs eine Leuchtdichtemesskamera (LMK) mit Fischauge-Objektiv an, da hiermit die Leuchtdichteverteilung des gesamten Halbraumes innerhalb von wenigen Sekunden erfasst werden kann. Jedoch ist die Auflösung in Steradian pro Pixel bei der Kombination LMK mit Fischauge-Objektiv begrenzt. Insbesondere bei LED-Leuchten mit sichtbaren LEDs spielt die Messbildauflösung eine entscheidende Rolle. Deshalb wäre es denkbar, ein Objektiv mit größerer Brennweite zu verwenden und die Messbilder anschließend zusammensetzen. Dieses Prinzip wird bei dem an der TU Ilmenau entwickelten Leuchtdichteanalysator angewandt, bei dem eine LMK mit 30 mm-Objektiv von zwei Servomotoren geschwenkt wird und damit den Halbraum in frei konfigurierbarer Auflösung mit High Dynamic Range-Aufnahmen (HDR) abrastert [Wol 04]. Dadurch kann eine sehr hohe Messauflösung erzielt werden. Nachteilig an dieser Lösung ist jedoch die lange Aufnahmedauer und die eingeschränkte Leuchtdichtedynamik, insbesondere bei sehr kontrastreichen LED-Leuchten ( $L_{\max} / L_{\min} = 10^6$ ). Derartige Leuchtdichtebereiche können bei hinreichender Belichtungsdauer nur durch zusammengesetzte Messbilder mit verschiedenen Neutraldichtefiltern (ND-Filter) und HDR-Aufnahmen (HDR) vermessen werden. Folglich wurde zur Vermessung der Begrenzungsflächen des Halbraums eine LMK 5 color mit 8 mm-Objektiv und Fischauge-Vorsatzoptik (ohne ND-Filter) gewählt [Tec 12]. Zur Vermessung der Leuchte wurde ebenfalls eine LMK 5 color der Firma TECHNOTEAM gewählt, hierfür jedoch mit 25 mm-Objektiv, ND-Filter TTF325-3

und Fokusfaktor 0,9813/TT25-19. Der Fokusfaktor dient zur Feineinstellung der Messentfernung, um ein scharfes Bild des Messobjekts zu erhalten. Die Vermessung mit beiden Objektiven erfolgt aus der Position des Probanden, um die Leuchtdichtesituation während des Probandenversuchs zu erfassen (vgl. Abb. 3.13). Bei dieser Entfernung nimmt die Blendquelle mit dem 25 mm-Objektiv ungefähr die Hälfte des Bildfelds ein (vgl. Abb. 3.18). Die Einstellung der Ansteuerwerte der Blendquellenleuchte und der Ambientleuchten erfolgte im Rahmen einer vom Verfasser betreuten Masterarbeit [Mei 14].



Abb. 3.13 Messaufbau zur lichttechnischen Vermessung des Untersuchungsraums [Mei 14, S. 31]

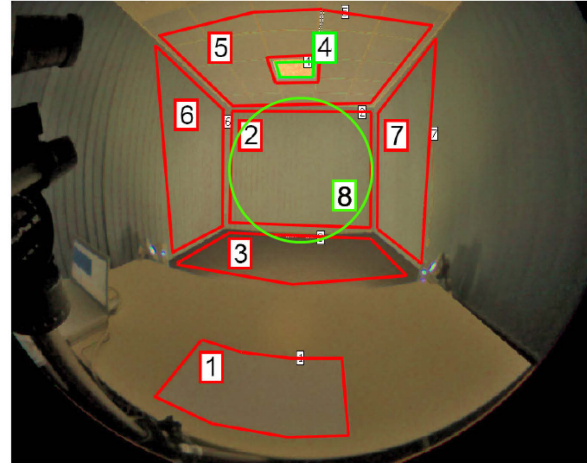


Abb. 3.14 Messregionen zur Leuchtdichtemessung (grün: 4 und 8) und Farbortmessung (rot: 1, 2, 3, 5, 6 und 7) im Halbraum, ähnlich [Mei 14, S. 43]

Aufgrund der Beobachtungen in [Mei 14] wurde die Einstellung der Ansteuerwerte gemäß Anhang A.1 im Anschluss an die Masterarbeit durch Meier im Rahmen einer wissenschaftlichen Hilfstätigkeit angepasst. Beispielsweise zeigte sich, dass die Größe des leuchtenden Bereichs der LEDs in Wahrheit kleiner ist als die entsprechende homogen leuchtende Fläche des Diffusors. Dies hängt zum einen mit dem großen Ansteuerungsbereich der LEDs (von ca. 0,18 % bis ca. 90%) zusammen. Der tatsächliche Leuchtdurchmesser der leuchtenden Fläche der LEDs wurde aus dem entzerrten Leuchtdichtebild ermittelt. Dabei wurde jeweils die Hälfte der mittleren Leuchtdichte einer LED (bzw. etwa ein Drittel der maximalen Leuchtdichte einer LED) als Bestimmungskriterium gewählt. Der Durchmesser beträgt für alle Leuchtdichtestufen ( $8 \cdot 10^2 \text{ cd/m}^2$  bis  $4 \cdot 10^5 \text{ cd/m}^2$ ) ungefähr 20 Pixel und damit 11,5 mm bzw.  $0,296^\circ$  (vgl. Abb. 3.15 und 3.16). Diese Tatsache wird in Kap. 3.6 und 4.1 näher betrachtet.

Neben dem Erreichen einer konstanten homogenen Leuchtdichte im  $\pm 20^\circ$ -Feld wurde auf eine möglichst gleichmäßige Leuchtdichteverteilung der sichtbaren Raumbegrenzungsflächen bzw. der diffusen Bereiche der Blendquelle geachtet (vgl. Abb. 3.17). Während der Einmessung der Blendquelle und der Ambientleuchten wurde auch die Lichtfarbe des Raums aufgezeichnet. In diesen Messungen wurden nur relativ geringe Schwankungen der Farbtemperatur von Blendquelle und Raumbegrenzungsflächen zwischen 3987 K und 4623 K festgestellt [Mei 14], jedoch wurden die gewünschten Leuchtdichte-Inhomogenitäten der Blendquelle deutlich (vgl. Abb. 3.18).

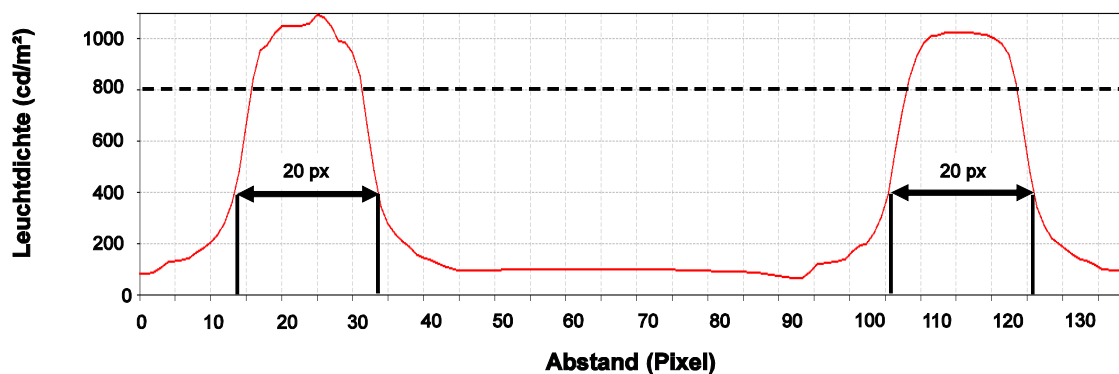


Abb. 3.15 Leuchtdichtebildquerschnitt von Konfiguration 2 (mittlere LED-Leuchtdichte  $800 \text{ cd/m}^2$ )

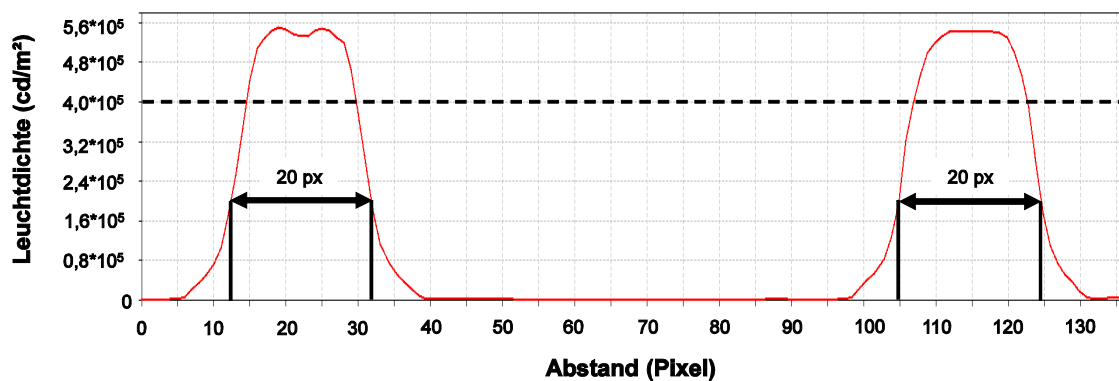


Abb. 3.16 Leuchtdichtebildquerschnitt aus Konfiguration 41 (mittlere LED-Leuchtdichte  $4 \cdot 10^5 \text{ cd/m}^2$ )

Ebenso wie die Einstellung der Ansteuerwerte wurden auch die **Reproduzierbarkeits- und Stabilitätsmessungen** von MEIER [Mei 14] durchgeführt. Dabei wurden die voraussichtlichen Darbietungszeiten des Probandenversuches berücksichtigt. Als Ergebnis wurde festgehalten, dass bei Darbietungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s die Abweichung zum Sollwert aller Leuchtdichteregionen der Blendquelle kleiner als 5 % ist (näheres zur Messunsicherheit in Kap.

3.6). Weiterhin wurden die eingestellten Werte nach Abschluss der Probandenversuche mit der LMK 98-4 überprüft. Die Abweichungen lagen innerhalb der Messunsicherheit der LMK (vgl. Kap. 3.6).

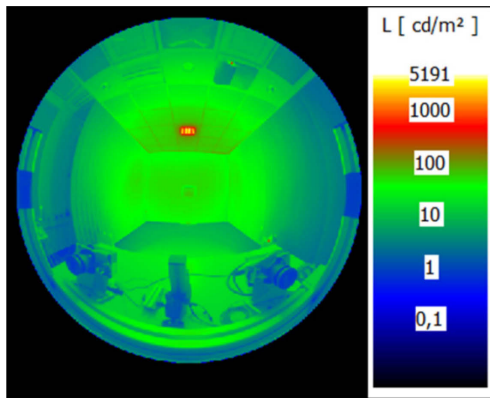


Abb. 3.17 Leuchtdichtebild in Falschfarbendarstellung des Halbraums



Abb. 3.18 Leuchtdichtebild in Falschfarbendarstellung der Blendquelle. Darin ist auch die ungleichmäßige Leuchtdichteverteilung der Einzel-LEDs erkennbar.

Da die Probanden während des Versuchs teilweise sehr hohen Blendbeleuchtungsstärken am Auge ausgesetzt wurden, empfahl sich eine **Bewertung der photobiologischen Sicherheit**. Aufgrund des sehr geringen ultravioletten Anteils des LED-Spektrums [Bri 11, Osr 13] wurde ausschließlich eine Bewertung der photochemischen Netzhautgefährdung (Blaulichtgefährdung) und der thermischen Netzhautgefährdung gemäß der Europäischen Richtlinie 2006/25/EG [Udo 13] durchgeführt. Dafür ist keine komplette Vermessung der Leuchtdichteverteilung der Blendquelle und des Untersuchungsraums notwendig – es genügt die Messung einer einzelnen LED und die Summation der einzelnen LEDs, da die Leuchtdichteverteilung in der Blendquelle bekannt ist. Folglich wurde für diese Untersuchung das Spektroradiometer KONICA-MINOLTA CS2000 mit  $0,1^\circ$  Messwinkel ohne ND-Filter verwendet. Das Gerät wurde ebenso wie die LMK an der Position des Probanden aufgestellt und kann daher als Referenzmessgerät für die LMK-Messung mit 25 mm-Objektiv angesehen werden. In dieser Sicherheitsbetrachtung konnte ermittelt werden, dass der Untersuchungsaufbau sowohl hinsichtlich Blaulichtgefährdung als auch thermischer Netzhautgefährdung unkritisch ist, auch wenn alle 121 direkt sichtbaren LEDs mit den gemessenen  $5,0 \cdot 10^5$  cd/m<sup>2</sup> für 80 Minuten dargeboten werden.

### 3.5 Untersuchungsablauf

Alle 71 Leuchten-Konfigurationen wurden bei sieben verschiedenen Aufgaben blockweise präsentiert, d. h. die nächste Aufgabe wurde erst durchgeführt, wenn alle 71 Beleuchtungssituationen für eine Aufgabe erledigt waren (vgl. Aufgabennummern in Abb. 3.8, sowie Tab. 3.2). Die Aufgaben 1 bis 5 wurden an zwei Untersuchungsterminen (1 und 2 sowie 3, 4 und 5) à 90 Minuten mit Zwischenpausen durchgeführt. Die Aufgaben 6 und 8 wurden nach ca. sechs Monaten mit einem anderen Probandenkollektiv exerziert und sollen in Anlehnung an die Aufgaben 1 und 3 den Einfluss der Variation der Hintergrundleuchtdichte auf das Blendurteil überprüfen. In diesem Zuge wurden auch die Aufgaben 7 und 9 durchgeführt. Dabei wurden jeweils Aufgabe 6 und 7 sowie 8 und 9 an einem gemeinsamen 90-minütigen Untersuchungstermin mit Zwischenpausen durchgeführt (zur Übersicht vgl. Abb. 3.19).

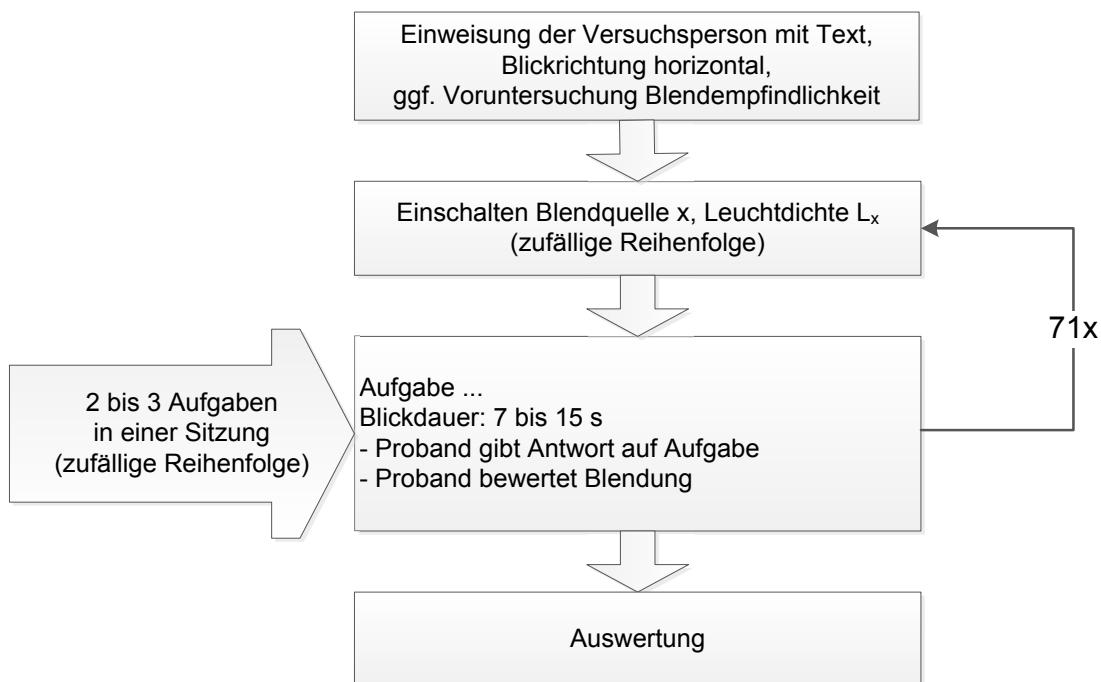


Abb. 3.19 Schema des Untersuchungsablaufs

An jedem Untersuchungstermin wurden den Probanden nach schriftlicher Versuchseinweisung (vgl. Anhang A.2, [SCHmi 89, S. 144]) sowie Einstellung der Kinnstütze und des Stuhls zu Beginn die jeweils hellste und dunkelste Leuchtdichte-Konfiguration zur Abschätzung des zu erwartenden Blendungsbereichs dargeboten. Im Anschluss daran wurde immer ein Vortest mit fünf zufälligen Leuchtenkonfigurationen durchgeführt, dessen Ergebnisse nicht aufgezeichnet wurden, der jedoch zur Akklimatisierung des Probanden an die Umgebungshel-

lichkeit und die Untersuchungsumgebung diente. Anschließend wurde die erste der zwei bzw. drei Aufgaben abgearbeitet. Die Probanden wurden aufgefordert, das Rechenergebnis und direkt im Anschluss die Blendungsbewertung nach Ablauf der Darbietungszeit zu nennen. Dieser Zeitpunkt wurde mit einem Piepton zusätzlich gekennzeichnet. Es war ihnen jedoch auch gestattet, beide Ergebnisse vorher zu nennen und ggf. zu korrigieren, um nicht unnötig Stress aufzubauen. Aus dem gleichen Grund wurde die nächste Beleuchtungssituation erst dargeboten, nachdem der Proband beide Ergebnisse genannt hatte. Die Probanden hatten somit ebenfalls vor Ablauf der 71 Konfigurationen die Möglichkeit, eine Pause einzulegen, was jedoch nur in Ausnahmefällen genutzt wurde.

Nach Ablauf der ersten Aufgabe wurde je nach Untersuchungstermin ein Sehtest, ein Nyktometertest und ein psychologischer Blendempfindlichkeitstest (siehe Kap. 3.8) durchgeführt sowie ein Fragebogen ausgefüllt. Außerdem hatten die Probanden die Möglichkeit, während der Pause bereitgestellte Süßigkeiten und Wasser zu sich zu nehmen.

Bei den Aufgaben 1 bis 5 wurde vor der Darbietung der hellsten und dunkelsten Leuchtenkonfiguration jeweils der Eyetracker kalibriert. Bei den Aufgaben 3, 4 und 8 wurde die Kinnstütze und ggf. der Eyetracker um  $15^\circ$  nach oben bzw. aus Sicht den Probanden nach hinten geneigt, damit der Proband bei Betrachtung des Monitors eine bequeme Position einnehmen konnte. Auch der Monitor wurde in diesen Konfigurationen um  $15^\circ$  geneigt und in Richtung des Probanden verschoben, damit Abstand und Blickwinkel des Monitors zum Probanden konstant blieben.

### **3.6 Unsicherheitsbetrachtung**

Die Unsicherheiten der ermittelten Probandenergebnisse und der geometrischen und lichttechnischen Messwerte lassen sich in folgende Komponenten unterteilen:

- Unsicherheiten der Bewertungsskala
- Unsicherheiten durch technisch bedingte Abweichungen von den Zielparametern
- Unsicherheiten durch Gegebenheiten während der Probandentests
- Messunsicherheiten durch die verwendeten lichttechnischen Messgeräte
- Messunsicherheiten durch die verwendeten geometrischen Messmittel

**Unsicherheiten der Bewertungsskala.** Die verwendete Bewertungsskala gilt als intervallskaliert mit einer Standardabweichung von  $\pm 1$  Wert der Urteilsskala (vgl. Kap. 3.2.2 sowie [Söl 65, SCHmi 89; Hau 70]). Zur Reduzierung der interpersonellen Streuungen wurden die Probandenurteile durch Subtraktion mit dem Probandenmittelwert und Addition mit dem Gesamtmittelwert aller Probanden einer Aufgabe normiert (vgl. Kap. 4.1). Weiterhin wurden die Probandenurteile des Probandenkollektivs in Kap. 4 und 5 entweder als gekerbte Boxplots (inkl. Konfidenzintervalle des Medians) oder als Mittelwert mit Standardfehler angegeben.

**Unsicherheiten durch technisch bedingte Abweichungen von den Zielparametern.** Während der lichttechnischen Vermessung des Untersuchungsraums wurden verschiedene Abweichungen von den Zielparametern festgestellt. Dazu zählen:

- eine kleinere tatsächlich leuchtende Fläche der sichtbaren LEDs
- die Unterschiede und Inhomogenitäten der Hintergrundleuchtdichten aller Aufgaben
- die Abstrahlcharakteristik des Diffusors, welche breiter abstrahlt als ein Lambertstrahler
- Inhomogenität um die direkt sichtbaren LEDs auch bei „homogenen“ Strukturen

Dadurch, dass die *tatsächlich leuchtende Fläche der LEDs* kleiner ist als vorgesehen ( $\frac{(0,0115m)^2 \cdot \pi \cdot \cos 60^\circ}{4 \cdot (3m)^2} = 5,8 \cdot 10^{-6} sr$  anstatt  $\frac{(0,019m)^2 \cdot \pi \cdot \cos 60^\circ}{4 \cdot (3m)^2} = 1,6 \cdot 10^{-5} sr$ ), ergeben sich besonders Probleme beim Vergleich der Serien 1 und 2 aus Abb. 3.1 (aufgelöste vs. zusammenhängende Strukturen). Dies wird in Kap. 4.1 berücksichtigt, indem zu jeder Konfiguration die mittlere Leuchtdichte der gesamten Blendquelle aus der UGR-Formel (Gl. 2.10) ergänzt wird. Außerdem wurden Vergleiche zwischen Struktur 2 und 7 (äquivalente Fläche zu 9 LEDs vs. 49 LEDs) sowie 3 und 8 (äquivalente Fläche zu 9 LEDs vs. 121 LEDs) durchgeführt, da die resultierenden Flächenverhältnisse der Strukturen mit denen der LEDs (geplant/tatsächlich) ähnlich sind (vgl. Kap. 4.1.2).

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit nicht in der Untersuchung der *Inhomogenität der Hintergrundleuchtdichte* liegt, wurden bei der Versuchsdurchführung zum Teil eine hohe Ungleichmäßigkeit sowie Abweichungen der Hintergrundleuchtdichte vom Zielwert in Kauf genommen. In Abb. 3.20 sind die tatsächlichen mittleren Hintergrundleuchtdichten der einzelnen Konfigurationen bei verschiedenen Aufgaben dargestellt.

Darin erkennt man, dass abgesehen von Aufgabe 6 und 8, welche über den gesamten Verlauf eine annähernd gleiche Hintergrundleuchtdichte aufweisen, die



Hintergrundleuchtdichten der weiteren Aufgaben besonders bei den Konfigurationen mit großen Lichtströmen und hohen mittleren Blendquellenleuchtdichten (vgl. Anhang A.1) stark abweichen. Während bei den Aufgaben 1 bis 5 die Änderungen der Hintergrundleuchtdichte durch konstant gehaltene Ambientbeleuchtung bei wechselndem Lichtstrom der Blendquelle zu erklären sind, resultierten bei Aufgabe 7 und 9 die Änderungen der Hintergrundleuchtdichte aus den relativ niedrigen Reflexionsgraden der Decke und des Fußbodens. Diese Reflexionsgrade sollten sich gemäß den Ausführungen in Kap. 3.3.1 und Kap. 3.3.3 von den Wandreflexionsgraden unterscheiden.

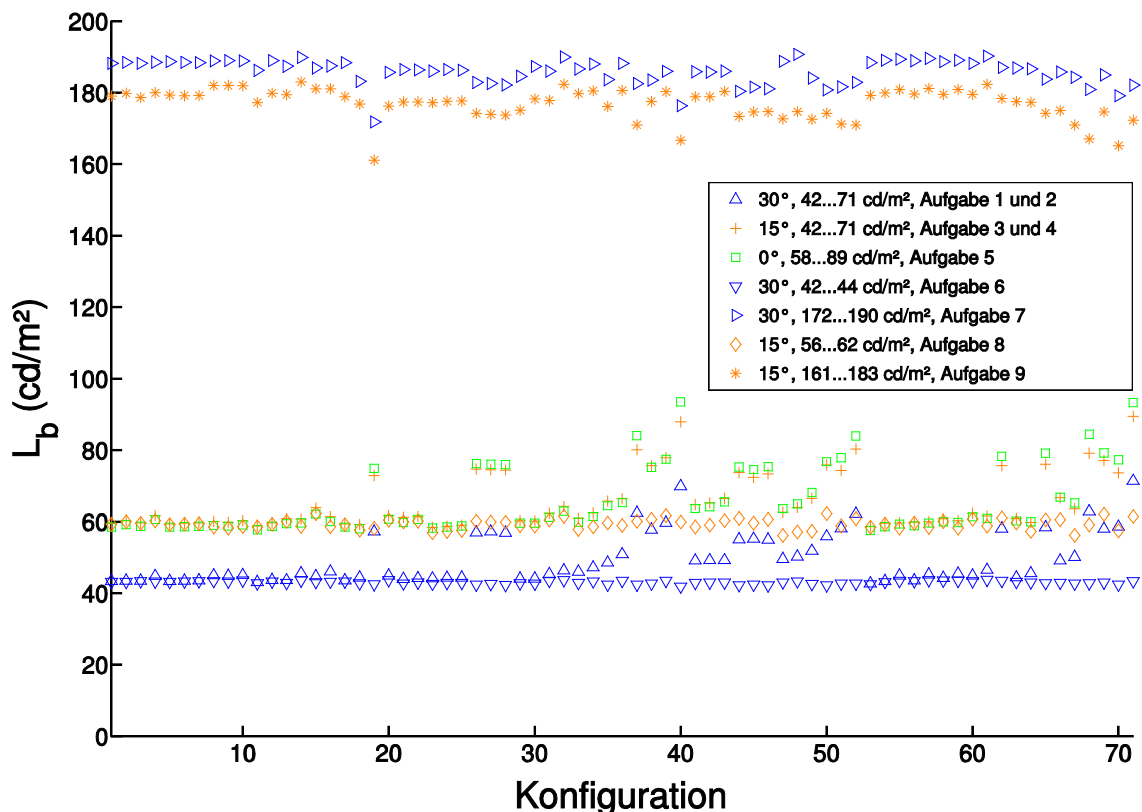


Abb. 3.20 Mittlere Hintergrundleuchtdichten der einzelnen Aufgaben. Die Standardabweichungen der Mittelwerte sind in Tab. 3.3 veranschaulicht.

Die Schwankungen der Hintergrundleuchtdichte wurden bei der Berechnung der UGR-Werte berücksichtigt. Außerdem wurde die Auswirkung dieser Abweichungen durch Vergleich der einzelnen Aufgaben, bspw. Aufgabe 1 und 6 oder 3 und 8, separat untersucht (vgl. Kap. 4.1.3). Die Gleichmäßigkeit der Hintergrundleuchtdichte, ausgedrückt als Standardfehler, lag je nach Konfiguration und Aufgabe zwischen 11,5 cd/m² und 30 cd/m² (vgl. Tab. 3.3 sowie [Mei 14]). Dabei entstand der Großteil der Streuungen durch den dunklen Fußboden (Aufgabe 1, 2, 6, 7) oder die helle Decke (Aufgabe 3, 4, 5, 8) bzw. die „dunklere“ Decke (Aufgabe 7 und 9).

Während der lichttechnischen Vermessung wurde ebenso deutlich, dass der *Diffusor eine breitere Abstrahlcharakteristik als ein Lambertstrahler* aufweist, wie bereits im Datenblatt [Röh 02] erkennbar ist. Dies wurde bei der Einstellung der tatsächlichen Leuchtenleuchtdichten berücksichtigt und hatte daher keinen Einfluss auf die dargebotenen Blendquellenleuchtdichte. Weiterhin wurde während der lichttechnischen Vermessung deutlich, dass *die Fläche um diese direkt sichtbaren LEDs* auch bei „homogenen“ Leuchtdichtestrukturen eine gewisse *Ungleichmäßigkeit* aufweist. Diese Abweichungen konnten trotz mehrerer Optimierungen am Diffusor nicht vollständig beseitigt werden, waren aber vor allem bei peripherem Blick (15°, 30°) nicht erkennbar (vgl. Abb. 3.18 und 3.21).

Tab. 3.3 Auflistung der mittleren Hintergrundleuchtdichten aller Aufgaben sowie mittlerer Standardfehler im Leuchtdichtebild, jeweils unter Angabe des Variationsbereichs

Aufgabe	$L_{b,m,min}$ (cd/m <sup>2</sup> )	$L_{b,m,max}$ (cd/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{Lb,mean}$ (cd/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{Lb,min}$ (cd/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{Lb,max}$ (cd/m <sup>2</sup> )
1	42	71	11,3	10,5	11,7
2	42	71	11,3	10,5	11,7
3	58	89	21,2	15,0	33,0
4	58	89	21,2	15,0	33,0
5	57	94	22,0	16,2	33,4
6	42	44	11,3	10,5	11,7
7	172	190	40,6	35,0	42,4
8	56	62	21,2	15,0	33,0
9	161	183	38,4	36,8	44,3

**Unsicherheiten durch Gegebenheiten während der Probandentests.** Vor und während der Probandenversuche wurden Unsicherheiten durch externe Störeinflüsse weitestgehend minimiert. So wurden Temperaturschwankungen durch gezieltes Lüften reduziert und aufgezeichnet. Die Raumtemperatur betrug 23 °C ± 1 °C. Störende Geräusche oder weitere stressfördernde Einflüsse wurden gemäß Kap. 3.2 ebenfalls ausgeschlossen, indem bei Bedarf individuel-

le Pausen eingelegt wurden. Durch die Anatomie der Probanden entstanden geringfügige Abweichungen hinsichtlich der Augenpositionierung im 3D-Raum (x, y und z sowie drei Neigungswinkel), welche durch den Eyetracker erfasst bzw. im zweiten Versuchsteil mit einem Gliedermaßstab [Eur 04, S. L135/73] kontrolliert wurden. Die Unsicherheit der Augenposition betrug bei allen Probanden ca.  $\pm 2$  cm in allen drei Richtungen und aufgrund der Sehaufgabe (= Monitor) kleiner als  $\arctan \frac{\pm 0,15m}{4,2m} = \pm 2,0^\circ$ .

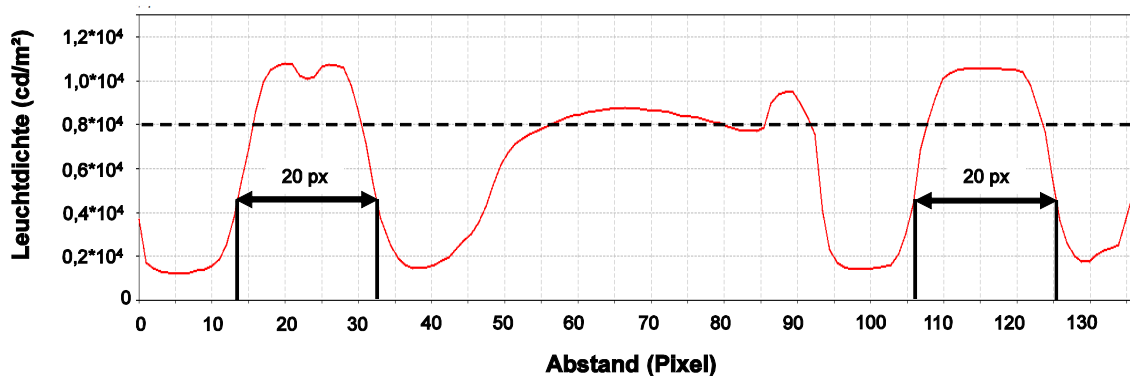


Abb. 3.21 Leuchtdichtebildquerschnitt aus Konfiguration 62 (mittlere Blendquellenleuchtdichte  $8000 \text{ cd/m}^2$ )

**Messunsicherheiten durch die verwendeten lichttechnischen Messgeräte.** Die Messgenauigkeit der LMK 5 color wird mit  $\pm 3 \%$  für Normlichtart A [Tec 12, S. 2] und die des Spektroradiometers CS-2000 mit  $\pm 2 \%$  für Normlichtart A angegeben [Kon 08, S. 87]. Die spektralen Anpassungskennzahlen beider Geräte betragen  $f_1' < 3,5 \%$  [Tec 12, S. 8] bzw.  $f_1' < 3 \%$  [Kon 08, S. 87]. Dennoch existieren nennenswerte Unterschiede zwischen der Messung mit LMK 5 color ( $L_{LED,m} = 4,0 \cdot 10^5 \text{ cd/m}^2$  bzw.  $L_{LED,max} = 5,6 \cdot 10^5 \text{ cd/m}^2$ ) und CS-2000 ( $L_{LED} = 5,0 \cdot 10^5 \text{ cd/m}^2$ ) bei den Konfigurationen 41 bis 52. Diese sind u. a. auf die unterschiedliche Messfeldgröße zurückzuführen (LMK: Auflösung  $0,01070^\circ/\text{px}$ , Messfeldgrößendurchmesser  $0,214^\circ$  im entzerrten Bild bzw. CS-2000: Messfeldgrößendurchmesser  $0,1^\circ$ ). Wendet man den Messwinkel von  $0,1^\circ$  als kreisförmige Fläche auf das nicht entzerrte Leuchtdichtebild der LMK 5 color an (Auflösung  $0,014782^\circ/\text{px}$  bzw.  $6,6 \cdot 10^{-8} \text{ sr/px}$ ), resultieren ebenfalls mittlere Leuchtdichten von  $L_{LED,m} = 5,0 \cdot 10^5 \text{ cd/m}^2 \pm 0,2 \cdot 10^5 \text{ cd/m}^2$  (je nach LED, Messdurchmesser:  $6,7 \text{ px}$ ). Dies entspricht in etwa den Messunsicherheiten der beiden Geräte und beinhaltet auch Variationen der Leuchtdichte bedingt durch Streuungen in der Elektronik. Die Messunsicherheit der geometrischen Größen der LMK 5 color wird aufgrund der zahlreichen Einflüsse (u. a. Fokusfaktor, Sensorgröße und Beschaffenheit des Objektivs) nicht angegeben. Zur Reduzierung der geometrischen Unsicherheiten bei unterschiedli-

chen Entfernungen wurde die Pixelgröße gemäß der Ausführung in [Bla 09; Cai 11; Bla 13] direkt am Versuchsaufbau kalibriert und in enger Abstimmung mit der Fa. TECHNOTEAM eingearbeitet [Tec 15].

### **Messunsicherheiten durch die verwendeten geometrischen Messmittel.**

Schließlich wird an dieser Stelle auch die Messunsicherheit der gemessenen Abstände im Versuchsraum angegeben. Die Abstände wurden mit einem Gliedermaßstab vom Versuchsleiter bestimmt und besitzen eine Unsicherheit von ca.  $\pm 1\%$  inkl. der vom Bediener verursachten Einstellunsicherheiten [Eur 04, S. L135/73]. Damit betragen die Unsicherheiten des Abstands Proband zu Leuchte bzw. Proband zu Monitor  $3\text{ m} \pm 0,03\text{ m}$  bzw.  $4,2\text{ m} \pm 0,03\text{ m}$ . Der gemessene Abstand war jedoch für alle Probanden gleich.

## **3.7 Probanden**

Bei der Auswahl der Probanden wurden lichttechnisch ungeübte Probanden bevorzugt, da diese den Großteil der Bevölkerung ausmachen. Außerdem sollten alle Probanden ungefähr das gleiche Alter aufweisen, um Einflüsse des Alters auf die Blendempfindlichkeit auszuschließen. Wie in Kap. 2.2.2 beschrieben, wurde die Blendungsbewertung von älteren und jüngeren Personen bereits von BENNETT, HARA sowie WOLSKA und SAWICKI untersucht. Folglich war es für die Studie nicht notwendig, ein älteres Probandenkollektiv zu untersuchen [Ben 77; Har 11; Wol 14]. Es sollten jedoch mindestens 20 Personen befragt werden, um die zu erwartende interpersonelle Streuung der Personen bei den Blendungsbewertungen durch statistische Methoden ausgleichen zu können. In den meisten gefundenen Blendungsuntersuchungen wurden zwischen 10 und 40 Probanden, nur in Ausnahmefällen über 100 Probanden befragt (vgl. referenzierte Literatur in Kap. 2). Des Weiteren müssen alle Probanden eine ausreichende Sehschärfe aufweisen, um die Sehaufgaben lesen zu können (vgl. Kap. 3.2). Ebenso konnten aufgrund des Eyetrackers und der möglichen Verschattung der Leuchte durch das Brillengestell keine Brillenträger zugelassen werden.

An der Untersuchung nahmen zwei Probandenkollektive teil. Das erste Kollektiv absolvierte die Aufgaben 1 bis 5 (Versuchsreihe 1). Das zweite Kollektiv, darunter 13 Probanden des ersten Probandenkollektivs, führte die Aufgaben 6 bis 9 durch (zweite Versuchsreihe). Alle Probanden hatten einen Visus von mindestens 0,6 für die Entfernungen 0,5 m und 4,2 m. Dieser Visus war ausreichend um die Schrift auf dem Monitor, die Blendungsskala auf dem Papier und die einzelnen LEDs in der Blendquelle bei fovealem Blick sicher erkennen

zu können (s. Kap. 3.8). Außerdem erhielten alle Probanden eine Aufwandsentschädigung.

Mit Probandenkollektiv 1 wurden 30 Probanden (13 Frauen, 17 Männer) untersucht, davon waren vier Mitarbeiter am Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau (Alter von 33 bis 54 Jahre). Die verbleibenden 26 Probanden waren lichttechnisch ungeübt und wiesen eine Altersstruktur von 20 bis 33 Jahren auf (Mittelwert 25,1 Jahre). Aufgrund des Eyetrackers konnten keine Brillenträger für die Untersuchung herangezogen werden (vgl. Kap. 3.3). Acht Personen trugen Kontaktlinsen während der Untersuchung. Beim Probandenkollektiv 1 wurden der Nyktometertest, der Fragebogen, die subjektive Einstellung einer „störenden“ Blendquelle sowie die Eyetracking-Untersuchung durchgeführt.

Probandenkollektiv 2 bestand ebenfalls aus 30 Probanden (15 Frauen, 15 Männer), davon waren vier Mitarbeiter am Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau (Alter von 36 bis 53 Jahre). Die verbleibenden 26 Probanden waren lichttechnisch ungeübt und wiesen eine Altersstruktur von 22 bis 28 Jahren auf (Mittelwert 24,5 Jahre). Fünf Probanden trugen Kontaktlinsen während des Tests. Obwohl bei den um sechs Monate versetzten Untersuchungsterminen kein Eyetracker mehr eingesetzt wurde, sollten auch hier keine Probanden mit Brille herangezogen werden. Ebenso wurden bei Probandenkollektiv 2 außer dem Sehtest keine weiteren Voruntersuchungen durchgeführt, da diese sich nur wenig zur Reduzierung der Probandenstreuungen erwiesen hatten (vgl. Kap. 3.8).

### **3.8 Voruntersuchungen zur Blendempfindlichkeit**

Die Voruntersuchungen zur Blendempfindlichkeit sollten Auskunft darüber geben, wie stark die physiologische und psychologische Blendsensibilität einzelner Versuchspersonen ausgeprägt ist. Diese wurde anschließend mit den Blendungsbewertungen verglichen. Für die Blendungsuntersuchung waren vor allem die psychophysiologischen, visuellen Merkmale und das Verhalten der Probanden während der Untersuchung relevant. Dazu zählen:

- die Sehschärfe der Probanden für nahe und entfernte Objekte
- die generelle physiologische Blendempfindlichkeit
- die generelle psychologische Blendempfindlichkeit
- die mittlere Größe und Variation des Pupillendurchmessers während des Tests
- die Lidschlagrate und Blickbewegungen der Probanden während des Tests

Die Anforderungen an die **Sehschärfe** waren insgesamt relativ niedrig, da die Probanden lediglich die Zahlen auf dem Monitor (Sehschärfe in der Ferne, Schrifthöhe 0,77°) und den Text auf dem Merktzettel (Sehschärfe im Nahbereich 0,5 m, Schrifthöhe: 0,97°) erkennen mussten. Beide Schriften wurden möglichst groß dargestellt, weshalb ein Visus von 0,6 ausreichte. Zwar wirkt sich der Visus auch auf die mögliche Diskriminationsfähigkeit der LEDs, jedoch waren die bei direktem Blick in die Leuchte für alle Probanden deutlich erkennbar. Bei peripheren von 15° oder 30° Blick spielen kleine Sehschwächen nur eine untergeordnete Rolle. Um die Sehschärfe der Probanden zu erfassen, bot sich ein Sehtestgerät (z. B. RODENSTOCK R22) oder die Darbietung von mehreren Landoltringen in den entsprechenden Entfernungen an. Dies hat weiterhin den Vorteil, dass die Sehschärfe bei der tatsächlichen Hintergrundleuchtdichte und den tatsächlichen Kontrasten gemessen wird. Folglich wurde dieses Prinzip im Vortest eingesetzt: Die Probanden mussten bei acht Landoltringen, welche einen Öffnungswinkel von 1,7° besaßen und in acht verschiedenen Richtungen geöffnet waren, mindestens sechs richtige Öffnungen zuordnen. Alle Probanden haben den Sehtest bestanden.

Da das subjektive Blendempfinden der Probanden ebenfalls durch die **allgemeine physiologische Blendempfindlichkeit** beeinflusst wird, wurde auch diese aufgezeichnet. Die physiologische Blendempfindlichkeit ist abhängig von der Augenfarbe, der Linsentrübung, der Anzahl von Streuzentren im Auge und anderen physiologischen Merkmalen im Auge (vgl. Kap. 2.2). Die Augenfarbe der Probanden in Versuchsreihe 1 ist in Abb. 3.22 zu finden.

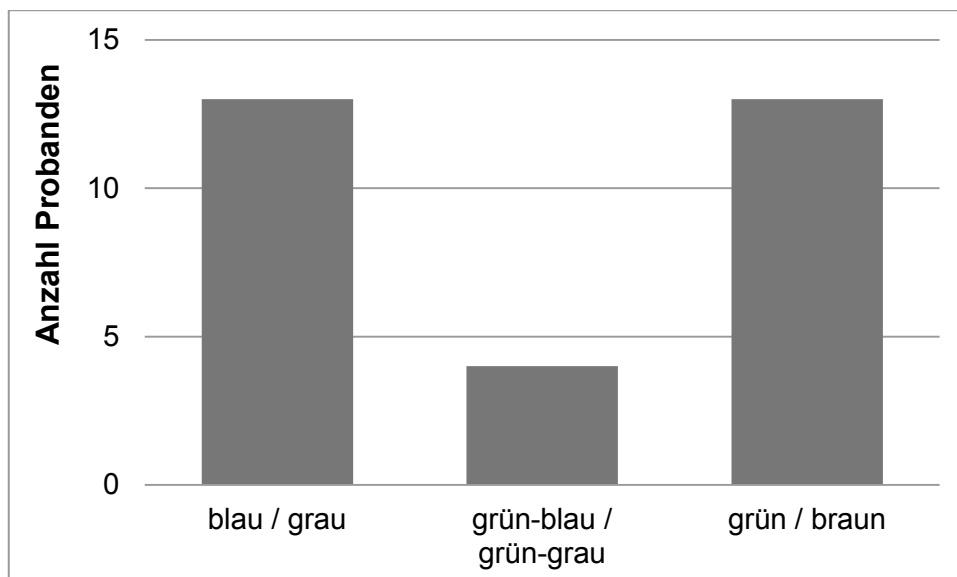


Abb. 3.22 Verteilung der Augenfarbe der Probanden bei Versuchsreihe 1

In der Regel nehmen im Alter die Linsentrübung sowie die Anzahl der Streuzentren zu, weshalb für die Studie ein, hinsichtlich des Alters, klar definiertes Probandenkollektiv angestrebt wurde (vgl. Kap. 3.7). Deren physiologische Blendempfindlichkeit konnte mit einem Nyktometer (z. B. RODENSTOCK NYKTOMETER 500) oder einem Mesoptometer (z. B. OCULUS MESOTEST II) untersucht werden. Beide prüfen „die Unterschiedsempfindlichkeit durch Veränderung des Testzeichenkontrastes gegenüber dem Umfeld mit und ohne Blendung“ bei mesopischer Adaptation [Bur 14, S. 67f.]. Beide Geräte sind sehr ähnlich in Handhabung und resultierenden Ergebnissen. Da für das RODENSTOCK NYKTOMETER 500 keine PC-Schnittstelle notwendig ist, wurde es für den Probandentest ausgewählt. Dieses wurde vom Fachgebiet Augenoptik der Ernst-Abbe-Hochschule Jena für die erste Versuchsreihe kostenfrei bereitgestellt. Nach einer zehnmütigen Dunkeladaptationsphase mussten die Probanden die Orientierung von Landoltringen nennen. Falls sie bei einem Testzeichen nicht in der Lage waren, die Orientierung zu bestimmen, wurden vom Versuchsleiter schrittweise Optikschieber (-0,5 dpt, -1,0 dpt und -1,5 dpt) zum Ausgleich der Dämmerungsmypie eingesetzt. In der durchgeführten Voruntersuchung galt ein Proband als physiologisch blendempfindlich, wenn er bei monokularer Betrachtung mindestens drei Sehzeichen bei Blendung weniger erkannt hat als ohne Blendung. Dies traf auf 5 von 30 Probanden zu. Weiterhin wurde im Rahmen des Nyktometertests deutlich, dass einige Probanden ein mangelhaftes Dämmerungssehvermögen besitzen (vgl. Abb. 3.23).

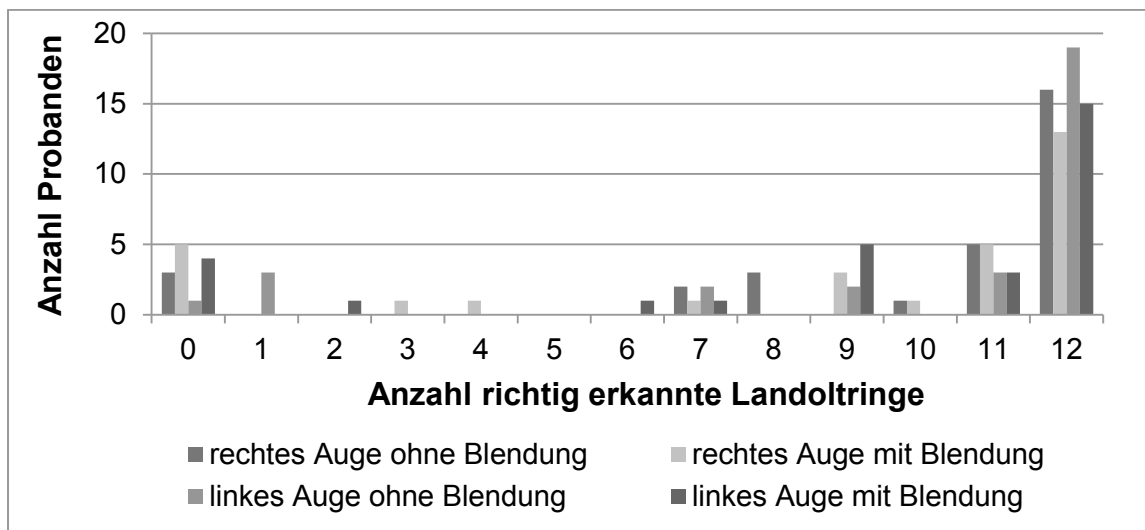


Abb. 3.23 Verteilung der richtig erkannten Landoltringe der Probanden beim Nyktometertest bei Versuchsreihe 1

Die generelle **psychologische Blendempfindlichkeit**, also wie stark sich Personen im Allgemeinen durch helle Lichtquellen gestört fühlen, kann nur

schwer ermittelt werden (vgl. Kap. 2.2). Dennoch bestehen mehrere Möglichkeiten, um die allgemeine psychologische Blendempfindlichkeit abzuschätzen. Zum einen können die Probanden einen Fragebogen ausfüllen, in welchem sie selbst Einschätzungen zu ihrer Blendempfindlichkeit treffen (z.B. „Fühlen Sie sich häufig im Alltag geblendet?“, „Inwiefern würden Sie sich als blendempfindlich bezeichnen?“). Diese Fragen wurden ebenso wie die siebenstufige Skala des Fragebogens aus dem LiTG-Fragebogen zur Bewertung von Lichtsituationen [Moo 15] übernommen. Eine Übersicht der weiteren Antworten auf die blendungsrelevanten Fragen im Fragebogen ist in Abb. 3.24 und 3.25 dargestellt. Beim Vergleich der Antworten auf die beiden blendungsrelevanten Fragen wurde weiterhin beobachtet, dass die Häufigkeit der Blendempfindung eines einzelnen Probanden relativ gut mit der Selbsteinschätzung zur Blendempfindlichkeit übereinstimmte ( $R^2 = 0,47$ ). Deshalb wird im Folgenden nur die Selbsteinschätzung zum Vergleich mit anderen Größen herangezogen.

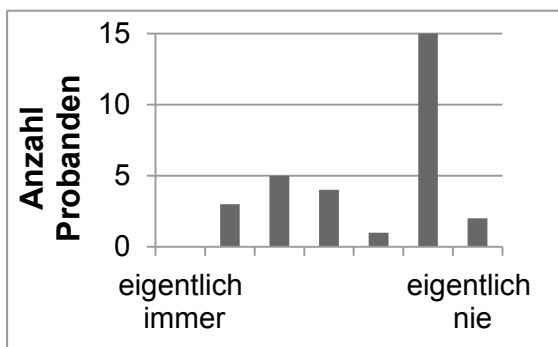


Abb. 3.24 Verteilung der Antworten auf die Frage: „Fühlen Sie sich häufig im Alltag geblendet?“

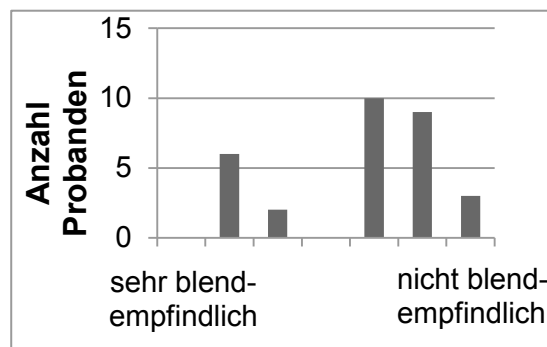


Abb. 3.25 Verteilung der Antworten auf die Frage: „Inwiefern würden Sie sich als blendempfindlich bezeichnen?“

Als weitere Methode zur Bestimmung der psychologischen Blendempfindlichkeit kann man den Probanden Referenzsituationen darbieten, welche die Probanden hinsichtlich Blendung bewerten sollen. Um hierbei nicht in Konflikt mit der eigentlichen Hauptuntersuchung zu kommen, wurde für diesen Vergleich eine andere Bewertungsmethode eingesetzt. So bot sich das Einstellen einer Blendquelle an, bei der die Probanden die Helligkeit solange erhöhen, bis sie die Blendquelle als unangenehm empfinden (vgl. Abb. 3.26 und 3.27).

Dabei betrug der Schwinkel der LED 0,001 sr und die Hintergrundleuchtdichte 20 cd/m<sup>2</sup>. Um zu beurteilen, wie hoch die psychologische Blendempfindlichkeit der Probanden ist, wurden Antworten des Fragebogens mit den eingestellten LED-Leuchtdichten korreliert (vgl. Abb. 3.28).



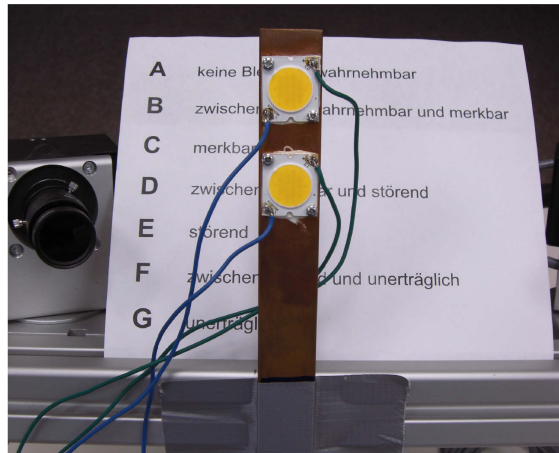


Abb. 3.26 Untersuchungsaufbau zur Einstellung der Blendquelle bei direktem Blick in die LED. Der Proband drehte mit einem Netzteil die Spannung der oberen LED so lange auf, bis er sie als unangenehm empfand.

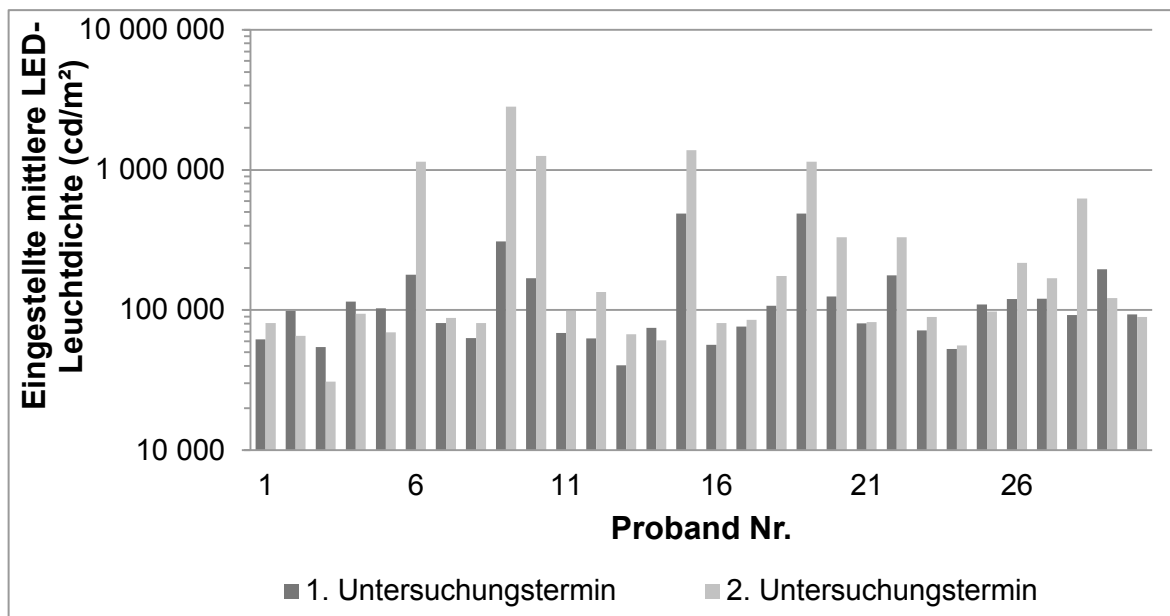


Abb. 3.27 Verteilung der eingestellten mittleren LED-Leuchtdichten während des 1. und 2. Untersuchungstermins als Mittelwert aus jeweils drei eingestellten Werten. Die mittleren LED-Leuchtdichten sind jeweils auf eine kreisrunde leuchtende Fläche mit Durchmesser 11,5 mm bezogen. Der relative Standardfehler während eines Untersuchungstermins war in 45 von 60 Fällen kleiner 20 % und betrug maximal 100 %.

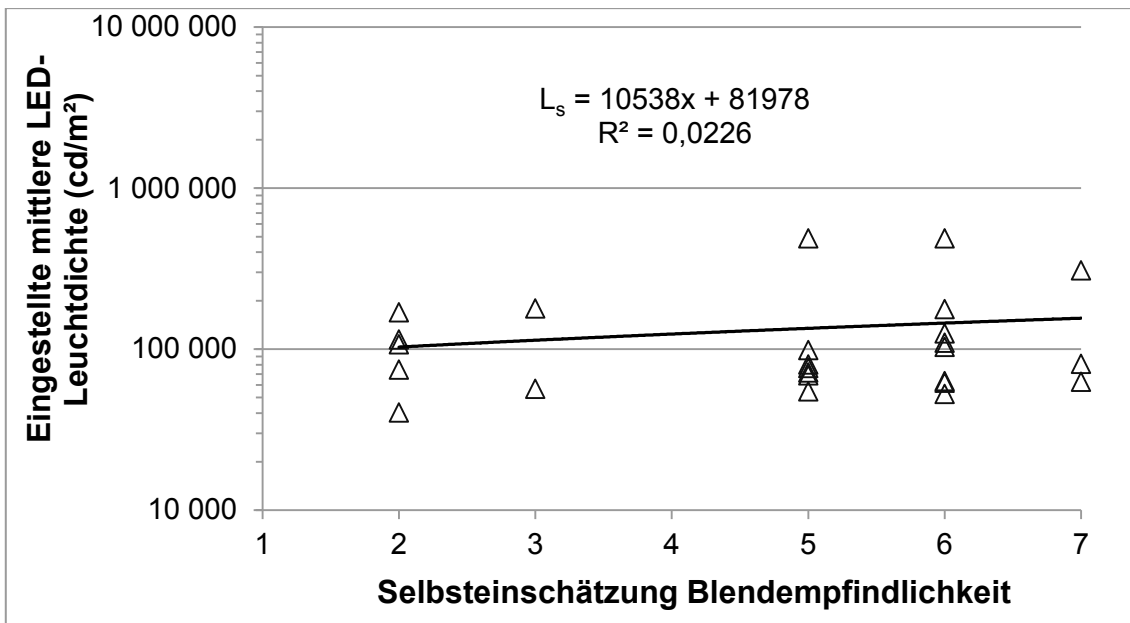


Abb. 3.28 Korrelation von eingestellten mittleren LED-Leuchtdichten (1. Untersuchungstermin) und Selbsteinschätzung der Blendempfindlichkeit (vgl. Abb. 3.25). Die mittleren LED-Leuchtdichten sind jeweils auf eine kreisrunde leuchtende Fläche mit Durchmesser 11,5 mm bezogen.

Dabei wird deutlich, dass nur ein sehr schwacher Zusammenhang zwischen beiden Größen besteht. Deshalb müssen beide Größen bei der Bewertung der generellen subjektiven Blendempfindlichkeit berücksichtigt werden.

Zur Bestimmung der Pupillengröße und damit der tatsächlichen Blendbeleuchtungsstärke auf der Retina werden in der Regel Kamerasysteme oder Eyetrackingsysteme eingesetzt. Hierbei sind Eyetrackingsysteme meist wesentlich genauer hinsichtlich zeitlicher und geometrischer Auflösung der berechneten Pupillengröße [Kle 10]. Außerdem lassen sich mit professionellen Eyetrackern auch die Blickbewegungen der Probanden aufzeichnen [Kle 10]. Dadurch können Rückschlüsse auf die tatsächliche Blickrichtung und die Lidschlagfrequenz der Probanden bei unterschiedlichen Leuchtdichtestrukturen / mittleren Blendquellenleuchtdichten treffen. Gemäß Kap. 2.2 existieren mehrere Theorien zur Ursache von psychologischer Blendung. Inwiefern sich diese in einer Blendungsstudie mit Eyetracking ausdrücken, wurde in einer vom Verfasser betreuten Masterarbeit untersucht [Hup 15]. Darin wurden die nachfolgenden Anforderungen an den Eyetracker formuliert. Der Erfassungsbereich der Blickbewegungen sollte mindestens  $\pm 30^\circ$  (vertikal und horizontal) betragen, damit alle Blickbewegungen erfasst werden. Die Blickrichtungsgenauigkeit sollte kleiner als  $\pm 0,50^\circ$  oder besser  $< \pm 0,25^\circ$  betragen, damit aus den Variatio-

nen der Blickrichtungen Sakkaden und Fixationen abgeleitet werden können. Aus diesem Grund wurde die Abtastfrequenz ebenfalls mit mindestens 60 Hz, besser 120 Hz sowie die Latenz kleiner 35 ms angegeben. Dadurch lässt sich auch die Variation der Pupillengröße zeitlich hochaufgelöst darstellen. Die Genauigkeit der Pupillengröße wird bei Eyetrackingsystemen selten angegeben, jedoch kann sie aufgrund des Detektionsverfahrens (Hell-Dunkel-Kante) als hinreichend präzise (Präzision  $< 0,2$  mm, Genauigkeit  $< 0,5$  mm) angenommen werden. Dies wurde für den Eyetracker TOBII 1750 in [Kli 10] gezeigt. Des Weiteren sollte der Eyetracker Kopfbewegungen im Bereich von mindestens  $\pm 10$  cm in alle Richtungen ausgleichen können, um auf eine Kinnstütze verzichten zu können. Weiterhin sollte ein stationärer Eyetracker verwendet werden, damit Interaktionen der Blendquelle mit dem Eyetracker vermieden werden. Da nur wenige Eyetracker die oben genannten Anforderungen, insbesondere den großen Erfassungsbereich und die hohe zeitliche Auflösung, erfüllen, wurde der INTEGRATED EYETRACKER des Fraunhofer-Instituts für digitale Medientechnologie (IDMT) in Ilmenau ausgewählt. Dieser wurde seitens des Fraunhofer IDMT für die erste Versuchsreihe kostenfrei zur Verfügung gestellt. Durch den Eyetracker mussten jedoch zwei methodische Einschränkungen unternommen werden. Die Probanden mussten mit einer Kopfstütze fixiert werden, da die Pupillendetektion bereits bei geringen Kopfbewegungen nicht mehr angemessen funktionierte. Außerdem wurden durch die Parametrierung der Pupillendetektionen zum Teil Brillengestelle fälschlicherweise als Pupille detektiert, weshalb in der Untersuchung keine Brillenträger zugelassen werden konnten. Dies hatte jedoch den Vorteil, dass kein Brillengestell die Blendquelle (partiell) verdecken konnte.

Um die Auswirkung der Leuchtdichtestruktur und mittleren Blendquellenleuchtdichte auf die **Pupillengröße, Lidschlagfrequenz und Blickbewegungen** der Probanden zu analysieren, wurden exemplarisch jeweils zwölf dunkle Leuchtenkonfigurationen und zwölf helle Leuchtenkonfigurationen ausgewählt. Die dunklen Leuchtdichtekonfigurationen (1-12) besitzen jeweils mittlere Blendquellenleuchtdichten von  $98 \text{ cd/m}^2$  bis  $719 \text{ cd/m}^2$  und die hellen (37-71) jeweils von  $4181 \text{ cd/m}^2$  bis  $13011 \text{ cd/m}^2$ . Da die **Pupillengröße** nicht direkt mit dem Blendempfinden bei statischen Situationen korreliert (vgl. Kap. 2.2), wurde diese in der Arbeit von HUPE nicht ausgewertet. Dennoch werden die mittleren Pupillengrößen der Probanden bei den einzelnen Aufgaben an dieser Stelle aufgeführt (vgl. Abb. 3.29 und 3.30). In diesen Diagrammen wird deutlich, dass bei der durchgeführten Untersuchung ein Zusammenhang zwischen mittlerer Blendquellenleuchtdichte und Pupillengröße vorliegt. Dies kann durchaus mit der relativ kurzen Darbietungsdauer einer Leuchtenkonfiguration von 8 s bis 15 s zusammenhängen.

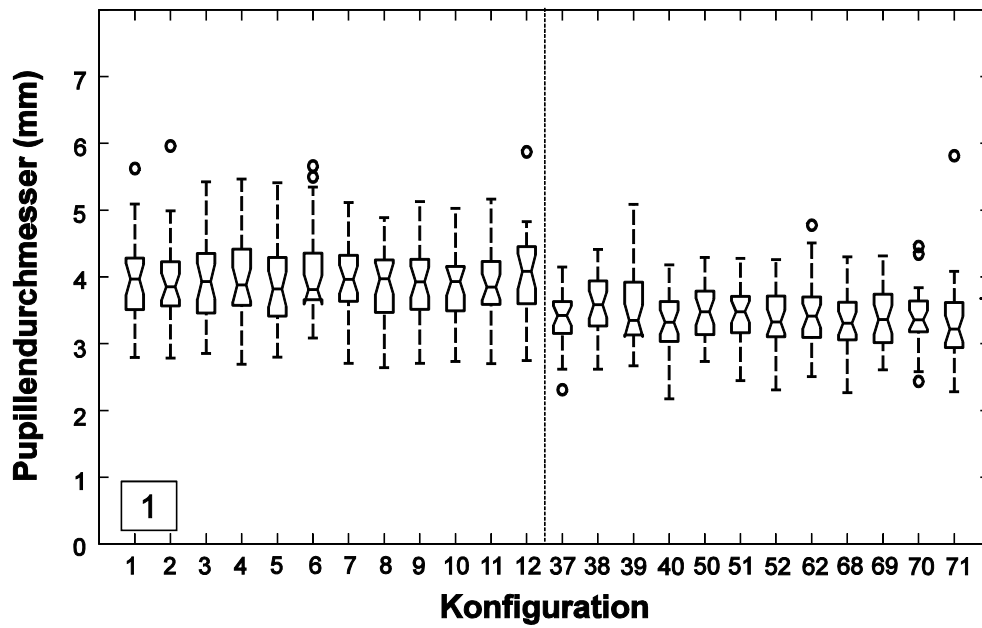


Abb. 3.29 Mittlere Pupillengröße aller Probanden bei dunklen (Konfiguration 1-12) und hellen Blendquellenkonfigurationen (Konfiguration 37-71) während Aufgabe 1 ( $\vartheta = 30^\circ$  und  $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$ )

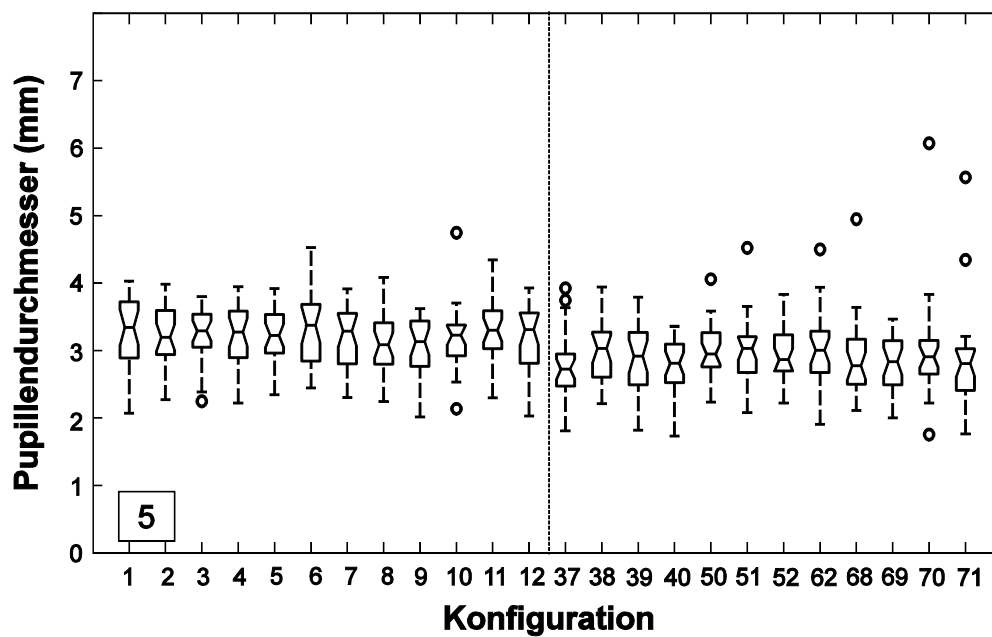


Abb. 3.30 Mittlere Pupillengröße aller Probanden bei dunklen (Konfiguration 1-12) und hellen Blendquellenkonfigurationen (Konfiguration 37-71) während Aufgabe 5 ( $\vartheta = 0^\circ$  und  $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$ )

Die **Lidschlagrate** wurde in [Hup 15] für Aufgaben 1 bis 5 ausgewertet, mit dem Ergebnis, dass die Blendbeleuchtungsstärke am Auge keine Auswirkungen auf die Lidschlagrate hat (vgl. Abb. 3.31).

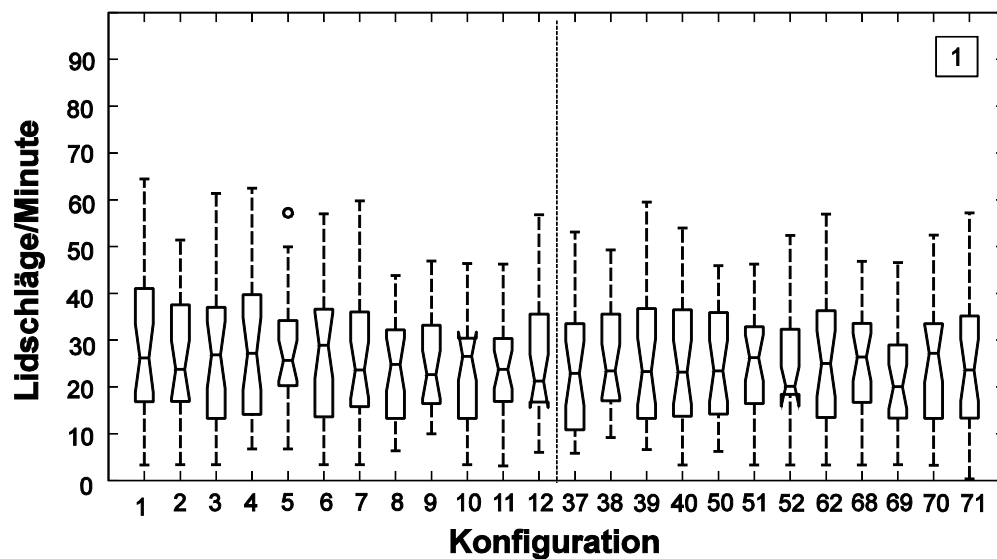


Abb. 3.31 Lidschlagrate aller Probanden bei dunklen (Konfiguration 1-12) und hellen Blendquellenkonfigurationen (Konfiguration 37-71) während Aufgabe 1 ( $\vartheta = 30^\circ$  und  $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$ ) [Hup 15, S. 45]

Ebenso konnten bei der Auswertung der **Blickbewegungen** in [Hup 15] keine Unterschiede zwischen verschiedenen Blendbeleuchtungsstärken festgestellt werden - weder bei Betrachtung der gesamten Sakkaden- und Fixationsanteile noch bei gesonderter Betrachtung von Fixationsdauern oder Anzahl der Sakkaden in Richtung Blendquelle (vgl. Abb. 3.32). Dabei wurden die Fixationsblickpunkte mittels Dispersion-Threshold-Identification (I-DT), also durch Analyse der örtlichen Streuung naheliegender Pixel, und die Sakkadenblickpunkte mittels Velocity-Threshold-Identification (I-VT), also durch Analyse der Blickgeschwindigkeit separiert [Hup 15].

Beim **Vergleich der physiologischen und psychologischen Blendempfindlichkeit** konnte festgestellt werden, dass nur ein Proband, der im Nyktometertest als blendempfindlich klassifiziert wurde, sich selbst als blendempfindlich bezeichnet bzw. sich im Alltag relativ häufig geblendet fühlt. Diese Person besitzt im rechten Auge eine Hornhautverkrümmung und trägt üblicherweise und während des Versuchs Kontaktlinsen. Dagegen stellten 4 von 5 der als physiologisch blendempfindlich eingestuften Probanden relativ niedrige LED-Lichtströme von 21 lm bis 32 lm ein. Der verbliebene Proband stellte LED-Ströme zwischen 39 lm und 55 lm ein.

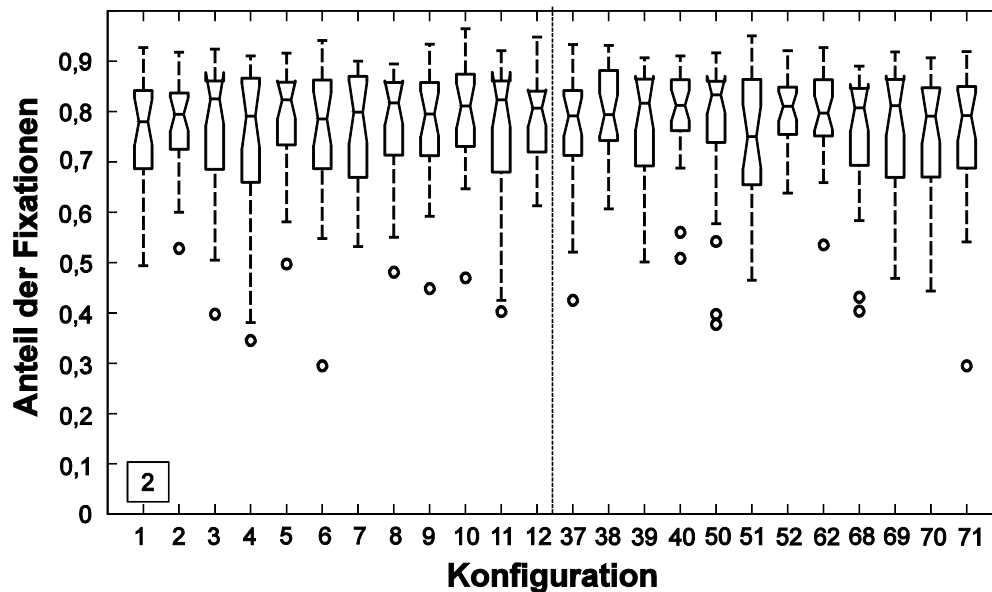


Abb. 3.32 Anteil der mittels I-DT als Fixationen klassifizierten Fixationsblickpunkte bei dunklen (Konfiguration 1-12) und hellen Blendquellenkonfigurationen (Konfiguration 37-71) während Aufgabe 2 (freier Blick und  $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$ )

### 3.9 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurden die Ziele und Annahmen bei der Festlegung der untersuchungsrelevanten Parameter dargelegt. Daraus wurden die Anforderungen an den Untersuchungsaufbau und -ablauf abgeleitet. Der entstandene Untersuchungsaufbau erfüllt aus Sicht des Verfassers die Voraussetzungen für aussagekräftige Ergebnisse, da er definierte Leuchtdichteverhältnisse und eine definierte Blickrichtung der Probanden sicherstellt, sowie kein Flicker und keine stroboskopischen Effekte ausweist. Die Blickrichtungen wurden ebenso wie die Pupillengröße der Probanden erfasst, um nach Abschluss der Probandenuntersuchung eventuelle Blickrichtungsabweichungen oder systematische Pupillenveränderungen bei der Blendungsbewertung mit zu berücksichtigen. Des Weiteren waren die beiden Probandenkollektive vorwiegend lichttechnisch ungeübt und konnten damit relativ vorurteilsfrei die Störung während der Testsequenzen beurteilen. Das Probandenkollektiv wurde hinsichtlich Sehschärfe, Alter, physiologischer und psychologischer Blendempfindlichkeit charakterisiert.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Einfluss der Leuchtdichtestruktur von LED-Leuchten auf die Blendung

Bevor die Probandenurteile verschiedener Leuchtdichtestrukturen miteinander verglichen wurden, wurden die interpersonellen Abweichungen durch Normierung reduziert. Dafür wurden zunächst die Mittelwerte der Probanden  $MW_P$  für die 71 Konfigurationen pro Aufgabe berechnet (vgl. Tab. 4.1). Aus diesen wurde für jede Aufgabe ein Gesamtmittelwert  $MW_{ges}$  berechnet. Anschließend werden von den ursprünglichen Probandendaten (= Rohdaten) die jeweiligen Probandenmittelwerte  $MW_P$  subtrahiert und dazu der Gesamtmittelwert  $MW_{ges}$  addiert. Im Folgenden werden ausschließlich die normierten Probandenurteile verwendet. Ab Kap. 4.2 werden ebenfalls die Mittelwerte und Standardfehler der Probandenrohdaten einer Leuchtdichtekonfiguration verwendet.

Tab. 4.1 Schema der Mittelwertbildung der Probandenurteile für eine Aufgabe

	Proband 1	Proband 2	...	Proband 30	gesamt
Konfiguration 1	P(1,1)	P(1,2)	...	P(1,30)	$MW_{K1}$
Konfiguration 2	P(2,1)	P(2,2)	...	P(2,30)	$MW_{K2}$
...	...	...		...	
Konfiguration 71	P(71,1)	P(71,2)	...	P(71,30)	$MW_{K71}$
gesamt	$MW_{P1}$	$MW_{P2}$	...	$MW_{P71}$	$MW_{ges}$

#### 4.1.1 Einfluss des LED-Abstands innerhalb der Blendquelle

In Abb. 4.1 sind die normierten Probandenurteile bei verschiedenen LED-Abständen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung bei einer mittleren LED-Leuchtdichte von  $80000 \text{ cd/m}^2$  und Aufgabe 1 (Blendwinkel von  $30^\circ$ , Hintergrundleuchtdichte  $42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$ ) dargestellt. Darin erkennt man zum einen, dass für den Blendquellenabstand im Bereich von  $0^\circ$  bis  $4,8^\circ$  im Gegensatz zu Forschungshypothese 3 kein Einfluss auf die Blendungsbewertung nachzuweisen ist, auch wenn die LEDs als eine homogene, zusammenhängende Fläche angeordnet werden. Zum anderen wird in Abb. 4.1 deutlich, dass eine steigende Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung  $L_d$  zu mehr Blendempfinden führt. Auch in Abb. 4.2, in der Probandenurteile gegen die mittlere Blendquellenleuchtdichte aufgetragen sind, ist kein Einfluss des LED-Abstands sichtbar.

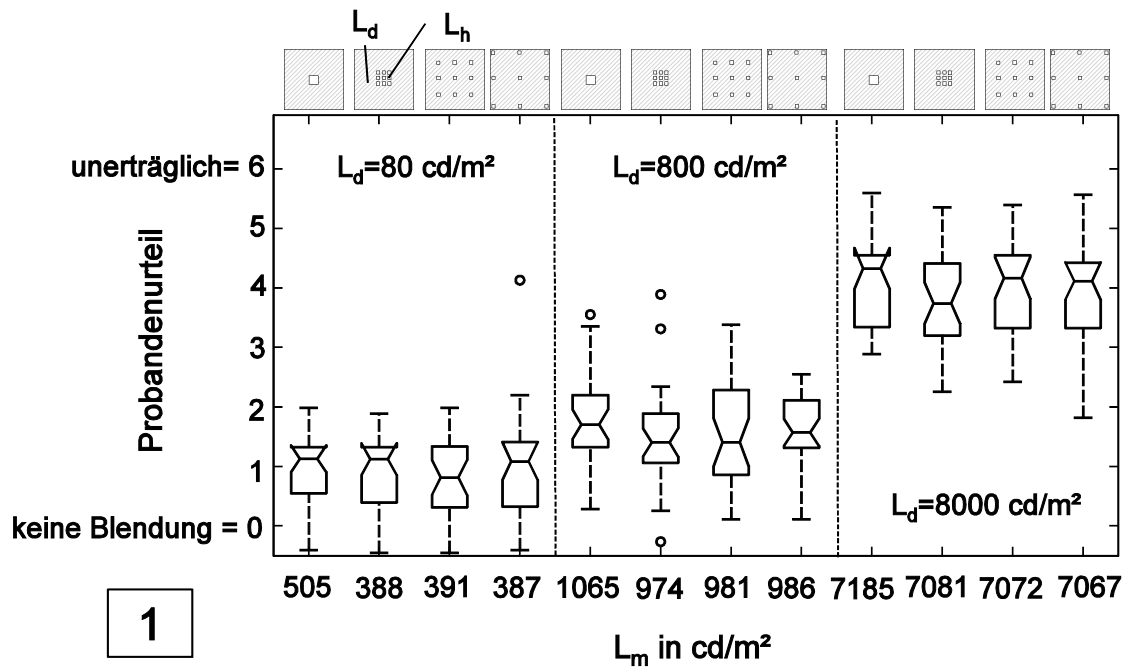


Abb. 4.1 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen LED-Abständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1,  $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ ,  $\vartheta = 30^\circ$ ,  $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$ )

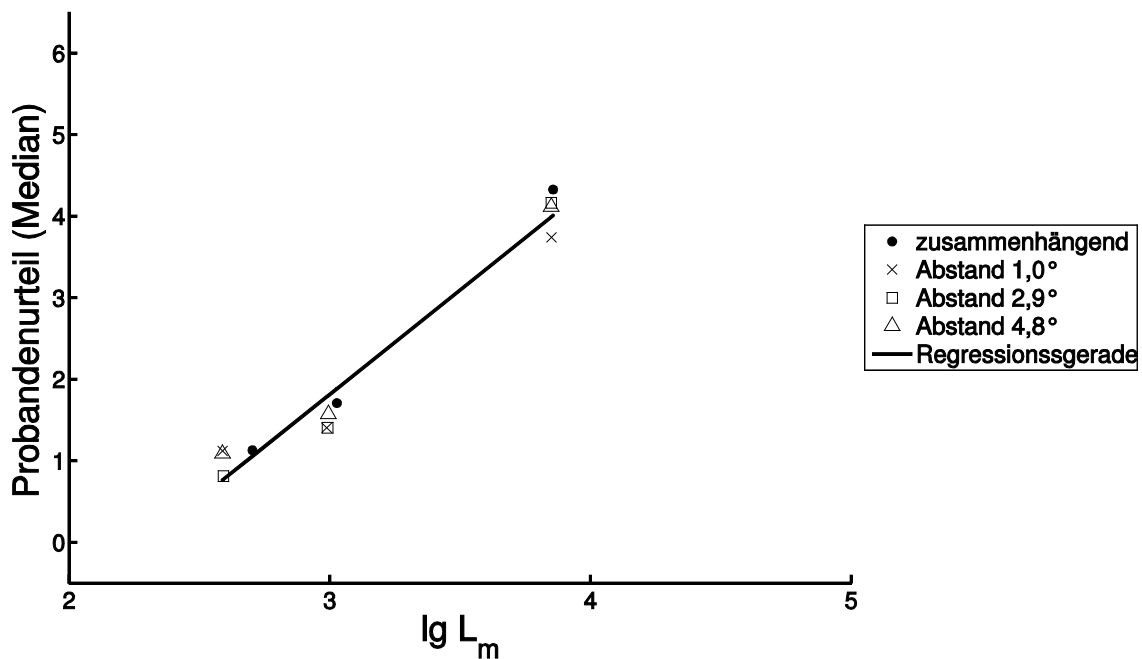


Abb. 4.2 Korrelation von Probandenurteilen und logarithmierter, mittlerer Blendquellenleuchtdichte bei verschiedenen LED-Abständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1,  $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ ,  $\vartheta = 30^\circ$ ,  $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$ , vgl. Abb. 4.1)



Beide Beobachtungen konnten auch bei LED-Leuchtdichten von  $8000 \text{ cd/m}^2$  und  $400000 \text{ cd/m}^2$  (hierfür existierte jedoch keine Struktur mit zusammenhängender Fläche) sowie allen Blendwinkeln von  $30^\circ$ ,  $15^\circ$  und  $0^\circ$  und Hintergrundleuchtdichten zwischen  $42 \text{ cd/m}^2$  und  $190 \text{ cd/m}^2$ , festgestellt werden (vgl. Anhang A.3).

#### 4.1.2 Additivität von LED-Punkten

Die Addierbarkeit des Raumwinkels von LED-Punkten, die sich bereits im vorangegangenen Unterkapitel für 9 LEDs angedeutet hatte, konnte auch durch Vergleich der ersten und zweiten Serie in Abb. 3.1 für 49 und 121 LEDs bei allen Aufgaben beobachtet werden. In Abb. 4.3 sind exemplarisch zwei Strukturen bei unterschiedlichen Leuchtdichten, sowohl der LEDs als auch der unmittelbaren Umgebung, dargestellt. Durch direkten Vergleich der Probandenurteile bei gleichen Leuchtdichteinstellungen wird deutlich, dass kein Trend beobachtbar ist, welche Struktur mehr blendet und somit die Additivität für die untersuchten Parameter gültig ist.

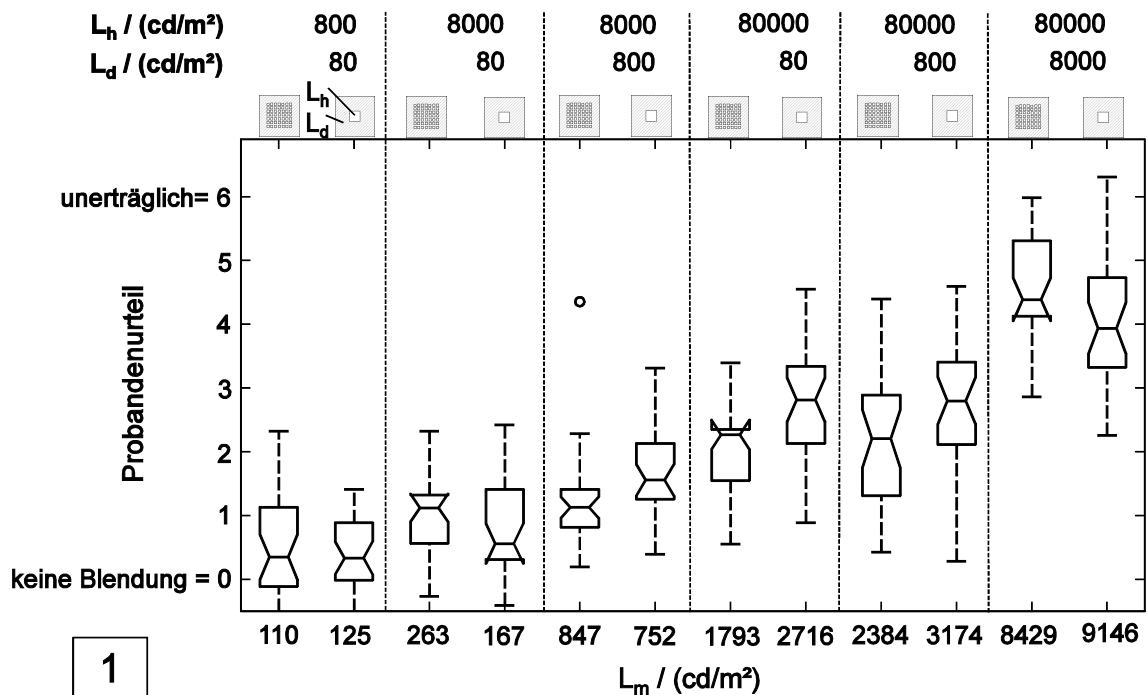


Abb. 4.3 Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 3 und 7 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1,  $\vartheta = 30^\circ$  und  $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$ )

Eventuelle Abweichungen können durch unterschiedliche mittlere Blendquellenleuchtdichten oder ‚zufällige‘ Abweichungen der Probanden erklärt werden, insbesondere wenn man die Ergebnisse aller Aufgaben mit einbezieht (vgl. Abb. 4.4 und Anhang A.4). Im Gegensatz dazu bewirkt eine Aufhellung der unmittelbaren Umgebung der LEDs auf beiden Seiten eine Zunahme der subjektiven Blendungsbewertungen.

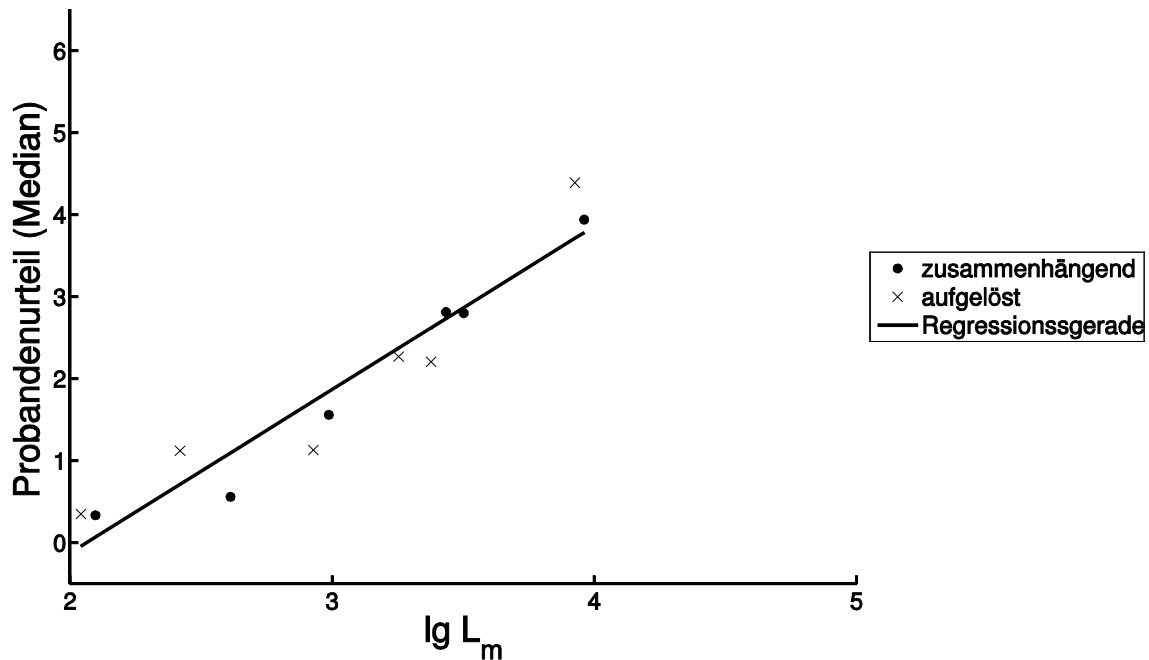


Abb. 4.4 Korrelation von Probandenurteilen und logarithmierter, mittlerer Blendquellenleuchtdichte (Aufgabe 1,  $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ ,  $\vartheta = 30^\circ$ ,  $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$ , vgl. Abb. 4.3)

In Kap. 3.4 und 3.6 wurde gezeigt, dass die effektiv leuchtende Fläche der LEDs kleiner war als ursprünglich geplant. Deshalb werden an dieser Stelle ebenfalls die Probandenurteile der Strukturen mit 121 LEDs und 49  $\text{LED}_{\text{äquivalent}}$  verglichen (vgl. 4.5 und Anhang A.3). Bei Leuchtdichtekonfigurationen mit gleicher mittlerer Leuchtdichte werden separate LEDs gleich störend bewertet wie gleich große, zusammenhängende Leuchtflächen. Dies wurde sowohl bei direktem Blick in die Blendquelle als auch bei peripherer Blendquelle festgestellt.

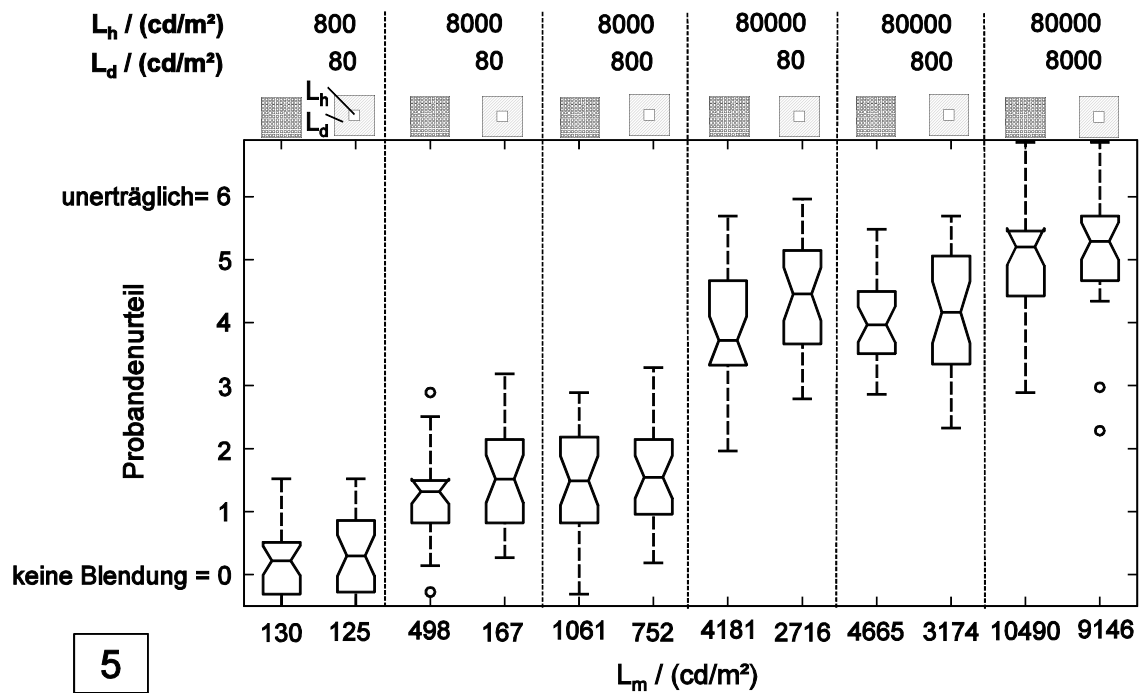


Abb. 4.5 Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 4 und 7 aus Abb. 3.1 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 5,  $\vartheta = 0^\circ$  und  $L_b = 57 \dots 94 \text{ cd/m}^2$ )

#### 4.1.3 Einfluss der unmittelbaren Umgebung

Der Einfluss der Größe und Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung der hellen Leuchtdichtebereiche wurde mit Hilfe der vierten Serie in Abb. 3.1 untersucht. In Abb. 4.6 und Anhang A.5 sind die Ergebnisse dieses Vergleichs für mittlere LED-Leuchtdichten von  $400000 \text{ cd/m}^2$  bei direktem Blick in die Blendquelle dargestellt. Wie man darin erkennen kann, bewirken die Vergrößerung und Aufhellung der unmittelbaren Umgebung der LEDs eine Zunahme des subjektiven Blendempfindens. Dieses Ergebnis bestätigt die Beobachtung in den Unterkapiteln 4.1.1 und 4.1.2. Folglich müssen bei der Blendungsbewertung von strukturierten LED-Leuchten die Größe und Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung berücksichtigt werden.

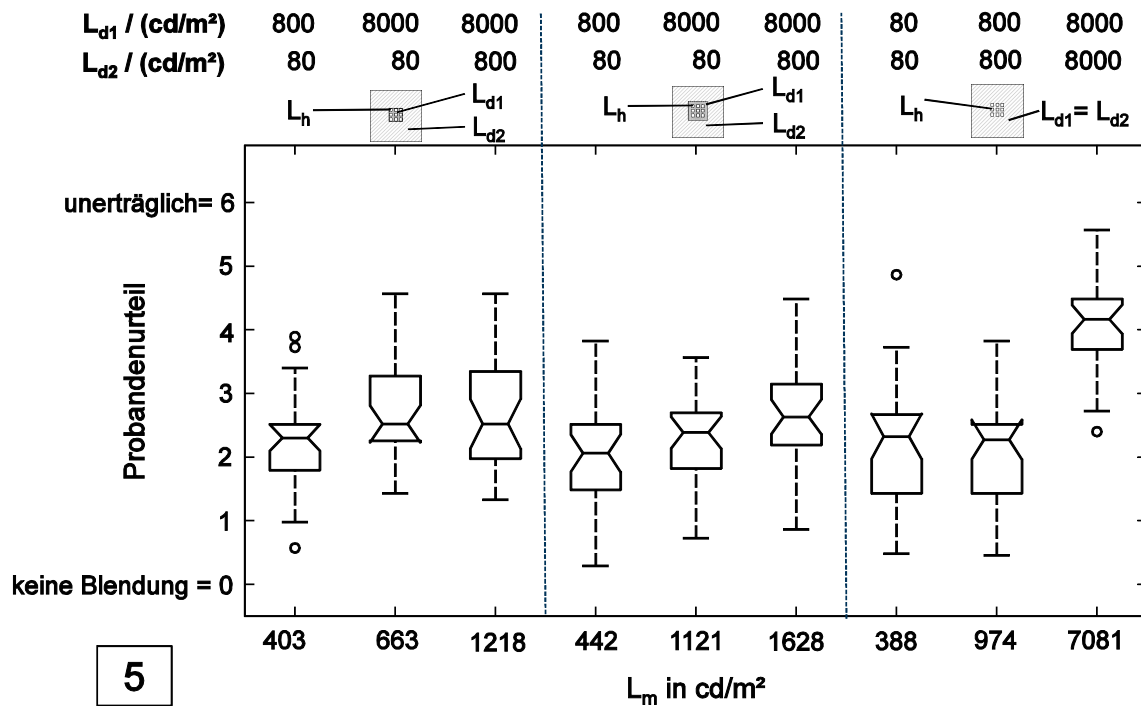


Abb. 4.6 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Größen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 5,  $L_h = 400000 \text{ cd/m}^2$ ,  $\vartheta = 0^\circ$  und  $L_b = 57 \dots 94 \text{ cd/m}^2$ )

#### 4.1.4 Einfluss des Kontrasts

In den vorangegangenen drei Unterkapiteln konnte gezeigt werden, dass die Größe und Leuchtdichte der LEDs sowie der unmittelbaren Umgebung das Blendempfinden beeinflussen. Im Gegensatz dazu spielt der Abstand der LEDs für die betrachteten Untersuchungsbedingungen keine nennenswerte Rolle bei der Blendungsbewertung. In diesem Abschnitt wird nun untersucht, inwiefern sich der Kontrast innerhalb der Leuchte bei gleicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte und Blendquellengröße (bzw. gleicher Blendbeleuchtungsstärke am Auge) auf das Blendempfinden auswirkt. In Abb. 4.7 sind die Blendurteile verschiedener Strukturen ähnlicher Beleuchtungsstärke am Auge bei einem Blendwinkel von  $0^\circ$ , also direktem Blick in die Leuchte, aufgeführt (vgl. auch Anhang A.6 für weitere Aufgaben). Darin kann man erkennen, dass bei steigendem Kontrast innerhalb der Leuchte ebenfalls das Blendempfinden steigt. Weiterhin ist daraus zu entnehmen, dass neben dem Kontrast noch andere Faktoren das Blendempfinden bei direktem Blick beeinflussen, da drei Strukturen mit gleichem Kontrast von 10:1 unterschiedlich bewertet wurden. Im Gegensatz dazu wirkt sich der Leuchtdichtekontrast innerhalb der Leuchte bei Blendwinkeln von  $15^\circ$  oder  $30^\circ$  nicht mehr signifikant aus (vgl. Abb. 4.8).

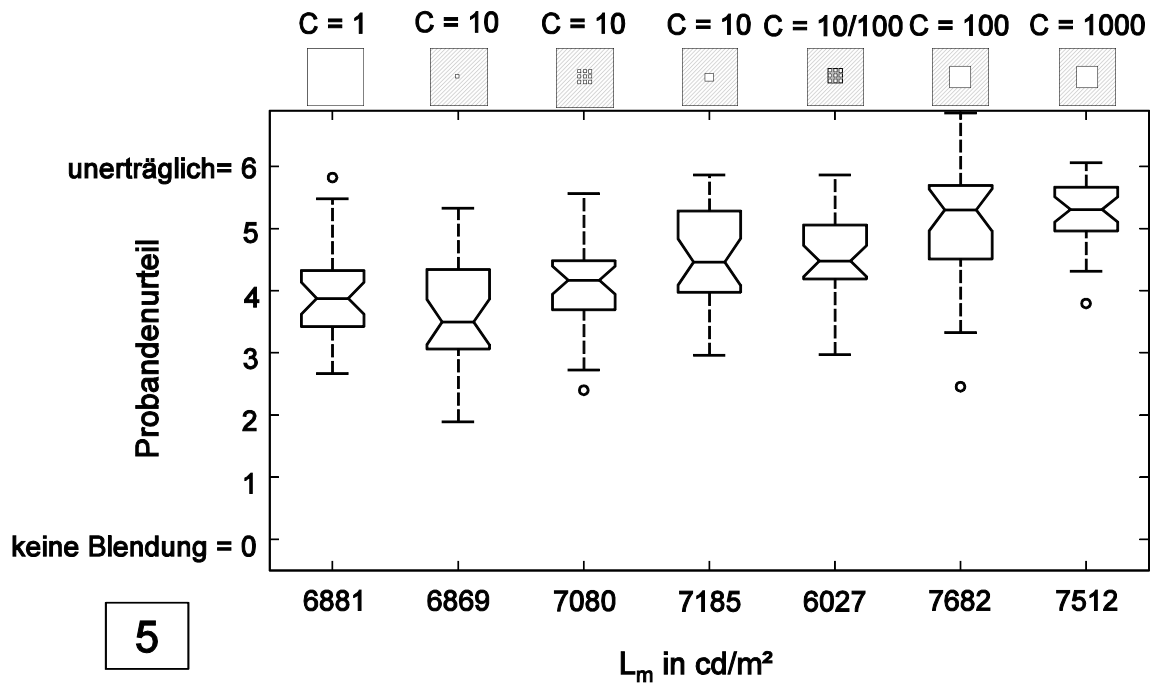


Abb. 4.7 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte bei direktem Blick in die Leuchte (Aufgabe 5,  $\vartheta = 0^\circ$  und  $L_b = 57 \dots 94 \text{ cd/m}^2$ )

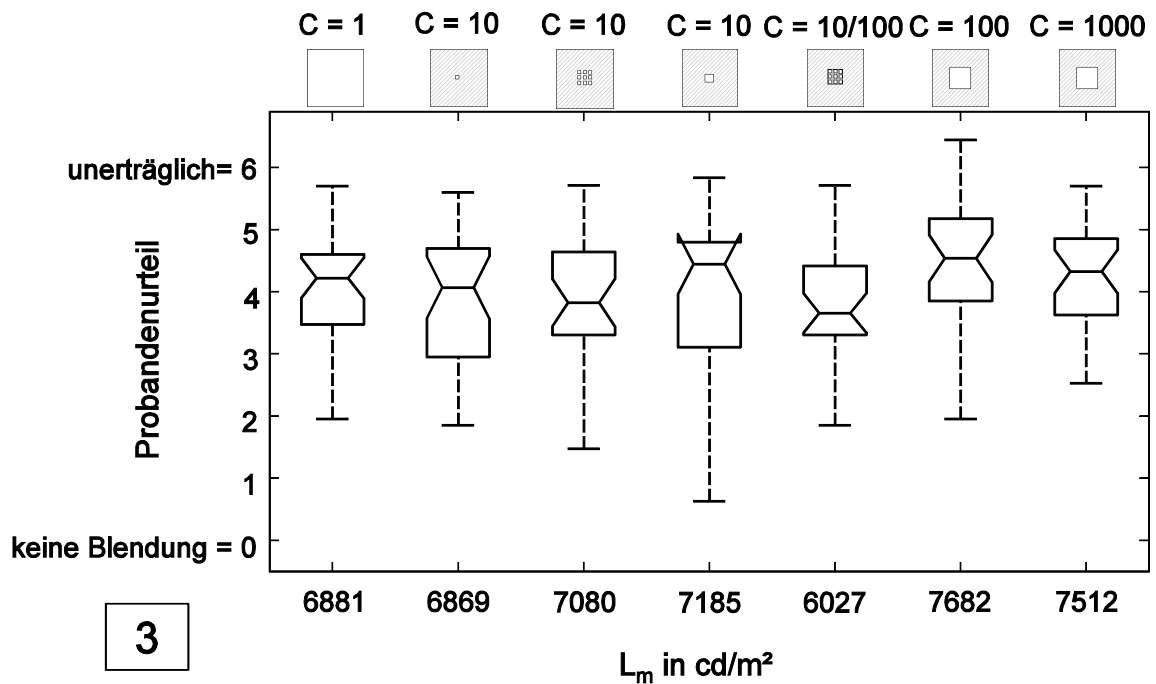


Abb. 4.8 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und mittlerer Blendquellenleuchtdichte bei einem Blendwinkel von  $15^\circ$  (Aufgabe 3,  $\vartheta = 15^\circ$  und  $L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$ )

Folglich kann daraus abgeleitet werden, dass eine Blendungsbewertung mit UGR für Blendwinkel größer als  $15^\circ$  auch für strukturierte LED-Leuchten angewendet werden kann. Diese These soll in den folgenden Kapiteln überprüft werden.

## 4.2 Vergleich der Probandenurteile mit berechneten UGR-Werten

### 4.2.1 Bestimmung der UGR-Werte

Zur Gegenüberstellung der Probandendaten mit den UGR-Werten wurden letztere auf Basis von Gleichung 2.10 aus den Leuchtdichtebildern der LMK mit 25 mm-Objektiv ermittelt. Die Bewertungsfläche zur Bestimmung der mittleren Leuchtdichte und Größe der Blendquelle ist gemäß [Cie 95b] an dieser Stelle die Grundfläche des Diffusors der Leuchte (entzerrt: 579 mm x 579 mm) (vgl. Abb. 3.18). Da bei der Berechnung der UGR-Werte nach [Cie 95b] die mittlere Leuchtdichte der Blendquelle zugrunde gelegt werden soll, wurde dementsprechend über diese Fläche gemittelt und ein mittlerer Position-index für die ganze Leuchte aus den in der LMK-Software LABSOFT hinterlegten Winkeln bestimmt. Auch die Größe der Blendquelle wurde durch Summation der Raumwinkel der relevanten Pixel ermittelt. Die geometrischen Größen konnten durch eine manuelle Berechnung unter Berücksichtigung der Flächenprojektion bestätigt werden.

Die Hintergrundleuchtdichte wurde im Gegensatz zur Definition in [Cie 95b] nicht für den verbleibenden Halbraum, sondern für den Bereich  $\pm 20^\circ$  zur Blickrichtung berechnet, da der Adaptationszustand nach [Bör 14] maßgeblich durch die Leuchtdichte in diesem Bereich bestimmt wird und der Blick des Probanden während der Versuche fixiert war (vgl. Kap. 3.3.3). In Abb. 4.9 bis 4.12 ist der Vergleich der Probandenurteile mit den berechneten UGR-Werten dargestellt. Zur besseren Übersicht sind die Datenpunkte der ersten und zweiten Versuchsreihe ebenso wie Aufgabe 1 zunächst in einem separaten Diagramm enthalten. In diesem sind für jede Aufgabe die Ausgleichsgeraden eingezeichnet. Da die Datenpunkte im unteren Bewertungsbereich ein nichtlineares, asymptotisches Verhalten aufweisen, wurden bei der Berechnung der Ausgleichsgeraden nur die „realistischen“ Datenpunkte mit einem UGR-Wert  $> 5$  berücksichtigt. Dadurch wird eine unerwünschte Änderung der Ausgleichsgerade vermieden. Aus Sicht des Verfassers ist der UGR-Wert von 5 als Grenze angemessen, weil er knapp unterhalb der unteren Grenze der UGR-Skala liegt ( $10 \leq \text{UGR} \leq 31$ ). Je nach Aufgabe werden dabei 14 bis 40 Konfigurationen von jeweils 71 Konfigurationen bei der Ausgleichsgeradenberechnung vernachlässigt.

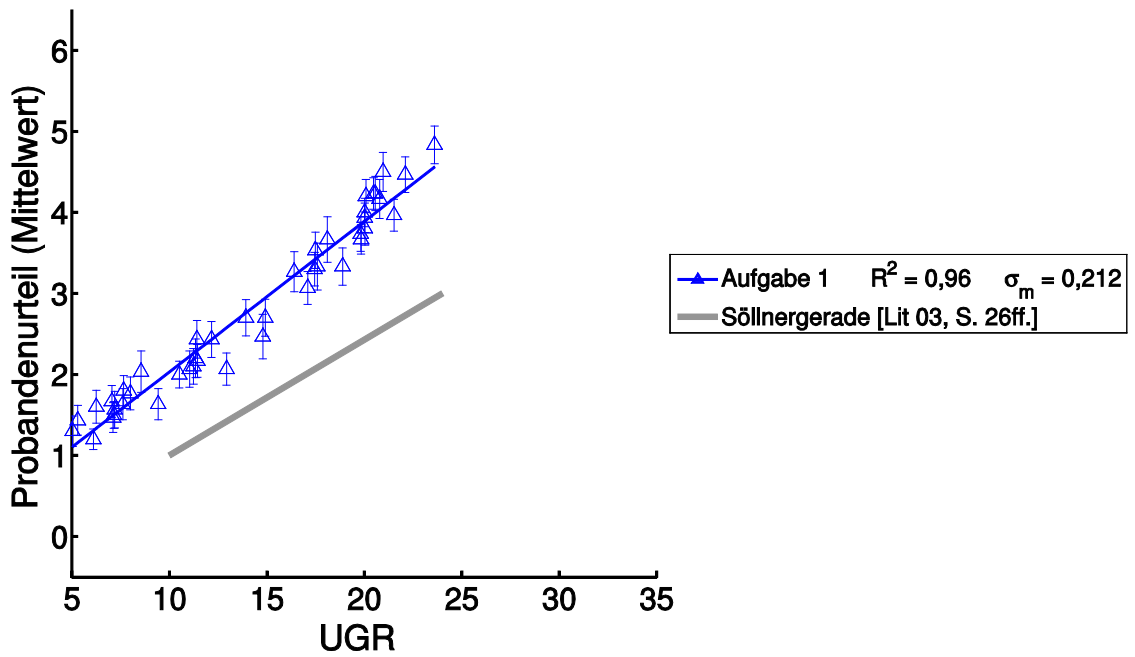


Abb. 4.9 Vergleich der Probandenurteile (Mittelwerte und Standardfehler) mit den berechneten UGR-Werten bei Aufgabe 1 ( $\vartheta = 30^\circ$  und  $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$ )

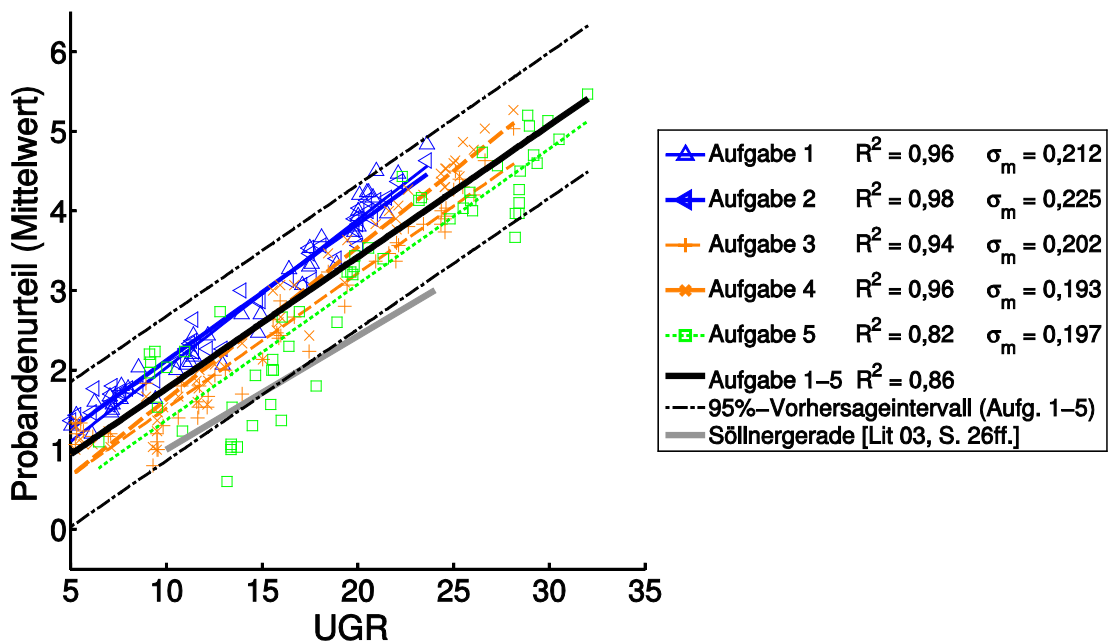


Abb. 4.10 Vergleich der Probandenurteile (Mittelwerte) mit den berechneten UGR-Werten für die erste Versuchsreihe

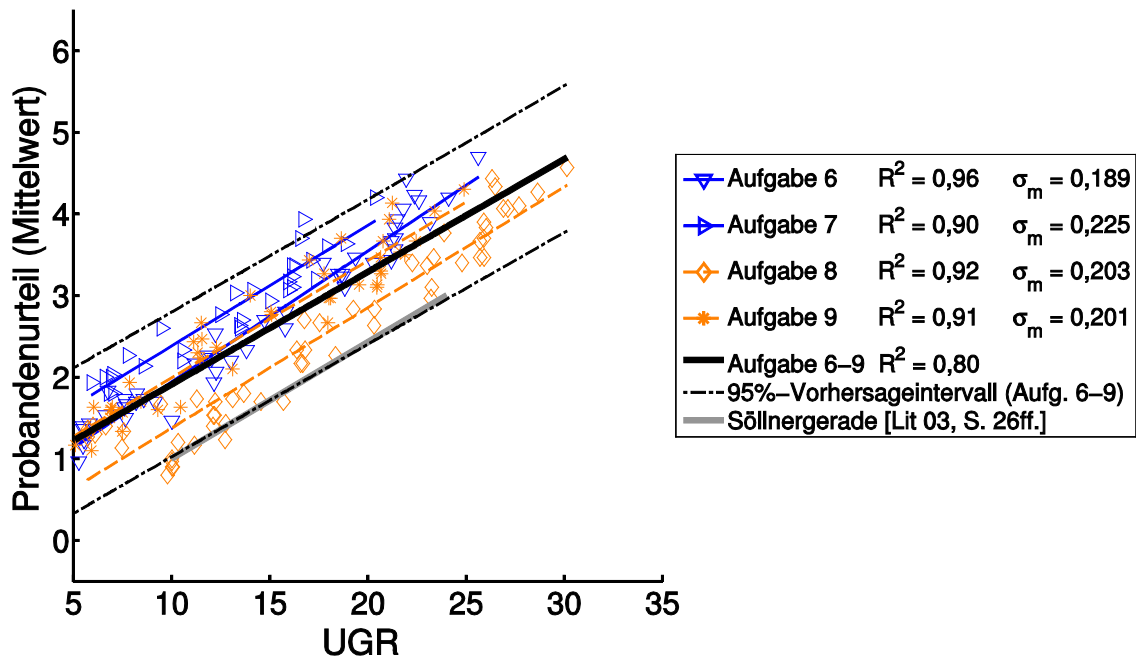


Abb. 4.11 Vergleich der Probandenurteile (Mittelwerte) mit den berechneten UGR-Werten für die zweite Versuchsreihe

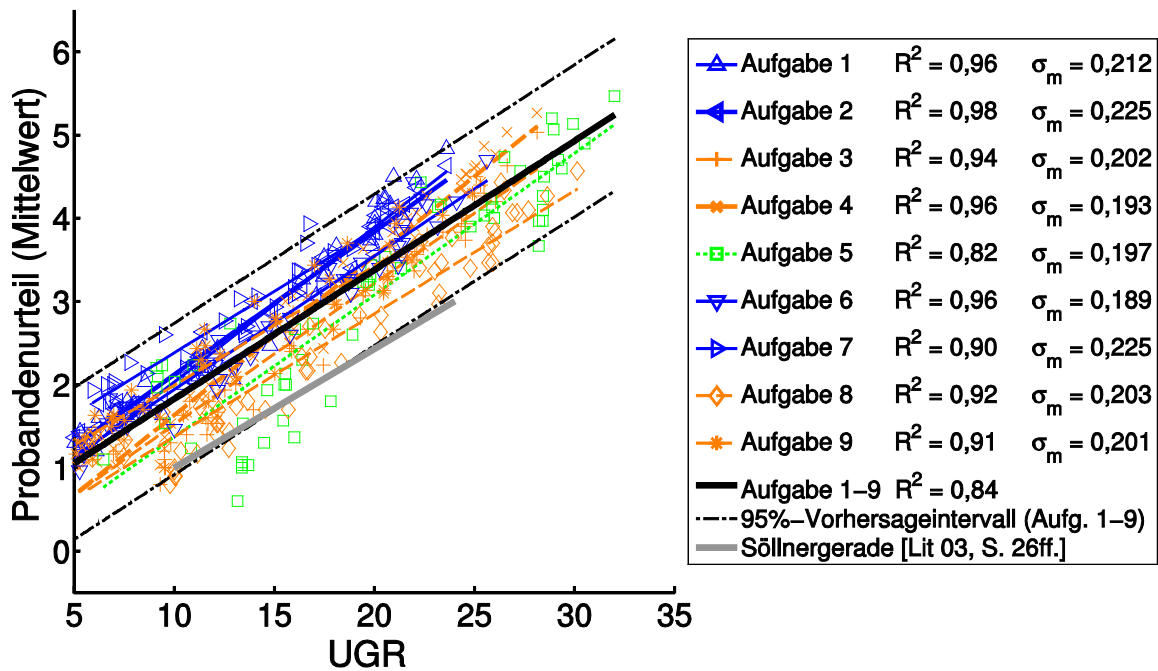


Abb. 4.12 Vergleich der Probandenurteile (Mittelwerte) mit den berechneten UGR-Werten

Aus Abb. 4.9 bis 4.12 geht hervor, dass die Probandendaten relativ gut mit den gemessenen UGR-Werten korrelieren, da die einzelnen Bestimmtheitsmaße für



die Mittelwerte größer 0,8 sind. Weiterhin fällt auf, dass die Ausgleichsgeraden nicht mit der aus [Lit 03] entnommenen Söllner-Skala übereinstimmen und auch zueinander parallel verschoben sind. In den meisten Fällen liegen die Datenpunkte und deren Ausgleichsgeraden jedoch über der Söllnergeraden, was darauf hindeutet, dass sich die Probanden stärker gestört fühlten, als durch die gemessenen UGR-Werte vorhergesagt wurde. Dafür können prinzipiell zwei Ursachen möglich sein: Entweder die Positionsindizes der vorliegenden Untersuchung sind geringer als die Positionsindizes nach LUCKIESH & GUTH [Luc 49] oder die Probanden fühlten sich durch die Leuchtdichtestruktur der Leuchte stärker gestört als von homogenen Blendquellen. Welche der beiden Ursachen wirksam ist, lässt sich durch Bestimmung der empirischen Positionindizes der Studie ermitteln.

#### 4.2.2 Einfluss des Blendwinkels und der Hintergrundleuchtdichte auf die Blendung

Zur Bestimmung der Positionsindizes werden die Leuchtenkonfigurationen in zwei Gruppen aufgeteilt. Die erste Gruppe repräsentiert die „konventionellen“ Leuchten, welche einen Leuchtdichtekontrast  $C \leq 10$  aufweisen und deren mittlere Leuchtdichte zwischen  $700 \text{ cd/m}^2$  und  $7000 \text{ cd/m}^2$  rangiert. Denkbar wäre es auch, nur die beiden homogenen Konfigurationen mit  $C \leq 1,5$  als Referenz zu nehmen, jedoch ist eine Ausgleichsgerade mit lediglich zwei Stützstellen sehr empfindlich gegenüber „zufälligen“ Abweichungen in der Blendungsbewertung. Folglich wurden die „konventionellen“ Leuchtdichtekonfigurationen, bestehend aus zehn Konfigurationen (jeweils 8, 9, 10, 14, 16, 55, 57, 59, 61 und 62) pro Aufgabe, als Referenz gewählt. Aus den 26 kontrastreichen Leuchtenkonfigurationen mit  $C \geq 100$  und gleichem mittleren Leuchtdichtebereich wurde die zweite Gruppe gebildet (18, 23-25, 32-34, 36, 38, 39, 41-51, 60, 64, 66, 67). Für beide Gruppen wurden abhängig von der Aufgabe die Positionsindizes ermittelt. Unterscheiden sich die Positionsindizes der „konventionellen“ Leuchten von den Positionsindizes nach LUCKIESH & GUTH [Luc 49], kann dies für die vorliegende Untersuchung entsprechend korrigiert werden. Existieren dann noch Unterschiede der Positionsindizes der beiden Gruppen, können diese auf den Einfluss der Leuchtdichtestruktur zurückgeführt werden. Konkret wurden die mittleren Positionsindizes durch Verschieben der mittleren Probandenurteile in x-Richtung bis auf die Söllnergerade in Abb. 4.12 ermittelt. Die resultierende UGR-Differenz wird gemäß Gl. 4.1 bis Gl. 4.3 in einen neuen Positionsindex umgerechnet.

$$\Delta UGR = UGR_2 - UGR_1 = 8 \cdot \lg \left[ \frac{0,25}{L_b} \cdot \frac{L_s^2 \cdot \Omega_s}{P_2^2} \right] - 8 \cdot \lg \left[ \frac{0,25}{L_b} \cdot \frac{L_s^2 \cdot \Omega_s}{P_1^2} \right] \quad (4.1)$$

$$\Delta UGR = 8 \cdot \lg \left[ \frac{P_1^2}{P_2^2} \right] = 16 \cdot \lg \left[ \frac{P_1}{P_2} \right] \quad (4.2)$$

$$P_2 = \frac{P_1}{10^{\frac{\Delta UGR}{16}}} \quad (4.3)$$

In Tab. 4.2 kann man erkennen, dass sich die mittleren Positionsindizes der Studie stark von den üblichen Positionsindizes nach LUCKIESH und GUTH unterscheiden, sondern im Mittel eher mit den Positionsindizes nach KIM [Kim 11] übereinstimmen.

Tab. 4.2 Positionsindizes einzelnen Aufgaben in der Studie im Vergleich zu [Luc 49] und [Kim 11]

<b>Aufg. Nr.</b>	<b><math>\vartheta</math></b>	<b>Hintergrundleuchtdichte <math>L_b</math></b>	<b><math>P_m</math> (C≤10)</b>	<b><math>P_m</math> (C≥100)</b>	<b>P (L&amp;G)</b>	<b>P (Kim)</b>
1	30°	42...71 cd/m <sup>2</sup>	1,15	1,14	3,35	1,30
2	freier Blick	42...71 cd/m <sup>2</sup>	1,14	1,05	3,35	1,30
3	15°	58...89 cd/m <sup>2</sup>	1,33	0,93	1,75	1,10
4	15°	58...89 cd/m <sup>2</sup>	1,05	0,70	1,75	1,10
5	0°	57...94 cd/m <sup>2</sup>	1,45	0,45	1,00	1,00
6	30°	42...44 cd/m <sup>2</sup>	1,37	1,28	3,35	1,30
7	30°	172...190 cd/m <sup>2</sup>	0,63	0,78	3,35	1,30
8	15°	56...62 cd/m <sup>2</sup>	1,74	1,26	1,75	1,10
9	15°	161...183 cd/m <sup>2</sup>	0,89	0,61	1,75	1,10

Weiterhin fällt auf, dass die Positionsindizes der kontrastreichen Konfigurationen vor allem bei 15° und 0° Blendwinkel kleiner sind als die der „konventionellen“ Konfigurationen. Außerdem ist zu erkennen, dass die Positionsindizes der Aufgaben mit großer Hintergrundleuchtdichte deutlich niedriger als die der restlichen Aufgaben sind. Damit war auch der Einfluss der Hintergrundleuchtdichte geringer als durch die UGR-Formel vorausgesagt. Konkret betrug der Exponent der Hintergrundleuchtdichte in dieser Studie nicht -1 sondern -0,33

[Fun 15]. Auch die Exponenten der mittleren Blendquellenleuchtdichte und der Blendquellengröße wurden im Rahmen der Auswertung betrachtet. Diese betragen in der vorliegenden Studie 1,81 bzw. 1,01 und stimmen damit relativ gut mit den Annahmen in der UGR-Formel überein (2 bzw. 1, vgl. Gl. 2.10). Da bei dieser Studie die Positionsindizes kleiner sind als jene nach LUCKIESH und GUTH, ist der Exponent bei Verwendung der Positionsindizes nach LUCKIESH und GUTH mit -0,78 folglich auch betragsmäßig kleiner als in der UGR-Formel vorgegeben (in Gl. 2.10 beträgt der Exponent -2).

In Abb. 4.13 sind die Probandenergebnisse im Vergleich zu den UGR-Werten analog zu Abb. 4.12 dargestellt, an dieser Stelle jedoch unter Verwendung der Positionsindizes nach KIM.

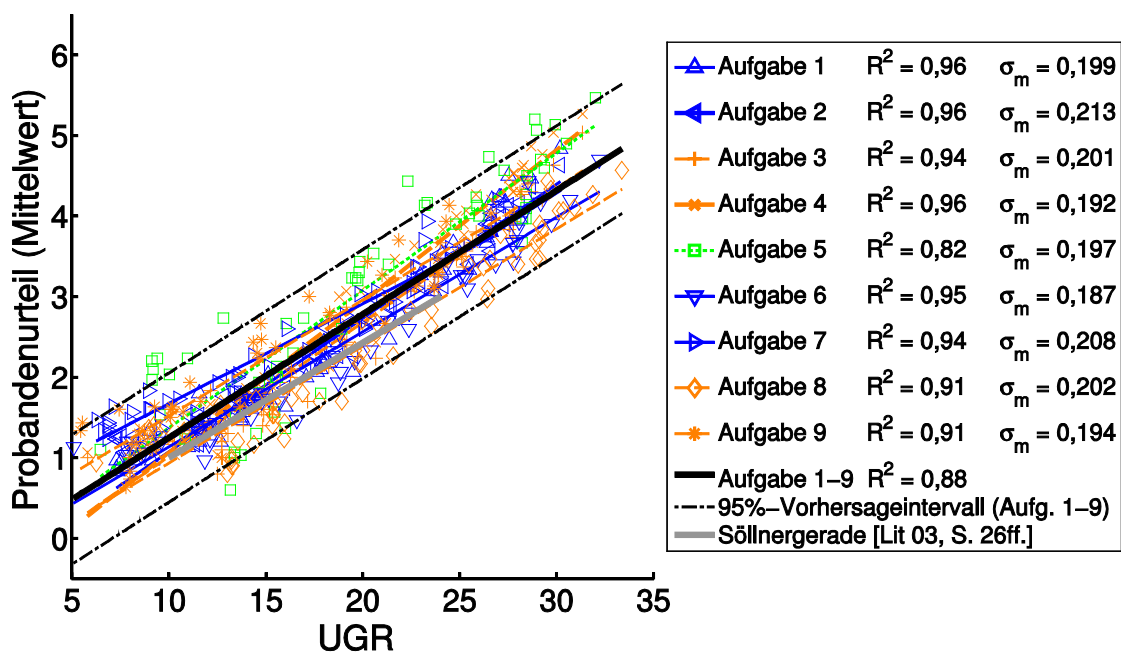


Abb. 4.13 Vergleich der Ausgleichsgeraden bei Verwendung der Positionsindizes nach [Kim 11]

#### 4.2.3 Vergleich der gemessenen UGR-Werte bei unterschiedlichen Auflösungen

Bei der Blendungsbewertung von sehr kontrastreichen LED-Leuchten spielt die Messauflösung eine wichtige Rolle. Deshalb werden in diesem Kapitel exemplarisch die UGR-Bewertungen der gleichen Leuchtdichtesituationen gegenübergestellt. In Abb. 4.14 sind die Probandenergebnisse den UGR-Werten bei reduzierter Messauflösung von  $1,3 \cdot 10^{-6}$  sr/px (entspricht der Messauflösung der LMK 5 color mit Fischaug-Objektiv) gegenübergestellt. Darin er-

kennt man zum einen, dass die ermittelten UGR-Werte tendenziell geringer sind als bei höherer Auflösung. Zum anderen wird in Abb. 4.14 deutlich, dass die Datenpunkte stärker streuen als bei höherer Auflösung. Demzufolge sollte bei der Bestimmung von UGR-Werten stets die Messauflösung berücksichtigt und groß genug gewählt werden. Sie sollte mindestens so groß sein, wie die Auflösung des Auges (vgl. Kap. 2.2.2 und 4.4.2)

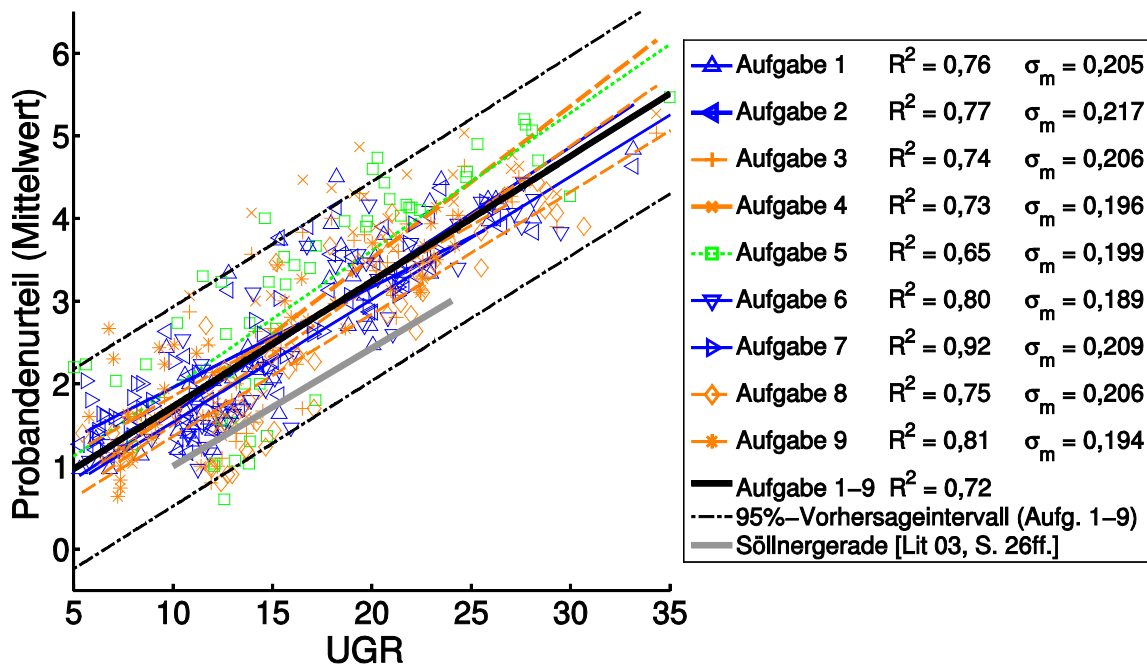


Abb. 4.14 Vergleich der Ausgleichsgeraden bei reduzierter Messauflösung bei Verwendung der Positionsindizes nach [Kim 11]

### 4.3 Berechnung von Korrekturfaktoren nach HARA

#### 4.3.1 Berechnung der Korrekturfaktoren

Gemäß der Ausführungen in Kap. 2.6 eignen sich die Korrekturfaktoren nach HARA zur detaillierten Beschreibung von blendungsrelevanten Effekten von strukturierten LED-Leuchten. Folglich wurden auch für die Untersuchungsbedingungen dieser Arbeit die Korrekturfaktoren ermittelt. Als Basis dafür dienen die relativ homogenen Leuchtdichtestrukturen der Blendquelle (Gruppe 1 in Kap. 4.2.2) bzw. deren Ausgleichsgerade. Für jede Leuchtdichtestruktur bei jeder Aufgabe wird der Korrekturfaktor nach Hara berechnet, indem die Datenpunkte im Probandenurteil-UGR-Diagramm horizontal auf die Ausgleichsgerade der relativ homogenen Strukturen geschoben werden. Der  $UGR_{\text{Proband}}$ -Wert einer Leuchtdichtekonfiguration wird somit aus der mittleren Blendungs-

bewertung und der Ausgleichsgerade bestimmt. Die Berechnung der Korrekturfaktoren erfolgt nach Gleichung 4.6.

$$UGR_{Proband} = 8 \cdot \lg \left[ \frac{0,25}{L_b} \cdot \frac{k^2 \cdot L_s^2 \cdot \Omega_s}{P^2} \right] \quad (4.4)$$

$$UGR_{Proband} = 16 \cdot \lg(k) + UGR_{gemessen} \quad (4.5)$$

$$k = 10^{\frac{UGR_{Proband} - UGR_{gemessen}}{16}} \quad (4.6)$$

Da die Korrekturfaktoren eingeführt wurden, um ein empirisches Modell zu finden, sind sie im Folgenden gruppiert dargestellt, um die Einflussfaktoren auf den Korrekturfaktor einer Leuchtenkonfiguration zu ermitteln. In diesem Zuge werden gemäß der Ausführungen in Kap. 4.2 nur die Leuchtenkonfigurationen mit einem realistischen UGR-Wert berücksichtigt, um Streuungen der Korrekturfaktoren zu vermindern. Folglich werden 14 Konfigurationen (1-7, 11-12, 17, 53, 54 und 56) bewusst vernachlässigt ( $UGR < 5$  für  $\vartheta = 0^\circ$  und  $L_b = 57 \dots 94 \text{ cd/m}^2$ ).

#### 4.3.2 Bestimmung der Einflussgrößen auf die Korrekturfaktoren

Beim Vergleich der nach Kontrast und Struktur gruppierten Korrekturfaktoren für  $30^\circ$  Blendwinkel (vgl. Abb. 4.15) fallen besonders die starken Streuungen der Korrekturfaktoren auf. Es ist dabei kein Trend erkennbar, welcher Kontrast oder welche Struktur tendenziell mehr Blendung verursacht. Im Gegensatz dazu, bei direktem Blick in die Blendquelle, lässt sich ein Anstieg der Korrekturfaktoren bei zunehmendem Kontrast und abnehmendem Flächenverhältnis  $A_h/A_d$  beobachten (vgl. Abb. 4.16). Dennoch sind auch hier teilweise große Streuungen innerhalb eines Boxplots vorhanden. Weiterhin kann beim Vergleich von Abb. 4.15 und 4.16 festgestellt werden, dass die Korrekturfaktoren bei direktem Blick in die Leuchte wesentlich höher als bei peripherem Blick sind. Dies gilt insbesondere für hohe Kontraste innerhalb der Blendquelle. In Anhang A.7 sind die Korrekturfaktoren für alle Aufgaben dargestellt.

Da sowohl der Kontrast als auch das Flächenverhältnis von hellen zu dunklen Flächen innerhalb der Blendquelle beim empirischen Modell zur Bestimmung der Korrekturfaktoren nach HARA (vgl. Kap. 2.6) einfließen, wurde dieses auf die Probandendaten mit  $UGR > 5$  angewendet (vgl. Abb. 4.17).

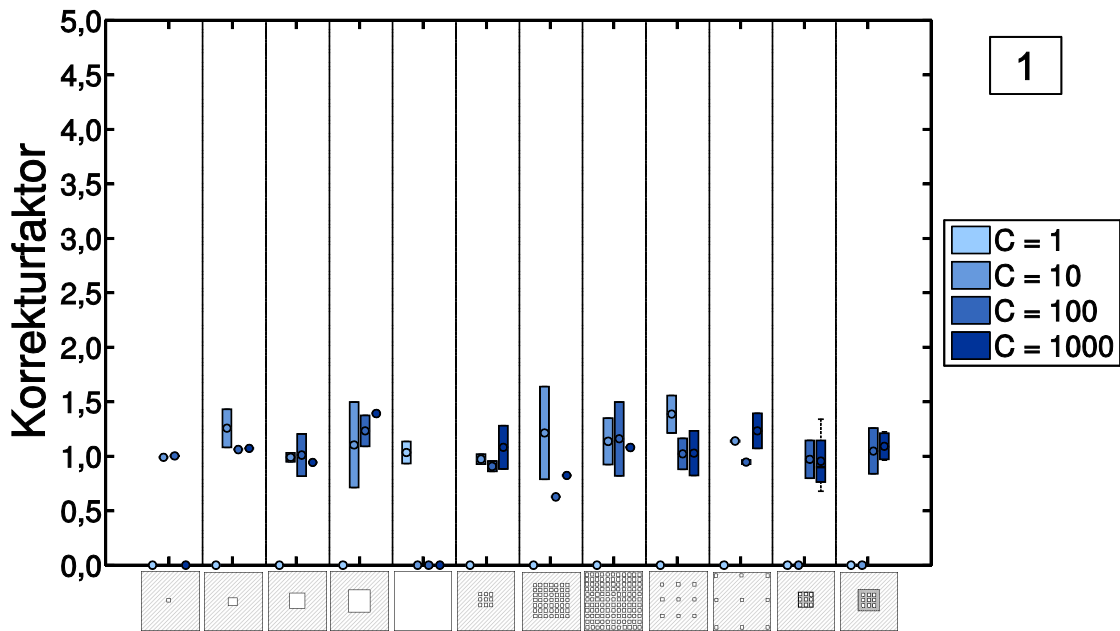


Abb. 4.15 Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Kontraste bei Aufgabe 1 ( $\vartheta = 30^\circ$  und  $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$ ). Dargestellt sind die Boxplots der relevanten 57 Konfigurationen, welche nach Struktur und Kontrast gruppiert sind. Bei den Datenpunkten mit Korrekturfaktor gleich null liegen keine Daten vor.

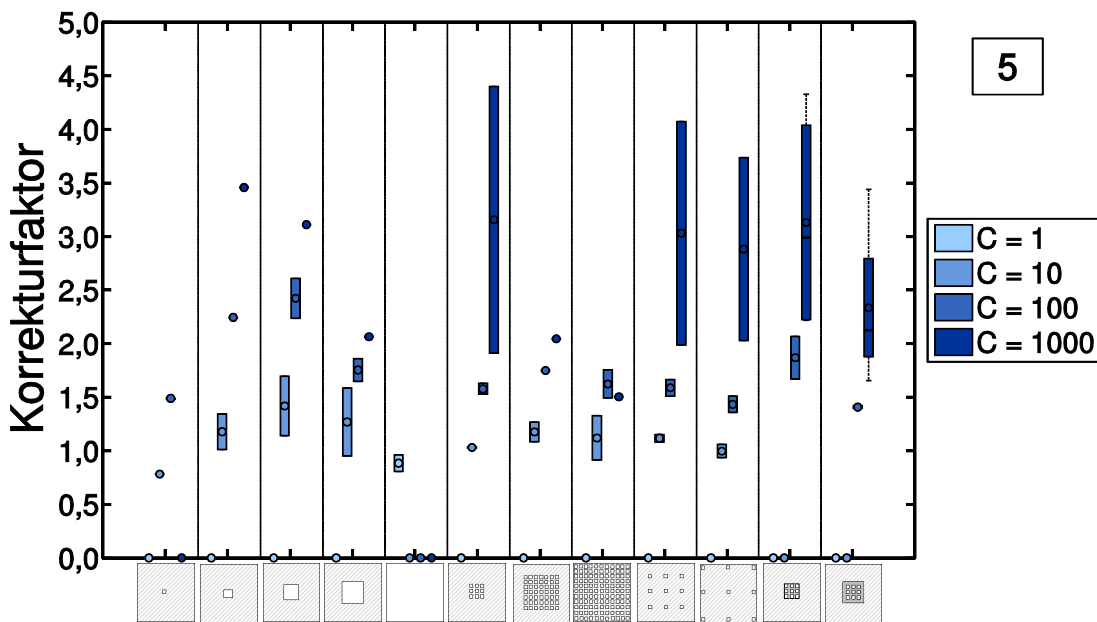


Abb. 4.16 Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Kontraste bei Aufgabe 5 ( $\vartheta = 0^\circ$  und  $L_b = 57 \dots 94 \text{ cd/m}^2$ )

In Abb. 4.17 wird ebenso deutlich, dass die Korrelation zwischen empirischem Modell (Gl. 2.16) abhängig vom Blendwinkel ist, da die blauen, dreieckigen Datenpunkte ( $\vartheta = 30^\circ$ ) unterhalb der orangen Symbole ( $\vartheta = 15^\circ$ ) und unterhalb der grünen Quadrate ( $\vartheta = 0^\circ$ ) liegen. Außerdem sind die Korrekturfaktoren der meisten Konfigurationen größer als eins. Während bei direktem Blick in die Leuchte eine mäßige Korrelation besteht, überschätzt das empirische Modell nach HARA die psychologische Blendung bei peripherem Blick. Demzufolge spielen entgegen der Hypothese von HARA neben dem Kontrast und der Uniformity noch weitere Faktoren wie der Blendwinkel eine Rolle bei der Blendungsbewertung von strukturierten LED-Leuchten.

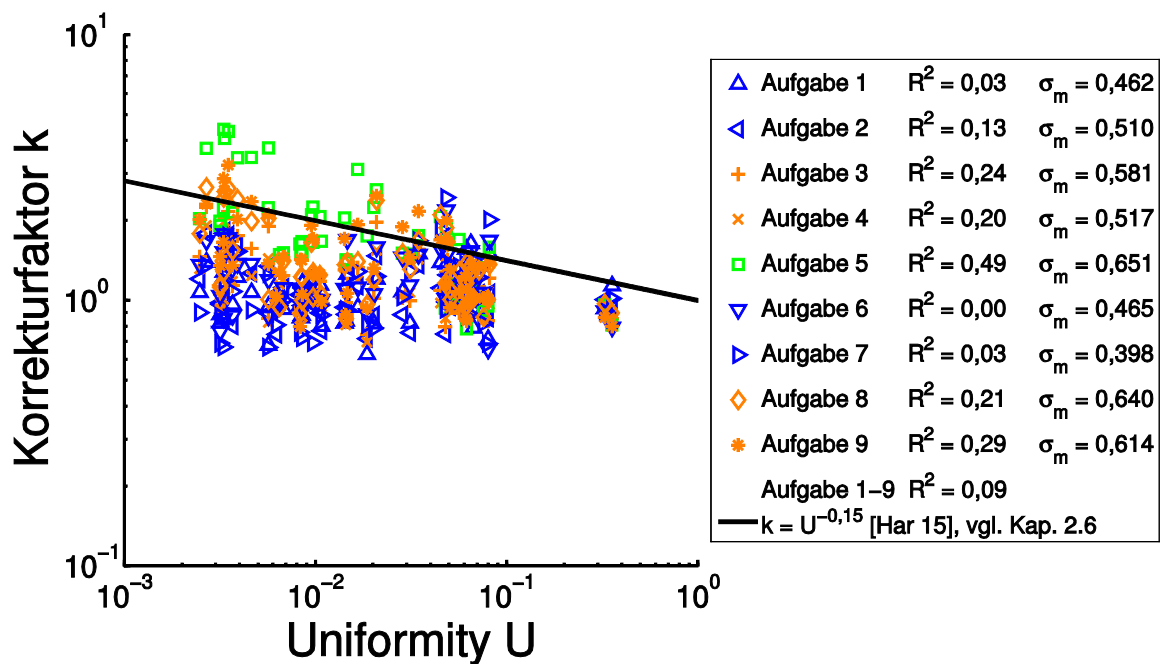


Abb. 4.17 Vergleich der empirisch ermittelten Korrekturfaktoren mit der Uniformity innerhalb der Leuchte. In der Legende sind die Bestimmtheitsmaße bei Anwendung von Gl. 2.16 sowie die mittlere Standardabweichung der Korrekturfaktoren angegeben. Die blauen Dreiecke stehen für  $\vartheta = 30^\circ$ , die orangen Sterne für  $\vartheta = 15^\circ$  und die grünen Quadrate für  $\vartheta = 0^\circ$ .

Da die vorliegende Arbeit die erste Untersuchung zur Bewertung von strukturierten LED-Leuchten beschreibt, bei der neben der Leuchtdichte der LEDs auch die Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung des LEDs variiert wurde, wurden die ermittelten Korrekturfaktoren ebenfalls nach der Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung gruppiert. In Abb. 4.18 und 4.19 ergibt sich ein ähnliches Bild wie in Abb. 4.15 und 4.16 – bei einem Blendwinkel von  $30^\circ$  haben weder die Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung noch die Blendquellenstruktur einen nennenswerten Einfluss auf das Blendempfinden. Hingegen

steigt der Korrekturfaktor in Abb. 4.19 (direkter Blick) bei sinkender Leuchtdichte und sinkendem Flächenverhältnis  $A_h/A_d$  stark an. Dies gilt insbesondere, wenn die Diffusorhinterleuchtung ausgeschaltet ist. Dann resultieren auch geringere Streuungen als bei der Gruppierung mittels Kontrasts.

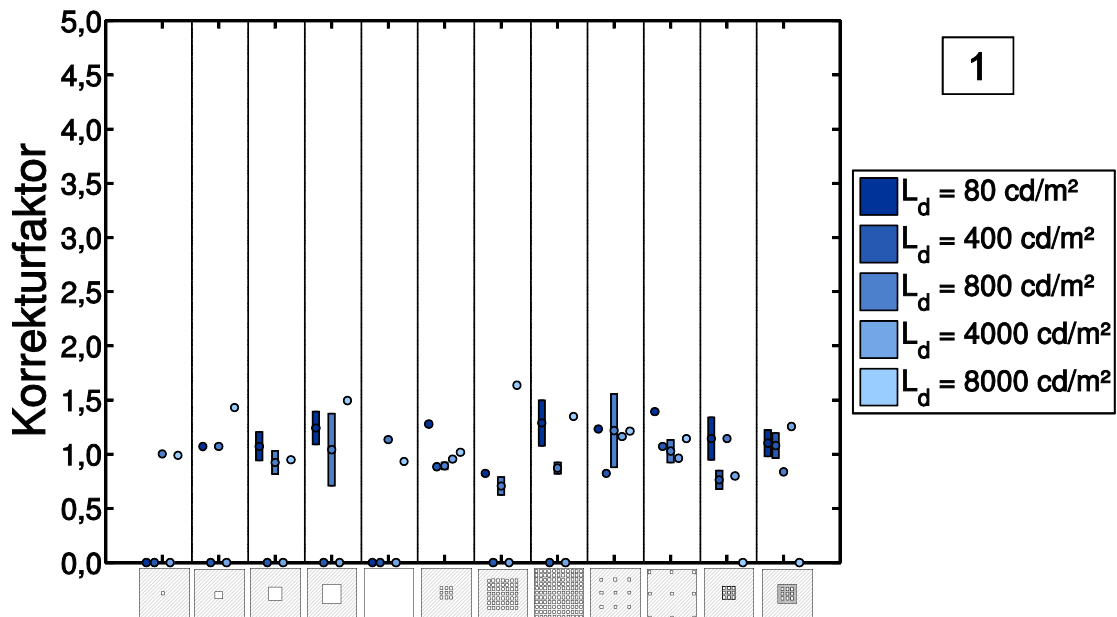


Abb. 4.18 Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung bei Aufgabe 1 ( $\vartheta = 30^\circ$  und  $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$ )

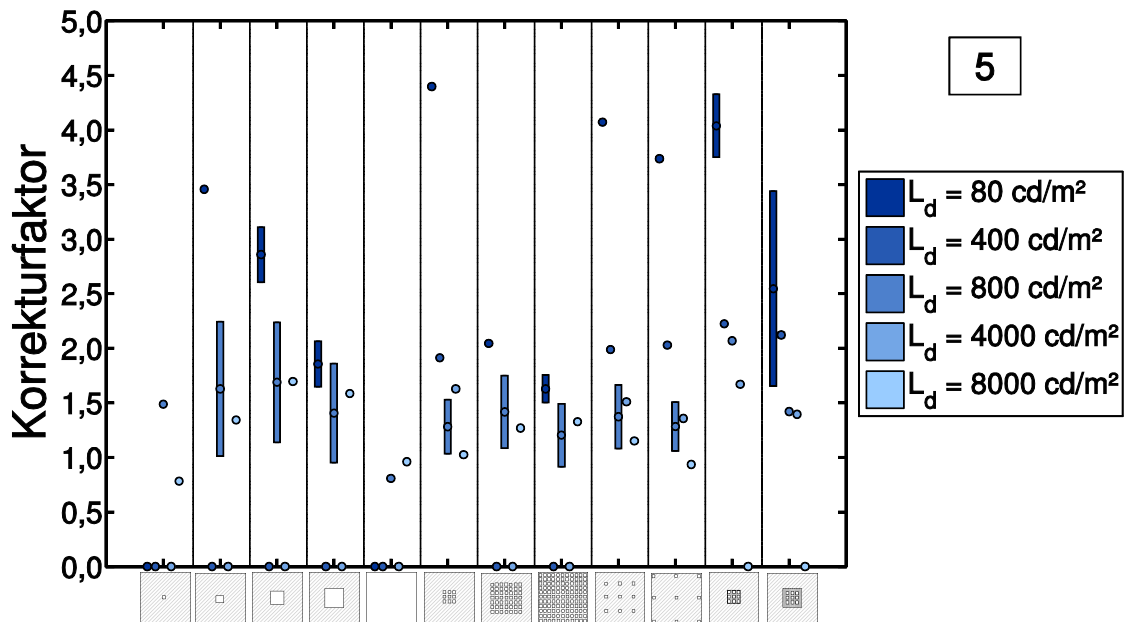


Abb. 4.19 Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung bei Aufgabe 5 ( $\vartheta = 0^\circ$  und  $L_b = 57 \dots 94 \text{ cd/m}^2$ )



### 4.3.3 Bestimmung eines Gesamtkorrekturfaktors

Abgeleitet aus den oben beschriebenen Ergebnissen wurde ein erweitertes empirisches Modell zur Bestimmung des Korrekturfaktors entwickelt. Dazu wurde eine nichtlineare Regression mit den Einflussfaktoren Leuchtdichtekontrast, Leuchtdichte des unmittelbaren Umfelds, Flächenverhältnis der LEDs zu unmittelbarer Umgebung sowie Blendwinkel bzw. Positionsindex durchgeführt. Bei der Bestimmung der Regressionsgleichung wurden die Beobachtungen aus Kap. 4.1 und 4.3.2 berücksichtigt. Zwar wäre auch eine Regression unter Berücksichtigung der „Luminance Uniformity“ nach HARA denkbar gewesen, jedoch sollten an dieser Stelle die Elemente Leuchtdichteunterschiede und Flächenverhältnisse separat betrachtet werden. Als Ergebnis wurde folgende Regressionsgleichung mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R_{korr}^2 = 0,62$  ermittelt (vgl. Gleichung 4.7 und Tab. 4.3). Darin wird deutlich, dass besonders die Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung und der Positionsindex den Korrekturfaktor beeinflussen.

$$k_{ges} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \frac{(\lg C)^{\beta_2}}{(\lg L_d)^{\beta_3} \cdot \left(\frac{\omega_{LED}}{\omega_{s,ges}}\right)^{\beta_4} \cdot p^{\beta_5}} \quad (4.7)$$

Tab. 4.3 Ermittelte Parameter aus der nichtlinearen Regression inkl. Grenzen des 95 %-Konfidenzintervalls. In allen Konfigurationen, bei denen  $L_{d1} \neq L_{d2}$  ist, wurde für die Modellbildung  $L_{d2}$  herangezogen.

$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$
1,0099	4,2994	0,4970	3,4619	0,1912	1,7358
$\pm 0,0506$	$\pm 3,0502$	$\pm 0,4784$	$\pm 0,6589$	$\pm 0,0564$	$\pm 0,2187$

Neben der finalen Regressionsgleichung wurden auch weitere nichtlineare Modelle überprüft sowie eine multiple lineare Regression durchgeführt. Bei allen betrachteten Modellen sind die ermittelten Bestimmtheitsmaße geringer als 0,62. Bei der nichtlinearen Regression mit der Uniformity und dem Positionsindex resultiert ein Bestimmtheitsmaß von  $R_{korr}^2 = 0,42$ . Des Weiteren spiegelt das finale Modell recht gut die bisherigen Beobachtungen wider: Wenn der Kontrast innerhalb der Leuchte gegen 1 geht, ist der Korrekturfaktor ebenfalls gleich 1. Außerdem wird deutlich, dass ebenfalls der Blendwinkel und besonders die Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung einen maßgeblichen Anteil am Korrekturfaktor haben. Mit dem in Gleichung 4.7 dargestellten Modell kann das Bestimmtheitsmaß der Blendurteil-UGR-Korrelation durch Korrektur der effektiven Leuchtdichte (vgl. Gl. 2.15) von 0,88 auf 0,90 steigern. Mit

dem Korrekturfaktormodell nach HARA (Gl. 2.16) ergibt sich hingegen eine Verschlechterung des Bestimmtheitsmaßes von 0,88 auf 0,87 für die vorliegenden Daten. Beide Modelle verbessern vor allem die Blendungsvorhersage für den direkten Blick in die Blendquelle. Für beide Modelle sind in Abb. 4.20 und 4.21 die berechneten Korrekturfaktoren gegen den empirischen Korrekturfaktor aufgetragen. Darin erkennt man für die Ergebnisse dieser Studie eine Verbesserung der Korrelation.

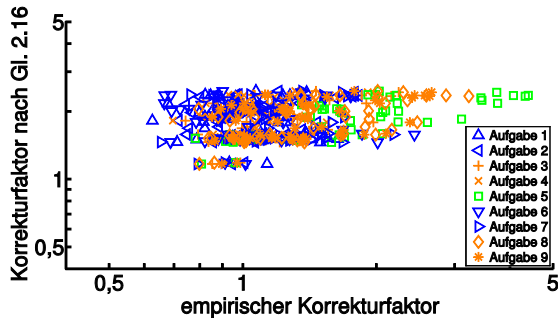


Abb. 4.20 Korrelation zwischen empirischen und dem nach HARA berechneten Korrekturfaktor

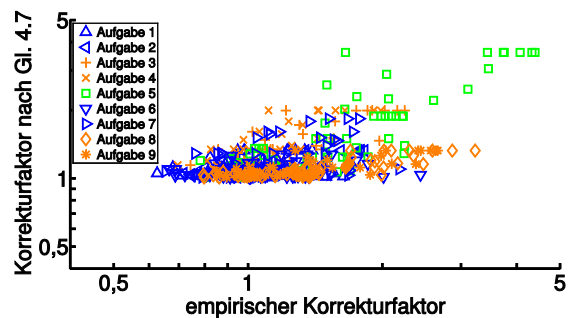


Abb. 4.21 Korrelation zwischen empirischen und dem nach dem Modell aus dieser Arbeit berechneten Korrekturfaktor

## 4.4 Vergleich der Probandenurteile mit berechneten UGR-Werten nach WOLF

### 4.4.1 Berechnung der UGR-Werte nach WOLF

Alternativ zum klassischen UGR-Verfahren und den Korrekturfaktoren nach HARA kann man auch die tatsächlich leuchtende bzw. blendende Fläche als Bewertungsgrundlage der mittleren Leuchtdichte und des Raumwinkels definieren. Dies ist bei strukturierten LED-Leuchten und besonders bei LED-Matrixleuchten realistischer als die Mittelung über die gesamte geometrische Fläche der Leuchte. Da jedoch auch bei LED-Matrixleuchten die unmittelbare Umgebung der LEDs ab einer bestimmten Leuchtdichte zur wahrgenommenen Blendung beiträgt, stellt sich eine einheitliche Definition der leuchtenden Fläche als schwierig heraus. Hinzu kommt, dass eine reine Deklaration der LEDs als Blendquelle zu hohe UGR-Werte ergeben würde. Folglich muss eine geeignete Kontrast- oder Leuchtdichteschwelle ermittelt werden, um die Blendquelle gemäß UGR-Verfahren vom Hintergrund zu unterscheiden.

Die festen Leuchtdichteschwellen aus [Cie 95b] bieten eine gute Basis zur Bestimmung von Schwellen für LED-Leuchten, haben jedoch den Nachteil, dass Änderungen der Hintergrundleuchtdichte nicht berücksichtigt werden. Zur messtechnischen Bestimmung der Leuchtdichteschwelle bei LED-Leuchten

wurde von SCHEIR [SCHei 15b] ein adaptives Verfahren vorgestellt (vgl. Kap. 2.6). Bei dieser Methode wird ein Wert von 5...50 % der maximal gemessenen Leuchtdichte als Leuchtdichteschwelle definiert. Nachteilig an dieser Variante ist, dass die Leuchtdichteschwelle dadurch sehr stark vom Wert der maximal gemessenen Leuchtdichte abhängt und daher nicht robust ist. Außerdem wurde dieses Verfahren bisher nur für wenige Leuchtdichtestrukturen und Blickrichtungen validiert. Damit die ermittelte Leuchtdichteschwelle nicht nur auf dem Wert eines Pixels beruht, wird in dieser Arbeit das Verfahren nach WOLF [Wol 04] näher betrachtet. In diesem Verfahren werden die Histogramme des Leuchtdichtebilds ausgewertet und im ersten lokalen Minimum des Histogramms die Leuchtdichteschwelle definiert (vgl. Kap. 2.4.3 sowie Abb. 4.22 bis 4.24).

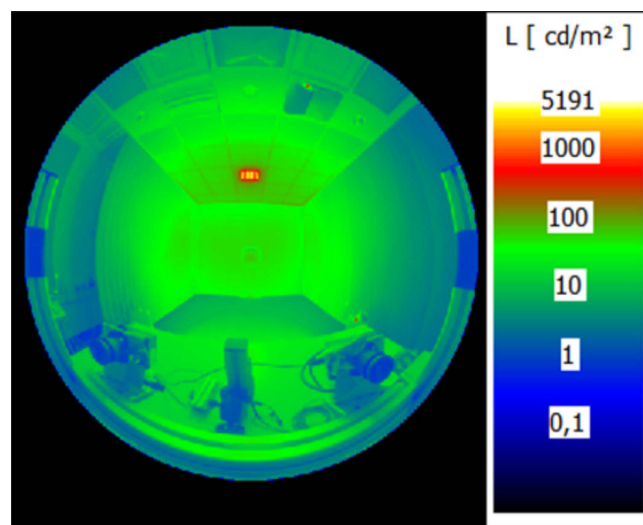


Abb. 4.22 Leuchtdichtebild des Untersuchungsraums mit Fischauge-Objektiv bei Konfiguration 35

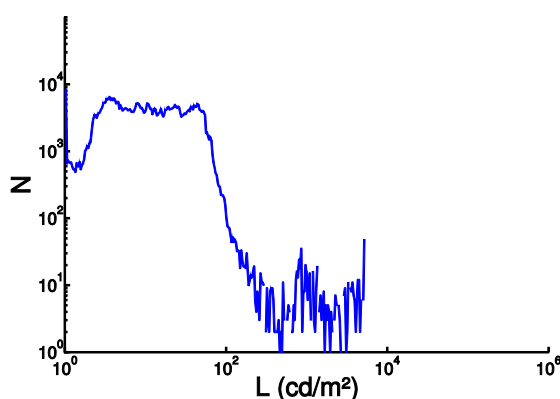


Abb. 4.23 Leuchtdichtehistogramm von Konfiguration 35

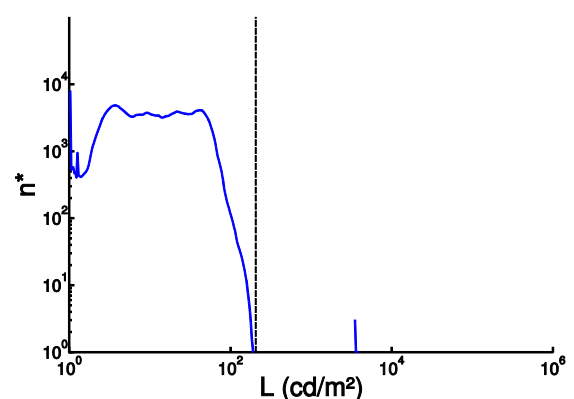


Abb. 4.24 Gefiltertes und geglättetes Leuchtdichtehistogramm mit Leuchtdichteschwelle

In der vorliegenden Arbeit wurde das WOLF-Verfahren zunächst auf eine einzelne Aufnahme mit LMK und Fischauge-Objektiv angewendet. Gemäß Abb. 4.23 und Abb. 4.24 wird das Histogramm des Leuchtdichtebilds des gesamten Raums zunächst gefiltert und anschließend geglättet, um die Leuchtdichteschwelle im geglätteten Bild zu finden. Die Parameter zur Glättung und Filterung wurden aus [Wol 04] entnommen. Alle Pixel oberhalb der Leuchtdichteschwelle wurden als Blendquelle betrachtet; aus den restlichen Pixeln (im Bereich von  $\pm 20^\circ$  zur Blickrichtung) wurde die Hintergrundleuchtdichte berechnet. Bereits mit dieser willkürlichen, relativ niedrigen Auflösung lassen sich für die vorliegenden Daten bereits bessere Ergebnisse als mit dem konventionellen UGR-Verfahren bei gleicher Auflösung erzielen, wie im Vergleich von Abb. 4.14 und Abb. 4.25 deutlich wird. Jedoch ist das Bestimmtheitsmaß mit  $R^2 = 0,73$  noch relativ niedrig, sodass für dieses Verfahren noch Verbesserungspotenzial besteht.

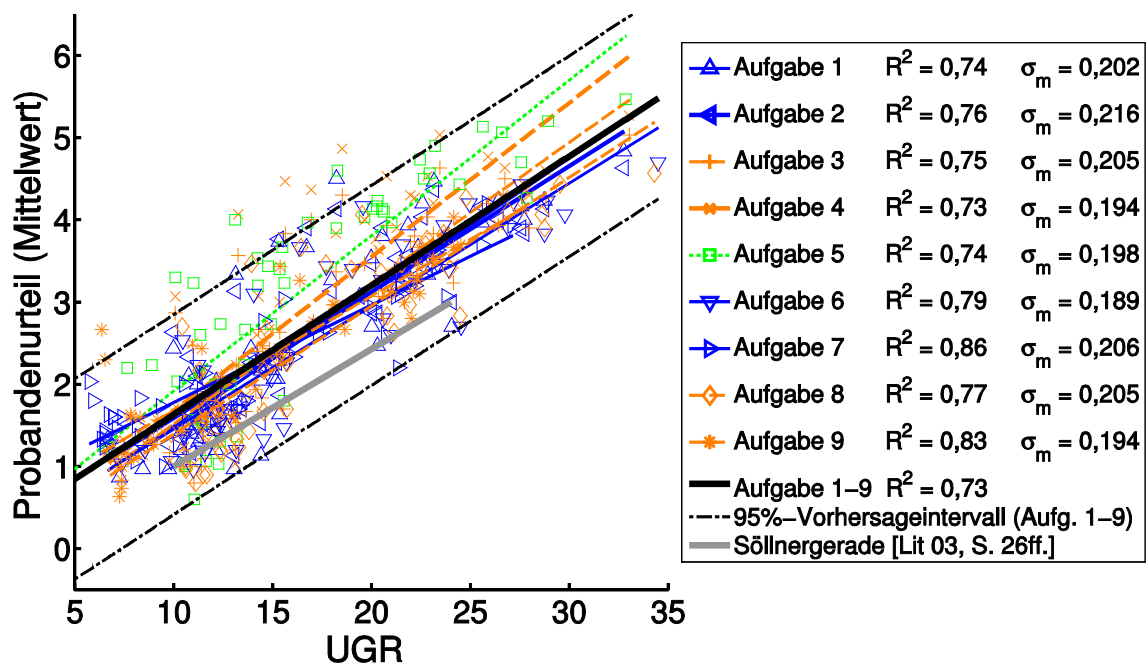


Abb. 4.25 Vergleich der Blendurteile mit den UGR-Werten nach WOLF für die reduzierte Messauflösung mit Fischauge-Objektiv (Verwendung der Positionsindizes nach [Kim 11])

#### 4.4.2 Erweiterung des Algorithmus für LED-Leuchten

Bereits in Kap. 4.2.3 wurde gezeigt, dass die Messauflösung besonders bei strukturierten LED-Leuchten eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung von UGR-Werten spielt. Deshalb wurde auch für das WOLF-Verfahren eine

höhere Messauflösung realisiert. Dazu wurden analog Kap. 4.2 die Leuchtdichteaufnahmen mit 25 mm-Objektiv und Fischauge-Objektiv miteinander verrechnet. Konkret wurde dies umgesetzt, indem der Ausschnitt des Detailbildes zur Berechnung der Blendquellenparameter genutzt wurde und der entsprechende Ausschnitt im Raumbild entfernt wurde (vgl. Abb. 4.27 und 4.28). Der effektive Blendwinkel  $\vartheta_{\text{eff}}$  eines Leuchtdichtepixels wird für die Nennblendwinkel  $\vartheta_0 = 15^\circ$  und  $\vartheta_0 = 30^\circ$  aus dem Nennblendwinkel  $\vartheta_0$  und dem Winkel im hochaufgelösten Leuchtdichtebild  $\vartheta_{25\text{mm}}$  berechnet (vgl. Abb. 4.26). Der Winkel  $\vartheta_0$  beschreibt den Winkel zwischen Beobachtungsrichtung und Mitte der Leuchte und der Winkel  $\vartheta_{25\text{mm}}$  ist im Zentrum der Leuchte gleich Null und nimmt rotationssymmetrisch nach außen zu.

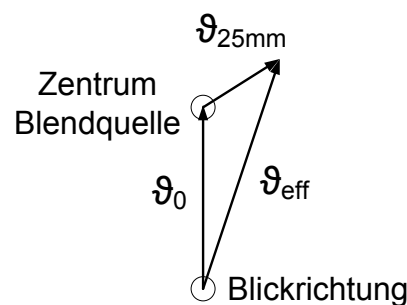


Abb. 4.26 Schematische Darstellung der Winkel  $\vartheta_0$ ,  $\vartheta_{25\text{mm}}$  und  $\vartheta_{\text{eff}}$  bei Zusammensetzung der beiden Leuchtdichtebilder

Die Berechnung erfolgt nach Gl. 4.8. Dabei wird der Kosinussatz auf das Dreieck von  $\vartheta_{\text{eff}}$ ,  $\vartheta_0$  und  $\vartheta_{25\text{mm}}$  im verrechneten Leuchtdichtebild angewendet. Durch die Projektion der Winkel in eine gemeinsame Ebene ein (geringer) Verzerrungsfehler, welcher aus Sicht des Verfassers bei dieser Berechnung vernachlässigt werden können, da für  $\vartheta_0 = 15^\circ$  bzw.  $\vartheta_0 = 30^\circ$  und  $\vartheta_{25\text{mm}} < 8^\circ$  geringe Abweichungen einzelner effektiver Pixelblendwinkel bei der Berechnung der Positionsindizes oder UGR-Werte keinen nennenswerten Einfluss haben. Für  $\vartheta_0 = 0^\circ$  muss selbstverständlich keine Verrechnung der Leuchtdichtebilder erfolgen.

$$\vartheta_{\text{eff}} \approx \sqrt{\vartheta_0^2 + \vartheta_{25\text{mm}}^2 - 2 \cdot \vartheta_0 \cdot \vartheta_{25\text{mm}}} \quad (4.8)$$

In jedem Fall spielt jedoch die messtechnische Auflösung der Blendquelle bei der UGR-Berechnung eine entscheidende Rolle. Diese sollte gleich der Auflösung des Auges an der entsprechenden Position des Bildes auf der Netzhaut sein (vgl. Kap. 2.2.2).

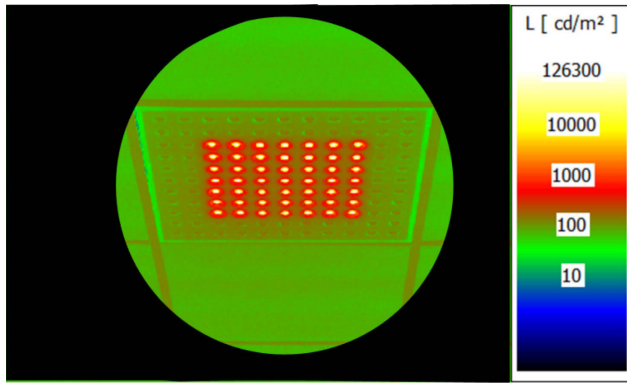


Abb. 4.27 Verwendung eines Messbilds mit höherer Auflösung zur Verbesserung der Blendquellenauflösung

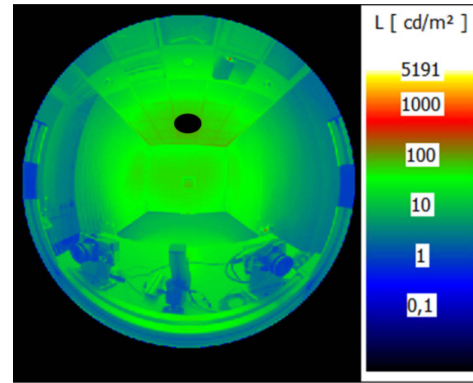


Abb. 4.28 Ausschnitt der Blendquelle im Raumbild

Folglich muss das detaillierte Leuchtdichtebild, welches horizontal und vertikal eine Auflösung von  $0,014^\circ/\text{px}$  (bzw.  $6,6 \cdot 10^{-8}^\circ/\text{sr}$ ) aufweist (Auflösung des Auges in der Fovea: ca.  $1' \approx 0,0167^\circ$ ), für die Blendwinkel  $15^\circ$  und  $30^\circ$  herunterskaliert werden. Dies wurde in der vorliegenden Arbeit durch Pixelbinning umgesetzt. Dazu wurden die orts aufgelösten Leuchtdichtewerte im herunterskalierten Bild durch Mittelwertbildung der benachbarten Pixelwerte im Originalbild bestimmt (vgl. Abb. 4.28). Im neuen, herunterskalierten Leuchtdichtebild erhalten somit alle Pixel innerhalb des Mittelungsquadrats den gleichen Leuchtdichtewert. Die Kantenlänge des Mittelungsquadrats berechnet sich aus dem Verhältnis zwischen der Auflösung des Auges beim zu untersuchenden Blendwinkel und der Originalbildauflösung:

$$\text{Kantenlänge} = \frac{\text{Auflösung des Auges bei } \vartheta \text{ in } ^\circ}{\text{Auflösung des Leuchtdichtebilds in } ^\circ/\text{px (25mm)}} \quad (4.9)$$

Alternativ zum Pixelbinning wurde auch eine Faltung mit Rechteck- oder Gaußfilter zur Bildglättung getestet. Damit wurden ähnliche Ergebnisse erzielt, obwohl bei einer Faltung, im Gegensatz zum Pixelbinning, jeder Pixelwert separat berechnet wird. Die Faltung des Bildes bietet sich besonders an, wenn das Bild über einen großen Blendwinkelbereich geglättet werden soll (bspw. hochauflösende Weitwinkelaufnahmen oder zusammengesetzte Leuchtdichtebilder). Für die vorhandenen Detailaufnahmen einer einzelnen Blendquelle stellt das Pixelbinning aus Sicht des Verfassers jedoch die realistischste Variante zur messtechnischen Auflösungsreduzierung dar, da bei einer Kamera-Objektiv-Kombination mit geringer Auflösung entsprechend weniger Pixel vorhanden sind. Das gleiche gilt für die Netzhaut, deren Auflösung bzw. Zapfendichte in der Peripherie abnimmt.

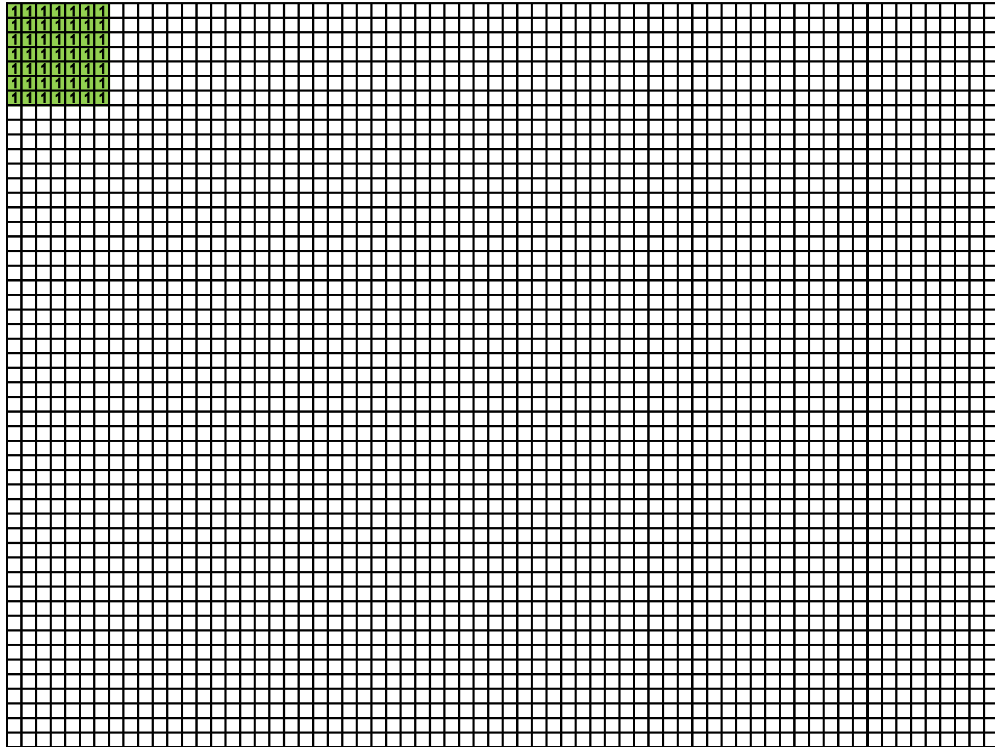


Abb. 4.29 Schematische Darstellung der Herunterskalierung der Auflösung des Leuchtdichtebilds entsprechend der Auflösung des Auges. Die Zahlen entsprechen der Wichtung der Pixel (in diesem Bild jeweils multipliziert mit 49, da über 49 Pixel gemittelt wurde).

Aus der skalierten Leuchtdichteaufnahme der Blendquelle und der Weitwinkelaufnahme kann anschließend unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Bildauflösung die „neue“ Leuchtdichteschwelle ermittelt werden. Praktisch wurde dies umgesetzt, indem zunächst das Verhältnis der Bildpunktanzahl zwischen Detailaufnahme und Weitwinkelaufnahme berechnet wird und anschließend für das Leuchtdichtehistogramm die Anzahl jedes Pixels im Weitwinkel-leuchtdichtebild mit diesem Verhältnis multipliziert und anschließend auf eine ganze Zahl gerundet wird. Die Pixel des Weitwinkelbilds werden somit mehrfach gezählt. Die derart berechnete Schwelle unterscheidet sich bereits in vielen Fällen von der Schwelle bei geringer Auflösung.

Bevor die UGR-Werte berechnet werden können, muss das Leuchtdichtebild noch an die Sättigungsleuchtdichte der Zapfen und die für die Blendempfindung wichtigen perzeptiven Felder angepasst werden. Die maximal wahrnehmbare Leuchtdichte der Zapfen in der Peripherie wird durch die Adaptationsleuchtdichte bestimmt. Gemäß den Ausführungen in Kap. 2.2.2 und 3.8 wurde deshalb für periphere Blendwinkel eine Sättigung bei  $L_{px} = 3 \cdot 10^5 \text{ cd/m}^2$  (mittlerer Pupillendurchmesser 3,5 mm) angenommen. Bei direktem Blick in die

Blendquelle wurde keine Sättigungsleuchtdichte implementiert. Anschließend muss das Leuchtdichtebild für alle Blendwinkel noch weiter geglättet werden, um die Größe der perzeptiven Felder zu berücksichtigen. Die Größe der perzeptiven Felder wurde nach Gleichung 2.1 berechnet. Für die Glättung wurde in diesem Fall die Gaußglättung (bzw. Gaußfilterung) mit  $\sigma$  gleich Felddurchmesser  $D_M$  gewählt, da die perzeptiven Felder gemäß [STra 03, S. 178f.; Fis 70, S. 451] eine Gauß-ähnliche Empfindlichkeitsverteilung aufweisen. Mit Hilfe von Gleichung 4.10 erhält man die Standardabweichung des Gaußfilters. Die Größe des Gaußfilters wurde in dieser Arbeit auf  $3\sigma$  festgelegt, um nahezu alle relevanten Pixel zu berücksichtigen ( $3\sigma \hat{=} 99,73\%$ ).

$$D_{M,px} = \frac{(0,1773 + 0,0342 \cdot \vartheta)}{\text{Auflösung des Leuchtdichtebilds in } ^\circ/\text{px (25mm)}} \quad (4.10)$$

Aus dem zweifach geglätteten Bild und der dynamisch ermittelten Leuchtdichteschwelle können schließlich die tatsächlich leuchtenden Flächen ermittelt werden. Wie in [Wol 04] wurde jede zusammenhängende leuchtende Fläche als Blendquelle im UGR-Verfahren behandelt. Die resultierenden UGR-Werte sind in Abb. 4.29 den Probandenurteilen gegenübergestellt. Darin wird deutlich, dass mit dem optimierten Verfahren nach WOLF eine Blendungsbewertung von strukturierten Leuchten mit hoher Aussagekraft durchgeführt werden kann.

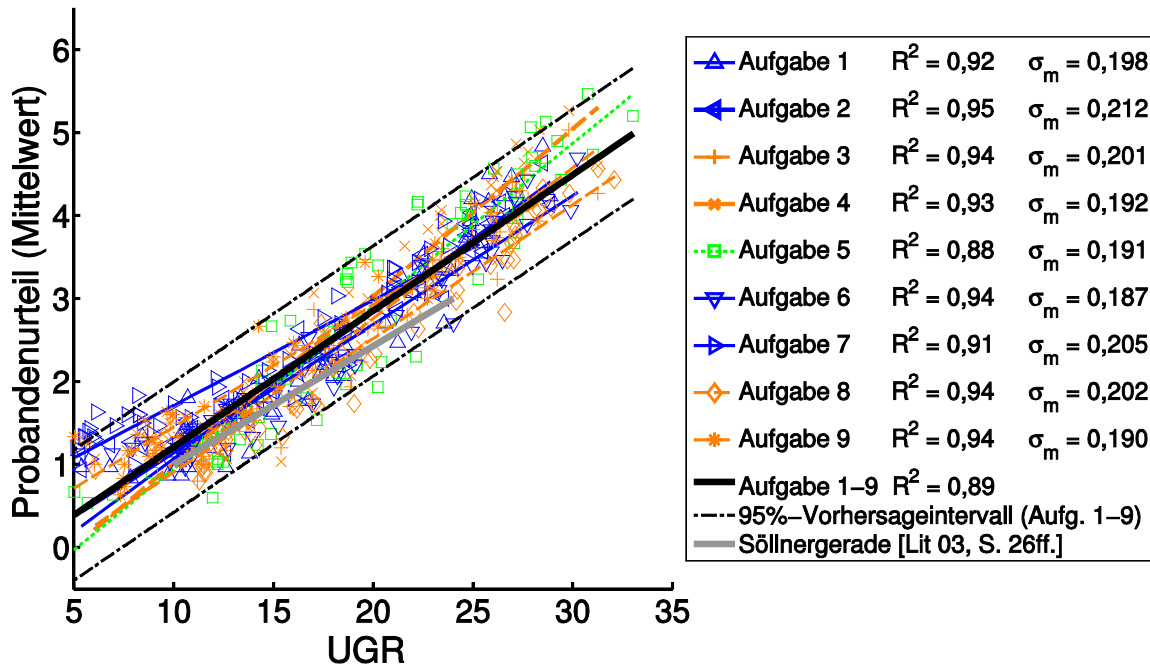


Abb. 4.30 Vergleich der Blendurteile mit den UGR-Werten nach WOLF für die Messauflösung gemäß der Auflösung des Auges und Positionsindizes nach [Kim 11]



## 5 Schlussdiskussion

### 5.1 Überprüfung der Forschungshypothesen

In den Kapiteln 4.1.4, 4.2.2 und 4.3.2 wurde deutlich, dass der Einfluss der Leuchtdichtestruktur bei einem Blendwinkel von  $30^\circ$  nur sehr wenig ausgeprägt ist. Bei einem Blendwinkel von  $15^\circ$  hat der Leuchtdichtekontrast innerhalb der Blendquelle einen geringen, aber merkbaren negativen Einfluss auf die Störungsempfindung (vgl. Kap. 4.2.2). Bei direktem Blick in die Blendquelle wirkt sich die Leuchtdichtestruktur stark aus. Folglich konnte Forschungshypothese 1 nur für den direkten Blick in die Leuchte eindeutig und für einen Blendwinkel von  $15^\circ$  eingeschränkt bestätigt werden. Bei peripherem Blick ab  $30^\circ$  Blendwinkel wirkt sich der Kontrast fast nicht mehr auf die Blendungsbewertung aus. Damit wurde Forschungshypothese 2 verifiziert.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass das Blendurteil der Probanden für die Untersuchungsbedingungen unabhängig vom Abstand der LED-Punkte innerhalb der Leuchte ist. Dies konnte für alle Blendwinkel und Hintergrundleuchtdichten beobachtet werden, auch wenn die LEDs als eine gemeinsame Fläche dargeboten werden. Forschungshypothese 3 wurde damit nicht verifiziert.

Analog zur Forschungshypothese 2 wurde deutlich, dass auch bei 49 und 121 LEDs eine Summation der leuchtenden Fläche und damit der UGR-Werte gültig ist. Dies wurde für alle Blickrichtungen und Hintergrundleuchtdichten festgestellt. Somit wurde auch Forschungshypothese 4 nicht bestätigt.

Folglich hängt das Blendurteil vorwiegend von der Größe und der Leuchtdichte der LEDs sowie der Größe und der Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung der LEDs ab. Zur Bewertung der Struktur wurden zwei Verfahren angewandt: zum einen das korrigierte UGR-Verfahren mit Korrekturfaktoren nach HARA und zum anderen das erweiterte UGR-Verfahren mit Bestimmung der Leuchtdichteschwelle nach WOLF und psycho-physiologisch angepasster Verarbeitung der Messwerte. Für die Korrekturfaktoren nach HARA wurde ein verbessertes empirisches Modell erarbeitet, welches es ermöglicht, die Korrekturfaktoren einer strukturierten Leuchte auch ohne zusätzliche Probandentests zu bestimmen. Bei dem erweiterten UGR-Verfahren wurden die vorhandenen Verfahrensparameter nach WOLF mit den physiologischen Eigenschaften des Auges kombiniert.

## 5.2 Vergleich der Probandenurteile mit den Ergebnissen der Voruntersuchungen

In Kap. 3.8 wurde deutlich, dass weder die Lidschlagrate noch die Häufigkeit der registrierten Fixationen oder Sakkaden einen Einfluss auf die Blendempfindlichkeit haben. Jedoch konnte ein Zusammenhang zwischen Pupillengröße und mittlerer Blendquellenleuchtdichte festgestellt werden. Da sich auch die Aufgabenschwierigkeit auf die Blendempfindung auswirkt (vgl. Kap. 2.2), wird an dieser Stelle der Zusammenhang von mittlerer Pupillengröße, Aufgabenschwierigkeit und Blendurteil untersucht. In Abb. 5.1 sind analog zu Abb. 4.8 die Probandenurteile gegenüber den mittleren Pupillengrößen der 26 Probanden aufgetragen, bei denen die Pupillendetektion zuverlässig funktionierte. Darin erkennt man eine sehr gute Korrelation zwischen Blendungsbewertungen und Pupillengröße.

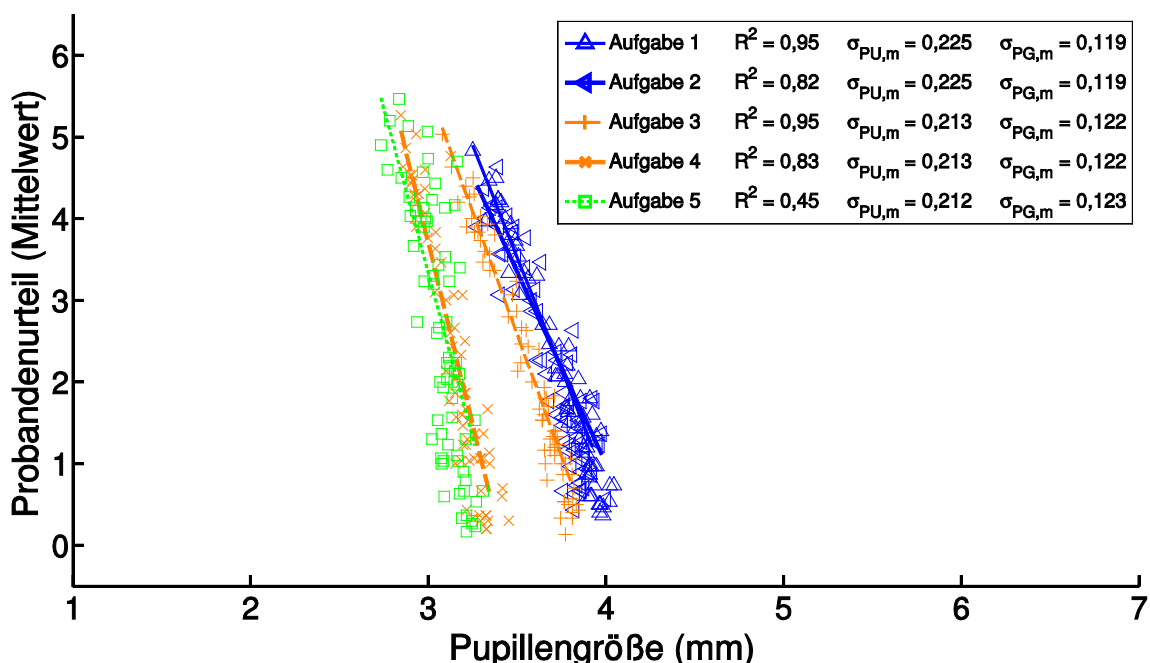


Abb. 5.1 Vergleich der Blendurteile und der mittleren Pupillengröße von 26 Probanden bei verschiedenen Blendwinkeln und Aufgabenschwierigkeiten

Jedoch hängt die Pupillengröße ebenfalls von der Aufgabe ab. Bei den Aufgaben mit kurzer Blickdauer (Aufgabe 4 und 5) ist die Pupille insgesamt deutlich kleiner als bei den restlichen Aufgaben. Bei Aufgabe 5 ist darüber hinaus das Bestimmtheitsmaß geringer. Ebenso unterscheiden sich die Pupillengrößen in Aufgabe 3 nennenswert von denen in Aufgabe 1 und 2. Da die Blickdauer und der Blendwinkel die Pupillengröße stark und die psychologische Blendung in dieser Studie fast nicht beeinflussen, liegt der Verdacht nahe, dass die Pupillen-

größe eher mit der physiologischen Blendung und der Beleuchtungsstärke auf der Cornea zusammenhängt. Die Korrelation zur psychologischen Blendung ergibt sich aus dem Zusammenhang psychologischer Blendung und physiologischer Blendung bei ähnlichen Leuchtenanordnungen [Jia 13]. Beim Umschalten auf eine neue Konfiguration beginnt der Adaptationsprozess zunächst mit der Pupillengröße. Bei kurzen Konfigurationen und geringen Blendwinkeln ist die Pupille damit insgesamt kleiner. Ob die Pupillengröße tatsächlich zur Vorhersage der psychologischen Blendung geeignet ist, kann beispielsweise durch Vergleich der Pupillengrößen bei unterschiedlichen Strukturen mit gleicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte ermittelt werden. In Abb. 5.2 ist dieser Vergleich analog zu Abb. 4.7 für Aufgabe 5 dargestellt.

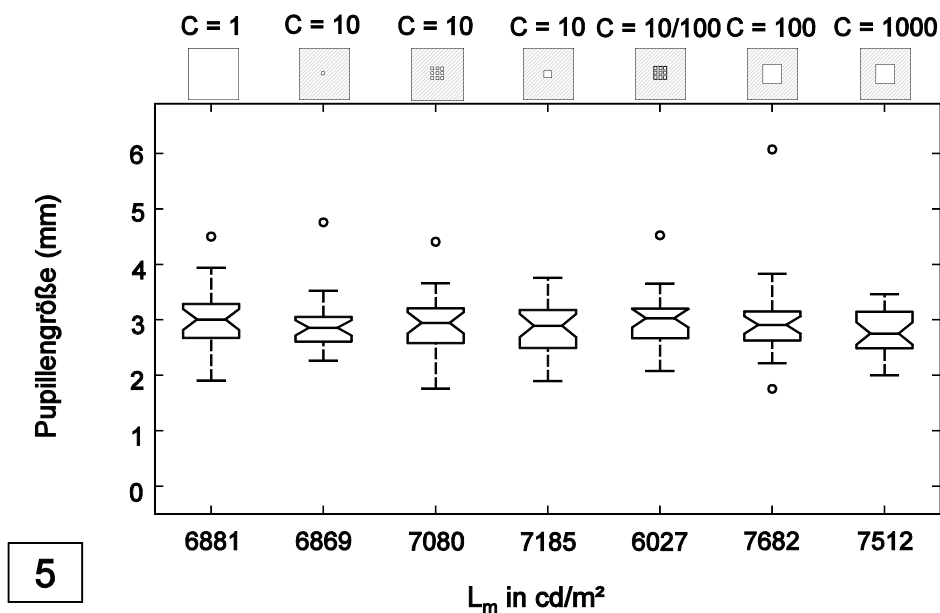


Abb. 5.2 Mittlere Pupillengröße von 26 Probanden bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte bei Aufgabe 5 (direkter Blick in die Blendquelle)

Obwohl bei direktem Blick in die Blendquelle die psychologische Blendung zunimmt (vgl. Kap 4.1.4), ändert sich die Pupillengröße nicht nennenswert. Folglich kann die Pupillengröße nur eingeschränkt zur Prädiktion der psychologischen Blendung genutzt werden. Nicht aus der absoluten Pupillengröße, sondern ausschließlich durch Vergleich der relativen Pupillengröße bei gleichen Beobachtungsdauern und Blendwinkeln können Schlussfolgerungen getroffen werden: Ist die Pupillengröße einer Person bzw. die mittlere Pupillengröße einer Personengruppe bei einer bestimmten Beleuchtungssituation kleiner als bei einer Referenzsituation, ist die physiologische Blendung höher und somit häufig auch die psychologische Blendung [Jia 13] (vorausgesetzt, bei der zu bewertenden Beleuchtungs- und Referenzsituation war die Person vorher auf die

gleiche Ursprungssituation adaptiert). Folglich sinkt besonders bei komplexen Räumen und langen Beobachtungsdauern die Aussagekraft der Pupillengröße. Hinsichtlich der Aufgabenschwierigkeit kann abschließend keine sichere Aussage getroffen werden. Aufgabe 1 und 2 (visueller bzw. akustischer KLT) weisen nahezu die gleichen Probandenurteile und Pupillengrößen auf. Aufgabe 3 und 4 (visueller KLT bzw. Punkt beobachten) wurden bei niedrigen UGR-Werten gleich bewertet und unterscheiden sich dann bei höheren UGR Werten um ca. 0,5 auf der Söllner-Skala (vgl. Abb. 4.10). Dabei wird Aufgabe 4 mit geringerer Schwierigkeit etwas kritischer bewertet. Bei der Pupillengröße ergibt sich hingegen ein deutlicher Unterschied. Inwiefern beides durch die unterschiedliche Darbietungszeit beeinflusst wird, kann nicht sicher beantwortet werden.

### 5.3 Vergleich der Ergebnisse mit anderen Arbeiten

#### 5.3.1 Einfluss der Leuchtdichtestruktur

Entsprechend der Ausführungen in Kap. 2.5 kann in dieser Arbeit bestätigt werden, dass strukturelle Effekte der Blendquelle vor allem bei fovealer Betrachtung und kleinen Blendwinkeln ( $< 15^\circ$ ) einen Einfluss auf die psychologische Blendung haben. Damit stimmen die Ergebnisse weitestgehend mit den bisherigen Studien überein [Kas 06; Lee 07; Tak 07; Jun 09; Tas 11; Har 11; Mat 12; Van 12; Aya 13; Hig 13; Kog 13; Gee 14; SCHei 15b; Tas 15; Lou 15; Yan 15a; Yan 15b]. Insbesondere die Studien, in denen verschiedene Blendwinkel dargeboten werden, entsprechen den Feststellungen dieser Arbeit [Kas 06; Tak 07; Van 12; Hig 13; Lou15; SCHei 15b]. Beispielsweise finden HIGASHI ET AL. [Hig 13] bei indirektem Blick (Blendwinkel  $16^\circ$  bzw.  $37^\circ$ ) und sehr hohen Kontraste innerhalb der Leuchte ( $U = 0,01$ ) eine Blendungszunahme vor allem für niedrige UGR-Werte ( $UGR < 16$ ) heraus. Bei einem Blendwinkel von  $16^\circ$  zeigt sich jedoch auch für höhere UGR-Werte eine Blendungszunahme bei sehr hohen Kontrasten. Besonders deutlich wird dieser Effekt bei direktem Blick in die Blendquelle: je näher der Proband in Richtung Blendquelle schaut, desto größer ist der Einfluss des Kontrasts innerhalb der Blendquelle. Damit decken sich die Ergebnisse von Higashi et al. sehr gut mit denen der vorliegenden Studie. Darüber hinaus wird in dieser Studie erstmalig deutlich, dass dieser Kontrasteinfluss insbesondere für Leuchten mit dunkler unmittelbarer Umgebung gilt. Bei steigender Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung spielen die strukturellen Effekte eine geringere Rolle – auch bei direktem Blick in die Blendquelle.

Der Abstand der LEDs innerhalb der Blendquelle hatte für die vorliegenden Untersuchungsbedingungen keinen Einfluss auf das Blendurteil – bei allen betrachteten Blendwinkeln. Dies deckt sich mit den Untersuchungen von TASHIRO et al. [Tas 15] und EBERBACH [Ebe 74], die ähnliche Beobachtungen für feste Blendwinkel von jeweils  $8,5^\circ$  und  $10^\circ$  bei ähnlichen Lichtquellenabständen ( $0,2^\circ \dots 5^\circ$  bzw.  $0,14^\circ \dots 0,85^\circ$ ) festgehalten haben. Im Gegensatz dazu berichten DONNERS et al. [Don 15] von zunehmenden Blendurteilen bei steigenden LED-Abständen für direkten Blick, jedoch mit insgesamt geringeren LED-Abständen als TASHIRO et al. und EBERBACH. Das deutet daraufhin hin, dass die Blendung zunimmt, wenn sich der Abstand der LEDs in der Nähe der maximalen Sehschärfe in der Fovea befindet. DONNERS et al. versuchen diese Unterschiede mit einem Modell der rezeptiven Felder zu erklären, bei dem die Signalantwort der Rezeptoren aus dem Leuchtdichtebild vorhergesagt wird. Die Berechnungsparameter des Modells (Pixelauflösung, rezeptive Feldgröße, Korrekturfaktor) wurden bisher für zwei Studien optimiert und wiesen eine relativ gute Korrelation mit Probandenurteilen auf (Bestimmtheitsmaß  $R^2=0,70 \dots 0,76$ ) [Don 15].

Im Gegensatz dazu beobachtet EBLE-HANKINS [Ebl 08] ein steigendes Blendempfinden für kleinere Linienabständen bei indirektem Blick und kleinen Kontrasten, jedoch ist die Blendungszunahme, bedingt durch die Linienabstände, relativ gering (vgl. Abb. 5.3). Sie stellt weiterhin fest, dass das Blendempfinden immer bei drei rezeptiven Feldern am niedrigsten ist, kann dafür jedoch keine Erklärung liefern. Aufgrund der Linienstruktur und der geringen Kontraste, sind ihre Ergebnisse insgesamt schwer mit den Forschungsergebnissen anderer Studien vergleichbar, zumal bei ihr die homogene Leuchtdichtestruktur die höchste Blendwirkung hervorruft, wenn auch mit sehr geringen Unterschieden zu den Linienmustern. Ihre Beobachtungen sind, besonders bei kleinen Blendwinkeln, mit der Wahrnehmung von Linienmustern erklärbar, da sie, wie auch WILKINS et al. [Wil 84] bei 4 Zyklen pro Grad die höchste Blendempfindlichkeit festgestellt hat.

In einigen Studien (darunter [Kas 06; Lee 07; Tak 07]) wird ebenfalls ein Einfluss der LED-Anzahl oder des LED-Abstands auf die Blendung festgehalten. Hier wurden jedoch immer mehrere Parameter innerhalb der Blendquelle gleichzeitig variiert. So wurde der LED-Abstand meist zusammen mit der LED-Anzahl geändert und die resultierende Änderung der mittleren Blendquellenleuchtdichte durch größere LEDs oder höhere LED-Leuchtdichten ausgeglichen. Außerdem ergeben sich u. a. bei [Lee 07] höhere Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung der LEDs und damit eine Reduzierung des Kontrasts. Diese Abweichung wird bei anderen Studien nicht dokumentiert. Sie kann jedoch vermutet werden, da in keiner der aufgeführten Studien eine sepa-

rate Steuerungsmöglichkeit der Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung vorgesehen war. Da eine Variation des Kontrasts oder des Flächenverhältnisses zwischen LEDs und unmittelbarer Umgebungen einen Einfluss auf die psychologische Blendung haben, können die unterschiedlichen Ergebnisse vermutlich darauf zurückgeführt werden.

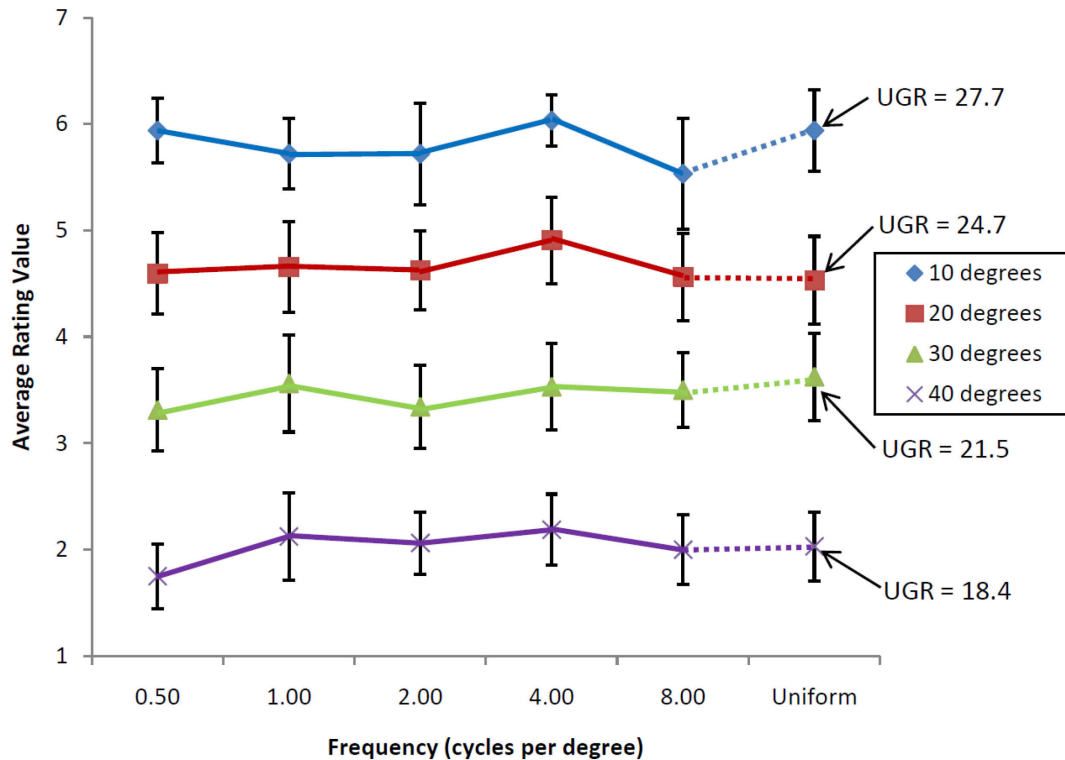


Abb. 5.3 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Linienabständen und verschiedenen Blendwinkeln [Ebl 08, S. 182]

Weiterhin wird in dieser Arbeit erstmalig die Additivität von LED-Punkten analysiert. Hier kann kein nennenswerter Unterschied zwischen konzentrierter Fläche und aufgelösten LED-Punkten festgestellt werden. Dies stimmt mit den Ergebnissen von EBERBACH [Ebe 74] überein, der für kleinere Halogen-Blendquellen im mesopischen ebenfalls keinen signifikanten Unterschied zwischen derartigen Strukturen ausmacht. Er merkte jedoch an, dass die konzentrierten Leuchtdichtestrukturen eine geringfügig höhere Blendwirkung hervorrufen.

### 5.3.2 Korrelation von Probandenurteilen und UGR-Werten

Abgesehen vom direkten Blick in die Blendquelle korrelieren die UGR-Werte und die Probandenurteile der einzelnen Aufgaben sehr gut ( $R^2$  jeweils grö-

ßer 0,9). Bei direktem Blick in die Leuchte hingegen streuen die Probandenurteile deutlich mehr ( $R^2 = 0,82$ ). Weiterhin wird in Kap. 4.2 festgehalten, dass die kontrastreichen Leuchtdichtestrukturen bei  $15^\circ$  und bei direktem Blick mehr stören als vom UGR-Verfahren vorhergesagt. Diese Beobachtungen werden durch mehrere Studien gestützt [Har 11; Hig 13; Har 15; Tas 15; Yan 15a]. Ein Vergleich der Bestimmtheitsmaße und der absoluten Blendurteile ist aufgrund der unterschiedlichen Bewertungsskalen und Studiendesigns nur eingeschränkt möglich (vgl. Kap. 3.2.2). Die Bewertungsskalen unterscheiden sich sowohl in der Anzahl der Stufen als auch in der genauen Benennung der Stufen.

Zum Vergleich der Studienergebnisse dieser Arbeit bietet sich besonders die Studie von HIGASHI ET AL. [Hig 13] an, da sie ähnliche Blendwinkel und eine ähnliche Darstellung der Korrelation zwischen Probandenurteil und UGR-Wert gewählt haben. Im Vergleich zu homogenen Leuchtstofflampenleuchten beobachteten HIGASHI ET AL. bei strukturierten LED-Leuchten eine geringere Korrelation der Probandenurteile und der berechneten UGR-Werte. Weiterhin ergibt sich bei ihrer Studie ein höherer Positionsindex als der von LUCKIESH und GUTH. Da sie dies nicht in der Auswertung korrigieren, liegen ihre Bestimmtheitsmaße ( $R^2 = 0,56$  für LED bzw.  $R^2 = 0,72$  für Leuchtstofflampe) niedriger als in der vorliegenden Arbeit.

Im Vergleich zu deutschsprachigen Untersuchungen zum UGR-Verfahren [Gal 98; Hes 98; Mül 99] weisen die Probandenergebnisse dieser Arbeit eine sehr gute Korrelation auf. So liegen die Bestimmtheitsmaße zwischen Probandenurteilen und UGR-Werten in [Hes 98, S. 57-99] zwischen 0,65 und 0,90.

Jedoch sind die Positionsindizes der vorliegenden Studie kleiner als die Positionsindizes nach LUCKIESH und GUTH und ähneln eher denen von KIM (vgl. Kap. 4.2.2). Damit unterscheiden sich die Positionsindizes von denen vieler anderer Studien. Beispielsweise stimmen die Daten von HESSE ET AL. [Hes 98] nahezu exakt mit der in [Lit 03, S. 26ff.] angegebenen Söllnergerade überein. Dieser Unterschied hängt u. a. mit der Auswahl der Leuchtdichteszenarien zusammen. Da in dieser Studie bewusst sowohl sehr dunkle als auch sehr helle Leuchtdichtekonfigurationen verwendet wurden, kann dies eine Verschiebung der Empfindlichkeitskurve zur Folge haben. Außerdem wurde in der vorliegenden Studie in der Regel nur ein Blendwinkel je Untersuchungstermin untersucht. Lediglich die Aufgaben 3 bis 5 ( $15^\circ$  und kurzer, direkter Blick in die Leuchte) wurden an einem Termin untersucht.

Weiterhin kann in der vorliegenden Studie beobachtet werden, dass insbesondere bei  $15^\circ$  und  $0^\circ$  die Positionsindizes der kontrastreichen Leuchtenkonfigurationen kleiner sind als die der homogenen Strukturen. Für LED-Leuchten

sind demzufolge übereinstimmend mit TAHASHI et al. [Tak 07] und HIGASHI et al. [Hig 13] – anstelle des in Gl. 4.7 vorgestellten Korrekturfaktors – unterschiedliche Positionsindizes denkbar.

Hinsichtlich des Einflusses der Hintergrundleuchtdichte auf die Blendempfindung wird in der vorliegenden Studie eine geringere Auswirkung festgestellt als durch die UGR-Formel vorausgesagt (vgl. Kap. 4.2.2). Bei genauerer Betrachtung der Datenpunkte fällt auf, dass dies besonders für Konfigurationen mit geringem UGR-Wert gilt (vgl. Abb. 4.10 und 4.25). Für höhere UGR-Werte (ab ca.  $UGR = 16 \dots 19$ ) stimmen die Datenpunkte jedoch wieder relativ gut mit den restlichen Probandendaten überein. KIM et al. [Kim 10] beschreiben den Einfluss der Hintergrundleuchtdichte bei steigender Blendquellengröße (und steigendem mittleren UGR-Wert) und fovealer Darbietung der Blendquelle. Die mittlere Leuchtdichte der Blendquelle bleibt konstant. Er stellt dabei fest, dass der Einfluss der Hintergrundleuchtdichte bei steigender Blendquellengröße nachlässt. Damit unterscheiden sich die Ergebnisse von denen der vorliegenden Studie. Der Unterschied kann mit der fovealen Darbietung der Blendquelle in [Kim 10] erklärt werden: Da der Adaptationszustand vorwiegend durch den Bereich nahe der Fovea bestimmt wird [Bör 14], wirkt sich eine Änderung der Hintergrundleuchtdichte bei einer großen foveal dargebotenen Blendquelle nicht mehr nennenswert aus. Die Adaptationsleuchtdichte ergibt sich dann als gewichtetes Mittel aus Hintergrund- und Blendquellenleuchtdichte. Neben der vorliegenden Studie änderten auch LOU et al., TASHIRO et al. und YANG et al. [Lou 15; Tas 15; Yan 15b] systematisch die Hintergrundleuchtdichte, geben jedoch keinen Vergleich zur UGR-Formel an. LOU et al. änderten die Hintergrundbeleuchtung von ca.  $0 \text{ cd/m}^2$  auf  $20 \text{ cd/m}^2$  und stellen dabei keine Verbesserungen durch die Hintergrundleuchtdichte fest. Jedoch liegen derart niedrige Hintergrundleuchtdichten an der unteren Anwendungsgrenze des UGR-Verfahrens, da dieses für die Blendungsbewertung im Innenraum definiert ist.

Im Hinblick auf den Einfluss der Auflösung bei der Messung von UGR-Werten von LED-Leuchten wird in dieser Arbeit eine deutliche Abhängigkeit festgestellt. So führt eine niedrigere Auflösung zu höheren Streuungen und einer tendenziellen Unterschätzung der Blendung im Vergleich zu den Blendurteilen (vgl. Kap. 4.2.3). Für Leuchtstofflampenleuchten wurden mehrfach Vergleiche zwischen Probandenurteilen und UGR-Werten bei Messauflösungen von ca.  $0,033 \text{ }^\circ/\text{px}$  bzw.  $3,4 \cdot 10^{-7} \text{ sr/px}$  durchgeführt [Gal 98; Hes 98; Jor 98]. Dabei wird eine gute Korrelation festgestellt, wenn die gemessenen Pixel gemäß dem Verfahren nach WOLF [Wol 04] gruppiert werden. Auch CAI et al. [Cai 13] gruppieren die Leuchtdichtepixel über  $500 \text{ cd/m}^2$  zu einer gemeinsam



leuchtenden Fläche und berechnen daraus die UGR-Werte von Leuchtstofflampenleuchten in realen Räumen. Sie verwenden eine Auflösung von ca.  $2,1 \cdot 10^{-7}$  sr/px und testen ebenfalls verschiedene Unterteilungen der LED-Leuchten bis ca. 20000 Elemente pro Leuchte. Dies entspricht einer pixelweisen UGR-Berechnung, das heißt, jedes Pixel wird als Blendquelle behandelt. Beim UGR-Verfahren stellten sie für die untersuchten ungleichmäßigen Leuchtstofflampen eine gültige Additivität und Unterteilbarkeit fest. Außerdem beobachten sie, dass die UGR-Bewertung bei ihrer Bewertungsskala die Blendung überschätzt. SAWICKI und WOLSKA [Saw 15] verwenden eine Messauflösung von  $2,3 \cdot 10^{-6}$  sr/px zur Messung der UGR-Werte von Leuchtstofflampenleuchten. Sie berechnen die UGR-Werte pixelweise, über einer aus dem ungefilterten Histogramm berechneten Leuchtdichteschwelle [Pos 14, S. 247ff.]. Dabei erhalten sie eine gute Korrelation zu den Probandenergebnissen, auch wenn die berechneten Werte etwas zu hoch sind.

SCHEIR et al. [SCHei 15a] zeigen in ihrem Beitrag auf, dass bei strukturierten LED-Leuchten die Messauflösung bzw. die Gruppierung und Mittelung der Pixel einen nennenswerten Einfluss auf den berechneten Blendwert haben. Leider wird die Messauflösung in den weiteren bekannten Probandenstudien zur Blendung von LED-Leuchten meist nicht mit angegeben (außer Tashiro:  $0,005$  °/px bzw.  $7,6 \cdot 10^{-9}$  sr/px). Aufgrund der abgedruckten Leuchtdichtebilder kann meist von einer hohen Auflösung ausgegangen werden. Jedoch wurden die Leuchtdichtebilder senkrecht zur LED-Platine gemacht, obwohl die Blendquelle nicht immer senkrecht zum Probanden zeigt.

### 5.3.3 Korrekturfaktoren nach HARA

Um diese Effekte zu erfassen, wird von HARA ein Modell zur Berechnung von Korrekturfaktoren vorgeschlagen. Diese Faktoren werden von ihm für verschiedene Studien [Har 11; Hig 13; Tas 15] berechnet und in [Har 15] präsentiert (vgl. Kap. 2.5). Darin wird deutlich, dass die in dieser Arbeit empirisch ermittelten Korrekturfaktoren hinsichtlich der Größenordnung mit den berechneten Korrekturfaktoren übereinstimmen und dass die Korrekturfaktoren tatsächlich vom Kontrast abhängen. Bei detaillierter Betrachtung der Daten von [Har 11; Hig 13; Tas 15] ist weiterhin zu erkennen, dass die in Kap. 4.3 aufgestellte These bestätigt wird: Die Korrekturfaktoren hängen stark von der Position der Blendquellen im Gesichtsfeld ab – vor allem bei [Hig 13; Tas 15] sind die Abweichungen der Blendungsbewertungen für Blendwinkel von  $0^\circ$  bzw.  $8,5^\circ$  zwischen kontrastreichen und homogenen Strukturen besonders hoch.

Demzufolge wurde das in Kap. 4.3.3 vorgestellte, erweiterte empirische Modell, soweit möglich, auf die Leuchtdichtestrukturen der Studien von [Har 11; Hig 13; Tas 15] angewendet. Damit konnten die von HARA empirisch ermittelten Korrekturfaktoren weitestgehend reproduziert werden. Dennoch verbleiben Restunsicherheiten und Schwierigkeiten bei der Bestimmung des Korrekturfaktors mit den beiden empirischen Modellen.

Im empirischen Modell nach HARA wird der Korrekturfaktor aus senkrechter Betrachtung der Leuchte ermittelt. Dies spiegelt jedoch nicht die realen Bedingungen in Innenräumen wider, da die wahrgenommenen Kontraste innerhalb der Leuchte von der Beobachtungsrichtung, dem Leuchtdesign und ggf. Abschirmungen abhängen. Somit sind die nach HARA berechneten Korrekturfaktoren in der Regel zu kritisch für die meisten Leuchten und Blendsituationen (vgl. Abb. 2.9 und 4.15). Auch das in dieser Arbeit ermittelte, erweiterte empirische Modell kann nicht direkt für jede denkbare Leuchte eingesetzt werden, da der Kontrast innerhalb der Leuchte und die unmittelbare Umgebung des LEDs teilweise schwierig umzusetzen sind. Deshalb bietet sich ein Verfahren ähnlich Gl. 2.15 an, bei dem jedoch die Uniformity aus der tatsächlichen Beobachtungsrichtung unter Berücksichtigung der Auflösung des Auges bestimmt wird.

#### 5.3.4 Bestimmung der effektiv leuchtenden Fläche

Die Verwendung der effektiv leuchtenden Fläche zur Blendungsbewertung von ungleichmäßigen Leuchten wird von mehreren Publikationen vorgeschlagen. Jedoch arbeiten die meisten Autoren mit relativ homogenen Leuchtstofflampenleuchten. Dafür werden sowohl bei festen Leuchtdichteschwellen nach CIE 117 [Cie 95b] als auch mit adaptiven Schwellen gute Korrelationen zwischen berechnetem UGR- bzw. Blendwert und subjektiver Blendung erreicht [Wol 03; Wol 04; Ost 08; Cai 13; Saw 15]. In [Wol 04] wird das Verfahren auch zur Bestimmung der Blendung von Fenstern und Hochdruckentladungslampen in der Peripherie angewandt und eine gute Korrelation zu den Probandenurteilen festgestellt [Hes 98]. Bei kontrastreichen und komplexen LED-Leuchten kann die reine Anwendung von Leuchtdichteschwellen jedoch zu Problemen führen, wie in [SCHei 15a] dargelegt wurde. Je nachdem, welche Auflösung zur Vermessung der Blendquelle verwendet wird, schwankt der UGR-Wert aufgrund der kleinen Flächen der LED-Punkte beträchtlich. Deshalb wendeten YANG et al. [Yan 15b] die CIE-Formel für kleine Blendquellen [Cie 02b] auf LED-Punkte an und erhalten für LED-Blendquellen mit dunkler unmittelbarer Umgebung eine ähnlich gute Korrelation wie die Standard-UGR-Formel. Wie in Kap. 2.6 beschrieben, wird hierbei nicht mehr das Produkt aus quadrierter

Leuchtdichte und Raumwinkel, sondern die Lichtstärke der LEDs als Maßzahl für die psychologische Blendung herangezogen und eine einheitliche Fläche von  $0,005 \text{ m}^2$ . Folglich werden die LEDs mit dieser Formel aufgeweitet. Damit ähnelt diese Formel der Blendungsbewertung anhand der Auflösung des Auges, welche in dieser Arbeit hergeleitet wurde. Die in [Cie 02b] definierte Verwendung der Lichtstärke als Maßzahl berücksichtigt aber weder die Position der Blendquelle im Gesichtsfeld noch die Detektion der tatsächlich blendenden Flächen. In [SCHei 15b] wurde deshalb die Leuchtdichteschwelle zur Definition der tatsächlich blendenden Fläche mit Hilfe der maximal gemessenen Leuchtdichte bestimmt. Hierbei geben SCHEIR et al. im Bereich von 5...50% des Maximalwerts eine gute Übereinstimmung der Probandenurteile und der UGR-Werte für ihre Strukturen an. Jedoch ist die leuchtende Fläche ihrer Strukturen jeweils nahezu gleich und wird durch relativ große LEDs mit Linsenoptik realisiert. Falls die Leuchtdichteschwelle auf bspw. 50 % der Maximalleuchtdichte gesetzt wird, kann es bei anderen strukturierten Leuchten dazu führen, dass die Blendung durch UGR als zu hoch eingestuft wird. Diese Vermutung wird dadurch bekräftigt, dass SCHEIR et al. alle Strukturen lediglich bei einer Beobachtungsrichtung (direkter Blick in die Blendquelle) präsentiert haben.

## **5.4 Schlussfolgerungen für die Anwendung der Ergebnisse**

### 5.4.1 Blendungsbewertung von LED-Leuchten in Innenräumen

Da sowohl das korrigierte als auch das erweiterte UGR-Verfahren gut geeignet zur Beschreibung von strukturierten LED-Leuchten sind, stellt sich nun die Frage, welches Verfahren aus aktueller Sicht für bestimmte Zwecke besonders vorteilhaft ist.

Das korrigierte UGR-Verfahren bietet neben einem höheren Bestimmtheitsmaß auch eine relativ gute Fehlertoleranz gegenüber neuen LED-Leuchten, da die wesentlichen strukturellen Einflussfaktoren auf die Blendung im empirischen Modell des Korrekturfaktors berücksichtigt sind. Diese These wird durch mehrere Studien (vgl. Kap. 2.6) gestützt. Außerdem ist das Verfahren vollständig anwendbar auf bereits bestehende Beleuchtungslösungen, da der Korrekturfaktor bei niedrigen Kontrasten bzw. einer hohen Uniformity innerhalb der Leuchte gegen eins geht. Für die praktische Anwendbarkeit in Messungen und Simulationen müssen die Messauflösung und der Messwinkel jedoch definiert werden, da sowohl der Kontrast innerhalb der Leuchte als auch dessen Auswirkung auf die Blendungsbewertung stark von der Position des Beobachters abhängen. Sinnvolle Messwinkel sind  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  und  $75^\circ$  zur Nor-

malen der Leuchte. Für diese Winkel sollte die Messauflösung der Sehschärfe des Auges angepasst werden. Damit erhält man UGR-Werte, die strahlformende Optiken der LED-Leuchten berücksichtigen und zur Sicherheit die Leuchte eher kritisch bewerten. Bei orts aufgelösten Leuchtdichtemessungen von installierten Beleuchtungsanlagen muss mit dem korrigierten UGR-Verfahren (wie auch beim Standard-UGR-Verfahren) die Größe der Leuchte bzw. der Bewertungsfläche manuell für jede Leuchte eingetragen werden. Folglich ist das korrigierte UGR-Verfahren vor allem für Planungen und Simulationen von strukturierten Leuchten und Beleuchtungsanlagen mit derartigen Leuchten geeignet und weniger bei Messungen von Beleuchtungsanlagen.

Für Messungen mit Leuchtdichtemesskameras ist das erweiterte UGR-Verfahren besser geeignet, da die leuchtende Fläche und der UGR-Wert abhängig von der tatsächlichen Raumsituation bestimmt werden. Die Bewertungsfläche wird automatisiert ermittelt und es sind somit keine manuellen Festlegungen mehr notwendig. Damit ist das Verfahren auch für Simulationen geeignet. Nachteilig an dem Verfahren ist jedoch, dass es aufgrund der Leuchtdichteschwelle teilweise zu starken Abweichungen der UGR-Werte, abhängig von der Leuchtdichteverteilung im Raum, des Blendwinkels bzw. der Glättung sowie der Größe und Leuchtdichte der unmittelbaren LED-Umgebung, kommen kann. Diese Abweichungen können durch Verbesserung der Verfahrensparameter und Berücksichtigung von weiteren Studien minimiert werden. So ist beispielsweise denkbar, dass nicht mehr eine „absolute Schwelle“ definiert wird, welche die Szene in Blendquellen und Hintergrund einteilt, sondern einen „fließenden Übergang“ vom Hintergrund zu den Blendquellen schafft. Diese Maßnahme würde das UGR-Verfahren jedoch noch weiter verkomplizieren. Zur Vereinfachung des in Kap. 4.4.2 vorgestellten Algorithmus können auch feste Leuchtdichteschwellen (bspw.  $500 \text{ cd/m}^2$ ,  $750 \text{ cd/m}^2$  oder  $1000 \text{ cd/m}^2$  gemäß [Cie 83; Cie 95b]) mit einem auflösungsangepassten Leuchtdichtebild kombiniert werden. Die resultierenden UGR-Werte ähneln für die vorliegenden Versuchsdaten denen, die mit einer dynamischen Leuchtdichteschwelle ermittelt werden.

Sowohl das korrigierte UGR-Verfahren als auch das erweiterte UGR-Verfahren sind für die Generierung von UGR-Tabellen von kontrastreichen LED-Leuchten geeignet (entsprechende Simulationstools vorausgesetzt).

Im Zuge der Übertragung des überarbeiteten Blendungsbewertungsverfahrens in die Praxis sollten auch die Definition der Hintergrundleuchtdichte bei inhomogenen Leuchtdichteverteilungen im Raum sowie der starre, horizontale Blick während der UGR-Bewertung in Frage gestellt werden. Zwar ist das bestehende UGR-Verfahren mit seinen Annahmen bewusst relativ einfach gehalten. Beispielsweise wird vorausgesetzt, dass die Beobachter meist eher unter-

halb der horizontalen Blicklinie schauen, dass die Leuchtdichtevertelung an den Wänden des Raums relativ gleichmäßig ist und dass die direkt sichtbaren Blendquellen die Adaptationsleuchtdichte nicht nennenswert beeinflussen. Jedoch bergen diese Abstraktionen Fehlerpotenzial insbesondere durch die vielfältigen Beleuchtungslösungen mit LED. Bei strukturierten LED-Leuchten mit hohen Spitzenleuchtdichten und hohen Gradienten innerhalb der Leuchte, die auch bei kleinen Blendwinkeln (bspw. kleiner  $15^\circ$ ) sichtbar sind, steigt dieses Fehlerpotenzial stark an. Es kann selbst mit den Korrekturfaktoren nach HARA nicht vollständig erfasst werden, da temporäre Effekte wie Nachbilder eine dauerhafte negative Beurteilung hinterlassen. In diesem Zusammenhang könnte zusätzlich der UGR-Wert für den direkten Blick in die Blendquelle ermittelt werden und mittels Wichtung gemeinsam mit dem UGR-Wert bei horizontalem Blick zu einem „effektiven UGR-Wert“ zusammengeführt werden. Die Art der Wichtung müsste jedoch noch ermittelt werden.

#### 5.4.2 Blendungsbegrenzung bei LED-Leuchten

Als Ergebnis dieser Arbeit werden in diesem Abschnitt Empfehlungen zur Blendungsbegrenzung von strukturierten LED-Leuchten gegeben. Mit abschirmenden Elementen, wie Blenden, Linsen, Reflektoren und Diffusoren wird der direkte Blick in die LEDs verhindert oder werden die wahrgenommenen Leuchtdichten reduziert. Dadurch wird die Direktblendung durch LED-Leuchten erheblich verringert. Als Grundlage können die bisherigen Abschirmwinkel des UGR-Verfahrens verwendet werden (vgl. Tab. 5.1).

Tab. 5.1 Mindestabschirmwinkel für Lampenleuchtdichten [Lit 03, S. 45]

Bereich der mittleren Lampenleuchtdichte L	<b>UGR-Grenzwert</b>			
	16	19	22	25,28
$L < 2 \cdot 10^4 \text{ cd/m}^2$	$20^\circ$	$10^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$
$2 \cdot 10^4 \text{ cd/m}^2 < L < 4 \cdot 10^4 \text{ cd/m}^2$	$20^\circ$	$15^\circ$	$5^\circ$	$0^\circ$
$4 \cdot 10^4 \text{ cd/m}^2 < L < 50 \cdot 10^4 \text{ cd/m}^2$	$30^\circ$	$20^\circ$	$10^\circ$	$0^\circ$
$L > 50 \cdot 10^4 \text{ cd/m}^2$	$30^\circ$	$30^\circ$	$15^\circ$	$0^\circ$

Ebenso führt eine Reduzierung des Kontrasts bzw. eine Erhöhung der Uniformity bei gleicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte zu einer Reduzierung der psychologischen Blendung insbesondere bei kleinen Blendwinkeln. Besonders bei langen, niedrigen Räumen oder Räumen mit häufigem Blick an die Decke (z. B. Schlafräumen in Krankenhäusern) kann dadurch eine Blendungs-

reduktion erzielt werden. Eine gleichmäßigere Leuchtenaustrittsfläche kann u. a. durch helle farbliche Gestaltung des unmittelbaren Bereichs der LEDs sowie durch strahlformende Optiken oder zusätzliche Beleuchtung der unmittelbaren LED-Umgebung, beispielsweise in Form einer Indirektbeleuchtung oder Hinterleuchtung, erfolgen. Um die gleiche mittlere Blendquellenleuchtdichte beizubehalten, muss bei diesen Maßnahmen selbstverständlich die maximale Leuchtdichte der LEDs reduziert werden.

In Spotlights, bei denen die LEDs häufig nicht versteckt werden können, sollten die einzelnen LEDs möglichst im Abstand kleiner als  $2'$  zusammen positioniert werden, um bei direktem Blick in die Leuchte negative strukturelle Effekte auf die psychologische Blendung zu verhindern (vgl. Kap. 2.5 [Don 15]). Das gleiche gilt ebenfalls für LED-Leuchten, bei denen die LEDs linienförmig angeordnet sind [Ebl 08]. Für diesen Aspekt sind jedoch noch weitere Untersuchungen im Innenraum erforderlich.

## 5.5 Ausblick

Im Anschluss an diese Arbeit sind aus Sicht des Verfassers noch weitere Untersuchungen zur Blendung von strukturierten LED-Leuchten sinnvoll, um die gefundenen Bewertungsmethoden weiter zu verifizieren. Für diese Studien sollten mehrere Blendquellen eingesetzt werden, da bisher nur wenige Studien [Hig 13; SCHmi 14; Gee 14] mit mehreren Leuchten unter realistischen Bedingungen durchgeführt wurden. Mit diesen Ergebnissen können beide Blendungsbewertungsverfahren noch weiter verbessert werden, vor allem im Hinblick auf praktische Anwendbarkeit und Korrelation zwischen lichttechnischem Messergebnis und Probandenurteilen. Bei der praktischen Anwendbarkeit müssen neben der Betrachtung der Mess- und Simulationsauflösung auch die vorhandenen Eingabeparameter von typischen Lichtplanungsprogrammen (z. B. DIALux oder Relux) berücksichtigt bzw. deren Implementationsmöglichkeiten geprüft werden. Des Weiteren kann das erweiterte UGR-Verfahren hinsichtlich der Bestimmung der Leuchtdichteschwelle sowie der „physiologisch angepassten“ Verfahrensparameter noch weiter verbessert werden.

Neben der Verbesserung des UGR-Verfahrens sollte in weiteren Arbeiten mehr Augenmerk auf die physiologisch-psychologischen Aspekte der Blendung gelegt werden. So sollte in zukünftigen Blendungsbewertungsmodellen der Beitrag von großen und hellen Blendquellen zur Adaptation, der Einfluss von inhomogenen Hintergründen sowie die physiologischen Merkmale des Auges, wie die Sehschärfe und die Größe der rezeptiven Felder mehr berücksichtigt werden. Im Idealfall basiert ein neues Blendungsbewertungsverfahren auf den

zugrunde liegenden Mechanismen der psychologischen Blendung. Da diese noch nicht hinreichend erklärt werden können, sollten in zukünftigen Studien ausgehend vom bisherigen Stand der Forschung weitere Verbindungen zwischen psychologischer Blendung („discomfort glare“), visuellem Diskomfort, Aufgabenschwierigkeit und pathophysiologischen Vorgängen wie Migräne und Epilepsie untersucht werden. Dazu zählen z. B. neurophysiologische Messungen an der Retina, am Drillingsnerv und im visuellen Kortex sowie Eyetracking-Untersuchungen, die anschließend mit subjektiven Blendungsbewertungen bzw. lichttechnischen Bewertungsmodellen korreliert werden.





## Literaturverzeichnis

- [Aka 96] Akashi, Y.; Muramatsu, R., Kanaya, S.: Unified glare rating (UGR) and subjective appraisal of discomfort glare, *Lighting Research & Technology*, Bd. 28, Nr. 4, S. 199–206, 1996.
- [Aka 13] Akashi, Y., Asano, S., Kakuta, Y.: Visual mechanisms of discomfort glare sensation caused by LEDs, *Proceedings of the CIE Centenary Conference, Paris, 15.-16. April 2013*, S. 327–330, 2013.
- [Alt 15] Altomonte, S.; Kent, M.G.; Tregenza, P.R., Wilson, R.: Visual task difficulty and temporal influences in glare response, *Building and Environment* (2015), doi: 10.1016/j.buildenv.2015.09.021.
- [And 91] Anderson, S.J.; Mullen, K.T.; Hess, R.F.: Human peripheral spatial resolution for achromatic and chromatic stimuli: Limits imposed by optical and retinal factors, *Journal of Physiology*, Nr. 442, S. 47–64, 1991.
- [Arn 59a] Arndt, W.; Bodmann, H.-W.; Muck, E.: Blendung durch einzelne Lichtquellen im Sehfeld, *Lichttechnik*, Bd. 11, Nr. 1, S. 22–28, 1959.
- [Arn 59b] Arndt, W.; Bodmann, H.-W.; Muck, E.: Untersuchung über die psychologische Blendung durch mehrere Lichtquellen, *Compte Rendu der 14. Session der CIE, Brüssel, 15.-24. Juni 1959*, S. 254–264, 1959.
- [Aya 13] Ayama, M.; Tashiro, T.; Kawanobe, S.; Kimura-Minoda, T.; Kohko, S.; Ishikawa, T.: Discomfort glare of white LED sources of different spatial arrangements, *Proceedings of the CIE Centenary Conference, Paris, 15.-16. April 2013*, S. 119–122, 2013.
- [Ben 77] Bennett, C.A.: The Demographic Variables of Discomfort Glare, *Lighting Design & Application*, Nr. 1, S. 22–24, 1977.
- [Bod 11] Bodrogi, P.; Wolf, N.; Khanh, T.Q.: Spectral sensitivity and additivity of discomfort glare under street and automotive lighting conditions, *Proceedings of the 27th Session of the CIE, Sun City, 10.-15. Juli 2011*, S. 338–344, 2011.
- [Ber 94] Berman, S. M.; Bullimore, M. A.; Jacobs, R. J.; Bailey, I. L.; Gandhi, N.: An objective measure of discomfort glare. *Journal of the Illuminating Engineering Society* 23, S. 40–49, 1994.

- [Bla 09] Blaszcak, U.: Discomfort glare measurement. Proceedings of SPIE 7502, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, Wilga, Poland, 25. Mai 2009, S. 75022I-1 – 75022I-6, DOI: 10.1117/12.838176, 2009.
- [Bla 13] Blaszcak, U.: Method for evaluating discomfort glare based on the analysis of a digital image of an illuminated interior, Metrology and Measurement Systems, Bd. 20, Nr. 4, S. 623–634, 2013.
- [Bor 05] Bortz, J.; Döring, N.; Forschungsmethoden und Evaluation. Für Human- und Sozialwissenschaftler ; mit 70 Tabellen, Springer-Lehrbuch, 3. Aufl., Springer: Heidelberg, 2005.
- [Bör 14] Börner, F.: Versuchsdesign zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte homogener und definiert strukturierter Leuchtdichtefelder unter photopischen Bedingungen, Tagungsband der 21. Gemeinschaftstagung der deutschsprachigen lichttechnischen Gesellschaften, Den Haag, 21.-24. September 2014, S. 226–233, 2014.
- [Boy 81] Boyce, P.R.: Human factors in lighting, Applied Science Publishers: London, 1981.
- [Boy 90] Boyce, P.R., Cuttle, C.: Effect of Correlated Colour Temperature on the Perception of Interiors and Colour Discrimination Performance, Lighting Research & Technology, Bd. 22, Nr. 1, S. 19–36, 1990.
- [Boy 03] Boyce, P.R.; Hunter, C.M.; Inclin, C.: Overhead glare and visual discomfort, Journal of the Illuminating Engineering Society, Nr. 4, S. 73–88, 2003.
- [Bri 02] Brickenkamp, R.; Brähler, E.; Holling, H.: Brickenkamp Handbuch psychologischer und pädagogischer Tests, Bd.1, 3. Aufl., Hogrefe Verlag: Göttingen [u.a.], 2002.
- [Bri 11] Bridgelux Inc. (Hrsg.): Bridgelux ES Array Series. Product Data Sheet DS24, Bridgelux Inc.: Livermore, CA, USA, 2011.
- [Bul 09] Bullough, J.D.: Spectral sensitivity for extrafoveal discomfort glare. Journal of Modern Optics, Bd. 56, Nr. 13, S. 1518-1522, 2009.
- [Bur 14] Burk, A.; Burk, R.: Checkliste Augenheilkunde, Checklisten der aktuellen Medizin, 5. Aufl., Georg Thieme Verlag: Stuttgart, New York, 2014.

- [Cai 11] Cai, H.; Chung, T.M.: Improving the quality of high dynamic range images, *Lighting Research & Technology*, Bd. 43, S. 87–102, 2011.
- [Cai 13] Cai, H.; Chung, T.M.: Evaluation of discomfort glare from non-uniform electric light sources, *Lighting Research & Technology*, Bd. 45, S. 267–294, 2013.
- [Cie 42] CIE (Hrsg.): Sekretariatsberichte der Zehnten Tagung der CIE, Scheveningen, 1939. Bd. 1, S. 183-201, 1942.
- [Cie 81] CIE (Hrsg.): An analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance. Publication CIE No. 19/2. CIE: Paris, 1981.
- [Cie 83] CIE (Hrsg.): Discomfort glare in the interior working environment. Publication CIE No 55. CIE: Paris, 1983.
- [Cie 86] CIE (Hrsg.): Guide on interior lighting. Publication CIE No 29.2, 2. Aufl., CIE: Paris, 1986.
- [Cie 95a] CIE (Hrsg.): Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources. Publication CIE No. 13.3, CIE: Wien, 1995.
- [Cie 95b] CIE (Hrsg.): Discomfort glare in interior lighting. Publication CIE No. 117. Bd. 117, CIE: Wien, 1995.
- [Cie 02a] CIE (Hrsg.): Collection on glare. Teil 1: CIE equations for disability glare. Publication CIE No. 146. CIE: Wien, 2002.
- [Cie 02b] CIE (Hrsg.): Collection on glare. Teil 2: Glare from small, large and complex sources. Publication CIE No. 147. CIE: Wien, 2002.
- [Col 62] Collins, W.M.: The determination of the minimum identifiable glare sensation interval using a pair-comparison method, *Transactions Illumination Engineering Society UK*, Bd. 27, Nr. 1, S. 27–34, 1962.
- [Die 09] Diekmann, K.; Gerloff, T.: Luminance homogeneity of OLED lighting tiles – A route to standardisation, *The OSA Direct Magazine*, Bd. 2, Nr. 09, S. 24–27, 2009.
- [Don 15] Donners, M.A.H.; Vissenberg, M. C. J. M.; Geerdinck, L.M.; van den Broek-Cools, J. H. F.: A psychophysical model of discomfort glare in both outdoor and indoor applications. Proceedings of the 28th Session of the CIE, Manchester, 28. Juni - 4. Juli 2015. S. 1602–1611, CIE, 2015.

- [Düe 13] Düe, D.: Effizienz versus Sehkombfort?, LICHT, Nr. 1-2, S. 58–61, 2013.
- [Duk 13] Dukic, T.; Ahlstrom, C.; Patten, C.; Kettwich, C.; Kircher, K.: Effects of electronic billboards on driver distraction, Traffic Injury Prevention, Bd. 14, Nr. 5, S. 469–476, 2013.
- [Ebe 74] Eberbach, K.: Der Einfluss der Leuchtdichtestruktur von Lichtquellen auf die Blendempfindung, Lichttechnik, Bd. 6, S. 283–286, 1974.
- [Ebl 08] Eble-Hankins, M.L.: Subjective impression of discomfort glare from sources of non-uniform luminance. Dissertation, University of Nebraska at Lincoln: Lincoln, Nebraska, 30. Juli 2008.
- [Ein 69] Einhorn, H.D.: A new method for the assessment of discomfort glare, Lighting Research & Technology, Bd. 1, Nr. 4, S. 235–247, 1969.
- [Ein 79] Einhorn, H.D.: Discomfort glare: A formula to bridge the differences, Lighting Research & Technology, Bd. 11, Nr. 2, S. 90–94, 1979.
- [Erd 12] Erdem, L.; Trampert, K.; Neumann, C.: Evaluation of discomfort glare from LED lighting systems, Balkan Light 2012, S. 213–220, Balkan Light 2012: Belgrad, 3.-6. Oktober 2012.
- [Eur 04] Europäisches Parlament (Hrsg.): Richtlinie 2004/22/EG des Europäischen Parlaments und Rates. 31. März 2004.
- [Fin 84] Finley, D.; Wilkinson, J.: The effects of glare on the contrast sensitivity function, Human Factors, Bd. 26, Nr. 3, S. 283–287, 1984.
- [Fis 70] Fischer, B.; May, H.U.: Invarianzen in der Katzenretina: Gesetzmäßige Beziehungen zwischen Empfindlichkeit, Größe und Lage receptorischer Felder von Ganglienzellen, Experimental Brain Research, Bd. 11, Nr. 5, S. 448–464, 1970.
- [Fla 94] Flannagan, M.J.; Sivak, M.; Traube, E.C.: Discomfort glare and brightness as functions of wavelength. Technical Report UMTRI 94-29, The University of Michigan, Transportation Research Institute: Ann Arbor, Michigan, Oktober 1994.
- [Fot 15] Fotios, S.: Research note: Uncertainty in subjective evaluation of discomfort glare, Lighting Research & Technology, Bd. 47, S. 379–383, 2015.

- [Fry 75] Fry, G.A.; King, V.M.: The pupillary response and discomfort glare, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Bd. 4, S. 307–324, 1975.
- [Fug 56] Fugate, J.M.; Fry, G.A.: Relation of changes in pupil size to visual discomfort, *Illuminating Engineering*, Bd. 51, Nr. 7, S. 537–549, 1956.
- [Fun 15] Funke, C.: Variation der Umfeldleuchtdichte bei Blendungsuntersuchungen mit einer strukturierten LED-Leuchte in Innenräumen. Untersuchungsbericht der Forschungs Kooperation zwischen der ERCO GmbH und der TU Ilmenau vom 1. Dezember 2014 bis 31. Dezember 2014. Ilmenau, 30. Januar 2015.
- [Gal 04] Gall, D.: Grundlagen der Lichttechnik. Kompendium, Licht und Beleuchtung, 217 S., ISBN 3-7905-0923-X, Pflaum: München, 2004.
- [Gal 98] Gall, D.; Wolf, S.; Jordanow, W.: Vergleich von gemessenen und berechneten UGR-Werten, Tagungsband der 13. Gemeinschaftstagung der deutschsprachigen lichttechnischen Gesellschaften: Bregenz, 16. bis 18. September 1998. S. 140–145, 1998
- [Gee 14] Geerdinck, L.: Discomfort Glare perception of non-uniform light sources in an office setting, *LED professional Review*, Nr. 44, S. 58–62, 2014.
- [Ger 54] Gerathewohl, S.J.: Conspicuity of flashing light signals of different frequency and duration, *Journal of Experimental Psychology*, Bd. 48, Nr. 4, S. 247–251, 1954.
- [Ger 57] Gerathewohl, S.J.: Conspicuity of flashing light signals: Effects of variation among frequency, duration, and contrast of the signals, *Journal of the Optical Society of America*, Bd. 47, Nr. 1, S. 27–29, 1957.
- [Gut 63] Guth, S.K.: A method for the evaluation of discomfort Glare, *Illuminating Engineering*, Bd. 58, Nr. 5, S. 351–364, 1963.
- [Gut 66] Guth, S.K.: Computing visual comfort ratings for a specific interior lighting installation, *Illuminating Engineering*, Bd. 61, Nr. 10, S. 634–642, 1966.
- [Har 11] Hara, N.; Hasegawa, S.: Study on discomfort glare rating of the luminaire with LED array, Workshop on discomfort glare: Sun City / South Africa, 14. Juli 2011.

- [Har 15] Hara, N.: CIE JTC7 (D3/D1) - Discomfort caused by glare from luminaires with a non-uniform source luminance. First Meeting of Joint Technical Committee 7 der CIE, Manchester, United Kingdom, 02.07.2015.
- [Hau 70] Haubner, P.; Johanni, H.: Untersuchung über die psychologische Blendung in Innenräumen, *Lichttechnik*, Bd. 22, Nr. 6 und 7, S. 304–306, 345-347, 1970.
- [Hes 98] Hesse, J.; Müller, T.; Stolzenberg, K.: Blendungsbewertungsverfahren und UGR-System, *Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Forschung Arbeitsschutz*, Bd. 807, *Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaften*: Bremerhaven, 1998.
- [Hig 13] Higashi, H.; Koga, S.; Kotani, T.: The development of evaluation for discomfort glare in LED lighting of indoor workplace. The effect of the luminance distribution of luminous parts on subjective evaluation, *Proceedings of the CIE Centenary Conference, Paris*, 15.-16. April 2013, S. 648–656
- [Hol 26] Holladay, L.L.: The fundamentals of glare and visibility, *Journal of the Optical Society of America*, Bd. 12, Nr. 4, S. 271–319, 1926.
- [Hol 27] Holladay, L.L.: Action of a light-source in the field of view in lowering visibility, *Journal of the Optical Society of America*, Bd. 14, Nr. 1, S. 1–15, 1927.
- [Hop 56] Hopkinson, R.G.: Glare discomfort and pupil diameter, *Journal of Optical Society of America*, Bd. 46, Nr. 8, S. 649–656, 1956.
- [Hop 57] Hopkinson, R.G.: Evaluation of Glare, *Illuminating Engineering*, Bd. 52, Nr. 6, S. 305–316, 1957.
- [Hop 59] Hopkinson, R.G.; Longmore, J.: Attention and distraction in the lighting of work-places, *Ergonomics*, Bd. 2, Nr. 4, S. 321–334, 1959.
- [How 93] Howarth, P.A.; Heron, G.; Greenhouse, D.S.; Bailey, I.L.; Berman, S.M.: Discomfort from glare: The role of pupillary hippus, *Lighting Research & Technology*, Bd. 25, Nr. 1, S. 42, 1993.
- [Hub 05] Hubalek, S.; Schierz, C.: LichtBlick - photometrical situation and eye movements at VDU work places, *Tagungsbericht der LuxEuropa*, Berlin, 19.-21. September 2005, S. 404–407, 2005.

- [Hup 15] Hupe, C.: Durchführung einer Eye-Tracking-Studie bei Blendungsuntersuchungen. Masterarbeit, Technische Universität Ilmenau: Ilmenau, März 2015.
- [Ies 66] Illuminating Engineering Society. Committee on Recommendations of Quality and Quantity of Illumination. Subcommittee on Direct Glare: Outline of a standard procedure for computing visual comfort ratios for interior lighting: Report No. 2, Illuminating Engineering, Bd. 61, Nr. 10, S. 643–666, 1966.
- [Ies 67] Illuminating Engineering Society (Hrsg.): IES Technical Report No 10. Evaluation of discomfort glare: the IES glare index system for artificial lighting installations, Illuminating Engineering Society: London, 1967.
- [Ies 73] Illuminating Engineering Society. Committee on Recommendations of Quality and Quantity of Illumination. Subcommittee on Direct Glare: Outline of a standard procedure for computing visual comfort ratios for interior lighting: Report No. 2 (1972), Journal of the IES, Bd. 2, Nr. 3 und 4, S. 328–344 und 504–505, 1973.
- [Jia 13] Jiang, C.-J.; Sun, C.-C.; Chen, Y.-C.; Yang, T.-H.; Chang, N.: The correlation of veiling luminance and unified glare rating with a transfer function, Lighting Research & Technology, S. 1–6, 2013.
- [Jor 98] Jordanow, W.; Vandahl, C.: Anwendung des Leuchtdichte-Analysators bei Messungen an Industriearbeitsplätzen, Tagungsband der 13. Gemeinschaftstagung der deutschsprachigen lichttechnischen Gesellschaften: Bregenz, 16. bis 18. September 1998, S. 242–248, 1998.
- [Jun 09] Jung, S.-G.; Cho, Y.-I.; Kim, H.: A study of UGR for non-uniform luminance source, Tagungsbericht der Lux Europa, Istanbul, 9.-11. September 2009, S. 553–558, 2009.
- [Kas 06] Kasahara, T.; Aizawa, D.; Irikura, T.; Moriyama, T.; Toda, M.; Iwamoto, M.: Discomfort glare caused by white LED light sources, Journal of Light and Visual Environment, Bd. 30, Nr. 2, S. 49–57, 2006.
- [Ken 15a] Kent, M.G.; Altomonte, S.; Tregenza, P.; Wilson, R.: Discomfort glare and time of day, Lighting Research & Technology, Bd. 47, S. 641–657, 2015.

- [Ken 15b] Kent, M.G.; Altomonte, S.; Tregenza, P.; Wilson, R.: Temporal variables and personal factors in glare sensation, *Lighting Research & Technology*, Bd. 0, S. 1–22, 2015.
- [Ket 14] Kettwich, C.: Ablenkung im Straßenverkehr und deren Einfluss auf das Fahrverhalten. Dissertation, Karlsruhe Institut of Technology, 2014, *Spektrum der Lichttechnik*, Bd. 8, KIT Scientific Publishing: Karlsruhe, 2014.
- [Kha 15] Khanh, T.Q.; Bodrogi, P.; Trinh, Q.; Winkler, H. (Hrsg.): LED lighting. Technology and perception, Wiley-VCH: Weinheim, 2015.
- [Kim 10] Kim, W.; Kim, J.T.: Effect of background luminance on discomfort glare in relation to the glare source size, *Indoor and Built Environment*, Bd. 19, Nr. 1, S. 175–183, 2010.
- [Kim 11] Kim, W.; Kim, J.T.: A position index formula for evaluation of glare source in the visual field, *Indoor and Built Environment*, Bd. 20, Nr. 1, S. 47–53, 2011.
- [Kimu 11] Kimura-Minoda, T.; Ayama, M.: Evaluation of discomfort glare from color LEDs and its correlation with individual variations in brightness sensitivity, *COLOR research and application*, Bd. 36, Nr. 4, S. 286–294, 2011.
- [Kin 10] Kingdom, F.A.A.; Prins, N.: *Psychophysics. A practical introduction*, Elsevier: Amsterdam, 2010.
- [Kle 10] Klefenz, F.; Husar, P.; Krenzer, D., Hess, A.: Real-time calibration-free autonomous eye tracker, *Tagungsband der IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) Dallas, 14.-19. März 2010*, S. 762-765.
- [Kli 10] Klingner, J.: Measuring cognitive load during visual tasks by combining pupillometry and eye tracking. Dissertation, Stanford University: Stanford, 2010.
- [Kog 13] Koga, S.; Higashi, H.; Kotani, T.: The development of evaluation for discomfort glare in LED lighting of indoor work place. The modification of G-classification using luminance distribution of luminous parts, *Proceedings of the CIE Centenary Conference, Paris, 15.-16. April 2013*, S. 657–662, 2013.



- [Koo 04] Kooi, F.L.; Alferdinck, J. W. A. M.: Yellow lessens discomfort glare: Physiological mechanism(s), TNO Human Factors, Soesterberg, Niederlande, 3. September 2004, erreichbar unter <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a428278.pdf>.
- [Kon 08] Konica Minolta, Inc. (Hrsg.): Spektroradiometer CS-2000/CS-2000A. Bedienungsanleitung. 9222-A0E3-25. Konica-Minolta, Inc., 2008.
- [Lai 12] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) (Hrsg.): Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen, Beschluss der LAI vom 13.09.2012, abrufbar unter [http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/laerm\\_licht\\_neu.pdf](http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/laerm_licht_neu.pdf). Letzte Einsichtnahme: 19.08.2016.
- [Lee 07] Lee, C.-M.; Kim, H.; Choi, D.-S.: A study on the estimation of discomfort glare for LED luminaires, Proceedings of the 26th Session of the CIE, Peking, China, 04. bis 07. Juli 2007, S. D3-33 – D3-36, 2007.
- [Lin 88] Lindner, H.: Untersuchungen zur zeitlichen Gleichmäßigkeit der Beleuchtung unter besonderer Berücksichtigung von Lichtwelligkeit, Flimmerempfindlichkeit und Sehbeschwerden bei Beleuchtung mit Gasentladungslampen. Dissertation (B), Technische Hochschule Ilmenau: Ilmenau, 1988.
- [Lin 15] Lin, Y.; Fotios, S.; Wei, M.; Liu, Y.; Guo, W.; Sun, Y.: Eye movement and pupil size constriction under discomfort glare, Invest. Ophthalmol. Vis. Sci., Bd. 56, S. 1649–1656, 2015.
- [Lit 76] Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.): Die Begrenzung der Direktblendung nach DIN 5035, LiTG-Publikation Nr. 6, LiTG: Karlsruhe, 1976.
- [Lit 03] Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.): Das UGR-Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen, LiTG-Publikation Nr. 20:2003, LiTG: Berlin, 2003.
- [Lou 15] Lou, D.; Deng, S.; Bian, J.; van der Burgt, P.: Evaluation of glare from non-uniform luminaires. Proceedings of the 28th Session of the CIE. Manchester, 28. Juni – 4. Juli 2015, S. 1860–1869, 2015.
- [Low 51] Low, F.N.: Peripheral visual acuity, Archives of Ophthalmology, Bd. 45, Nr. 1, S. 80–99, 1951.

- [Luc 25] Luckiesh, M.; Holladay, L.L.: Glare and visibility, Transactions Illuminating Engineering Society, Bd. 20, Nr. 3, S. 221–252, 1925.
- [Luc 49] Luckiesh, M.; Guth, S.K.: Brightnesses in visual field at borderline between comfort and discomfort (BCD), Illumating Engineering, Bd. 44, S. 650–670, 1949.
- [Mar 87] Marshall, J.: The ageing retina: Physiology or pathology, Eye, Bd. 1, Nr. 2, S. 282–295, 1987.
- [Mat 12] Mathis, J.: Blendung durch LED Büro-Leuchten. Untersuchung und Bewertung. Bachelorarbeit, Universität Innsbruck: Innsbruck, März 2012.
- [Mck 13] McKinsey (Hrsg.): Lighting the way: Perspectives on the global lighting market, 2. Auflage, McKinsey & Company, August 2012. Stand vom 2. August 2013. Erreichbar unter:  
[http://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client\\_service/automotive%20and%20assembly/lighting\\_the\\_way\\_perspectives\\_on\\_global\\_lighting\\_market\\_2012.ashx](http://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/automotive%20and%20assembly/lighting_the_way_perspectives_on_global_lighting_market_2012.ashx)
- [Mei 14] Meier, S.: Entwicklung und Inbetriebsetzung einer Steuerung für eine LED-Deckenleuchte. Masterarbeit, Technische Universität Ilmenau: Ilmenau, 2014.
- [Mel 11] Melo, O.: An assessment on the limitations of the unified glare rating (UGR) system. Comparison between eastern and western subjects, Stand vom 21. Juli 2011, erreichbar unter  
[http://www.docstoc.com/docs/86226193/An-Assessment-on-the-Limitations-of-the-Unified-Glare-Rating-\\_UGR](http://www.docstoc.com/docs/86226193/An-Assessment-on-the-Limitations-of-the-Unified-Glare-Rating-_UGR), zitiert am 6. August 2013.
- [Mis 99] Mistrick, R.G.; Choi, A.-S.: A comparison of the visual comfort probability and unified glare rating, Journal of the Illuminating Engineering Society, Bd. 28, Nr. 2, S. 94–101, 1999.
- [Moo 15] Moosmann, C.; Vandahl, C.: LiTG-Fragebogen zur Bewertung von Lichtsituationen. LiTG Questionnaire for the evaluation of lighting situations, Tagungsberichte der Lux Junior 2015, Dörnfeld/Ilm, 25.-27.9.2015.
- [Mül 99] Müller, T.: Evaluierung des UGR-Blendungsbewertungsverfahrens. Dissertation, Technische Universität Berlin, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 21, Elektrotechnik, Bd. 272, VDI-Verlag: Düsseldorf, 1999.

- [Mur 02] Murray, I.J.; Plainis, S.; Carden, D.: The ocular stress monitor: a new device for measuring discomfort glare, *Lighting Research & Technology*, Bd. 34, Nr. 3, S. 231–242, 2002.
- [Nak 07] Nakamura, Y.; Shimazaki, W.H.T.: Method of discomfort glare estimation applicable to wide range of source sizes, *Proceedings of the 26th Session of the CIE, Peking, China, 04. bis 07. Juli 2007*, S. D3-41 – D3-44.
- [Nak 15] Nakamura, Y.; Takahashi, R.; Sasabe, K.: Prediction of discomfort glare of a non-uniform light source by use of its luminance image. *Proceedings of the 28th Session of the CIE, Manchester 28. Juni – 4. Juli 2015*, S. 400–408, 2015.
- [Nga 00] Ngai, P.; Boyce, P.R.: The effect of overhead glare on visual discomfort, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Bd. 29, Nr. 2, S. 29–35, 2000.
- [Nie 14] Niedling, M., Völker, S., Knoop, M., Böhm, M.: LEDs in der Straßenbeleuchtung – wahrnehmbar oder nicht?, *Tagungsband der 21. Gemeinschaftstagung der deutschsprachigen lichttechnischen Gesellschaften, Den Haag, 21.-24. September 2014*, S. 450–455, 2014.
- [Nie 15] Niedling, M.: Influence of a glare sources spectrum on discomfort and disability glare under mesopic conditions. In: *UNILED - Erfassung und Beseitigung von Innovationshemmnissen beim Solid State Lighting. Ausgewählte Ergebnisse des Forschungsvorhabens. Schriftenreihe des Fachgebietes Lichttechnik, Bd. 4, Hrsg: Schumacher, H.; Völker, S., S. 119–128, Universitäts-Verlag der TU Berlin: Berlin, 2015.*
- [Nor 90] Norm DIN 5035 Teil 1 Juni 1990: Beleuchtung mit künstlichem Licht - Begriffe und allgemeine Anforderungen.
- [Nor 03a] Norm DIN EN 13201 Teil 2 November 2003: Straßenbeleuchtung – Teil 2: Berechnung der Gütemerkmale; Deutsche Fassung EN 13201-2:2003.
- [Nor 03b] Norm DIN EN 13201 Teil 3 November 2003: Straßenbeleuchtung – Teil 3: Berechnung der Gütemerkmale; Deutsche Fassung EN 13201-3:2003.
- [Nor 11a] Norm DIN EN 12464 Teil 1: Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen; Deutsche Fassung EN 12464-1:2011.

- [Nor 11b] Norm DIN EN 12665: Licht und Beleuchtung – Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung, DIN EN 12665:2011.
- [Nut 16] Nutting, P.G.: Effects of brightness and contrast in vision, Transactions Illuminating Engineering Society, Bd. 11, Nr. 9, S. 939–946, 1916.
- [Oeh 85] Oehler, R.: Spatial interactions in the rhesus monkey retina: a behavioural study using the Westheimer paradigm, Experimental Brain Research, Bd. 59, S. 217–225, 1985.
- [Ols 84] Olson, P.L.; Sivak, M.: Discomfort Glare from Automobile Headlights, Journal of the Illuminating Engineering Society, Bd. 13, Nr. 3, S. 296–303, 1984.
- [Ooy 87] Ooyen, M.H.F.; van de Weijert, J.A.C.; Begemann S.H.A.: Preferred luminances in offices, Journal of the Illuminating Engineering Society, Bd. 16, Nr. 2, S. 152–156, 1987.
- [Osr 10] Osram Opto Semiconductors GmbH (Hrsg.): LE ATB S2W. Datenblatt, OSRAM OSTAR - SMT, Osram Opto Semiconductors GmbH: Regensburg, 22. Oktober 2010.
- [Osr 13] Osram Opto Semiconductors GmbH (Hrsg.): LCW CQAR.EC. Datenblatt, Version 1.4, Osram Opto Semiconductors GmbH: Regensburg, 15. Februar 2013.
- [Öst 75] Östberg, O.; Stone, P.T.; Benson, R.A.: Free magnitude estimation of discomfort glare and working task difficulty, Universität Göteborg Schweden - Arbeitsbereich Psychologie, 1975.
- [Ost 08] Osterhaus, W.K.E.: Analysis of luminance histograms for the assessment of discomfort glare in daylight offices, Tagungsbericht der Balkan Light, Ljubljana, 7.-9. Oktober 2008, S. 155–164, 2008.
- [Pau 99] Paul, B.M.; Einhorn, H.D.: Discomfort glare from small light sources, Lighting Research & Technology, Bd. 31, Nr. 4, S. 139–144, 1999.
- [Pet 50] Petherbridge, P.; Hopkinson, R.G.: Discomfort glare and the lighting of buildings, Transactions Illuminating Engineering Society, Bd. 15, Nr. 2, S. 39–79, 1950.
- [Pol 13] Polin, D.; Khanh, T.Q.: Untersuchung stroboskopartiger Effekte von PWM-gesteuerten LED-Leuchten, Tagungsberichte der Lux Junior, Dörnfeld/Ilm, 27.-29. September 2013.

- [Pos 14] Poschmann, R.; Krüger, U.; Porsch, T.; Kempe, H.: Bedienhandbuch LMK LabSoft, Hrsg.: TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, 18. September 2014.
- [Pro 08] Proctor, R.W.; van Zandt, T.: Human factors in simple and complex systems, Second Edition, 2. Aufl., CRC Press: Hoboken, 2008.
- [Rea 00] Rea, M.S. (Hrsg.): The IESNA lighting handbook. Reference & application, 9. Aufl., Illuminating Engineering Society, IESNA Publications Department: New York, NY, 2000.
- [Röh 02] Röhm GmbH & Co. KG (Hrsg.): PLEXIGLAS SATINICE® DF. Technische Information. Produktbeschreibung, Röhm GmbH & Co. KG: Darmstadt, 2002.
- [Sar 15] Sarey Khanie, M.; Stoll, J.; Einhäuser, W.; Wienold, J.; Andersen, M.: Gaze-driven approach for estimating luminance values in the field of view for discomfort glare assessments. Proceedings of the 28th Session of the CIE, Manchester 28. Juni – 4. Juli 2015, S. 381–392, 2015.
- [Saw 15] Sawicki, D.; Wolska, A.: Discomfort glare prediction by different methods, Lighting Research & Technology, Bd. 47, S. 658–671, 2015.
- [SCHei 15a] Scheir, G.H.; Hanselaer, P.; Bracke, P.; Deconinck, G.; Ryckaert, W.R.: Calculation of the unified glare rating based on luminance maps for uniform and nonuniform light sources, Building and Environment, Bd. 84, S. 60–67, 2015.
- [SCHei 15b] Scheir, G.H.; Hanselaer, P.; van de Perre, L.; Ryckaert, W.R.: Effect of luminance contrast on the perception of discomfort. Proceedings of the 28th Session of the CIE, Manchester 28. Juni – 4. Juli 2015, S. 1870–1876, 2015.
- [SCHie 07] Schierz, C.: Wie wird Leuchtdichte subjektiv als Helligkeit wahrgenommen?, Tagungsberichte Lux Junior, Dörfel/Ilm, 21.-23. September 2007.
- [SCHie 12] Schierz, C.: Physiologische Optik. Vorlesungsskript, Technische Universität Ilmenau: Ilmenau, 15. Mai 2012.
- [SCHmi 89] Schmits, P.W.: Blendung durch kleine Lichtquellen hoher Leuchtdichte im peripheren Gesichtsfeld. Dissertation, Technische Universität Berlin: Berlin, 1989.

- [SCHmi 14] Schmits, P.W.; Moskvina, L.: Einfluss der Blickrichtung bei der Blendungsbewertung von LED Leuchten, Tagungsband der 21. Gemeinschaftstagung der deutschsprachigen lichttechnischen Gesellschaften, Den Haag, 21.-24. September 2014, S. 528–751, 2014.
- [Siv 89] Sivak, M.; Flannagan, M.; Ensing, M.; Simmons, C.J.: Discomfort glare is task dependent, Technical Report UMTRI 89-27, The University of Michigan, Transportation Research Institute: Ann Arbor, Michigan, Oktober 1989.
- [Söl 65] Söllner, G.: Ein einfaches System zur Blendungsbewertung, Lichttechnik, Bd. 17, Nr. 5, S. 59–66, 1965.
- [Sør 91] Sørensen, K.: Practical aspects of discomfort glare evaluation: Interior lighting, Proceeding of the 1st International Symposium on Glare, Orlando, Florida, 24.-25.10.1991, S. 55–59, 1991.
- [STil 29a] Stiles, W.S.: The effect of glare on the brightness difference threshold, Proceedings of the Royal Society B, Bd. 104, S. 322–351, 1929.
- [STil 29b] Stiles, W.S.: The scattering theory of the effect of glare on the brightness difference threshold, Proceedings of the Royal Society B, Bd. 105, S. 131–146, 1929.
- [STil 37] Stiles, W.S.; Crawford, B.H.: The effect of a glaring light source on extrafoveal vision, Proceedings of the Royal Society B, Bd. 122, Nr. 827, S. 255–280, 1937.
- [STon 09] Stone, P.T.: A model for the explanation of discomfort and pain in the eye caused by light, Lighting Research & Technology, Bd. 41, Nr. 2, S. 109–121, 2009.
- [STra 03] Strasburger, H.: Indirektes Sehen. Formerkennung im zentralen und peripheren Gesichtsfeld, Lehr- und Forschungstexte Psychologie, Neue Folge 13, Hogrefe: Göttingen, 2003.
- [Sur 08] Sury, P.M.; Hubalek, S.; Schierz, C.: A first step on eye tracking movements in office settings, Z. Arb. Wiss., Bd. 62, Nr. 3, S. 210–216, 2008.
- [Tak 07] Takahashi, H.; Kobayashi, Y.; Onda, S.; Irikura, T.: Position index for the matrix light source, Journal of Light and Visual Environment, Bd. 31, Nr. 3, S. 128–133, 2007.

- [Tas 11] Tashiro, T.; Kimura-Minoda, T.; Kohko, S.; Ishikawa, T.; Ayama, M.: Discomfort glare evaluation to white LEDs with different spatial arrangement, Proceedings of the 27th Session of the CIE, Sun City, 10.-15. Juli, 2011, S. 583–588, 2011.
- [Tas 15] Tashiro, T.; Kawanobe, S.; Kimura-Minoda, T.; Kohko, S.; Ishikawa, T.; Ayama, M.: Discomfort glare for white LED light sources with different spatial arrangements, Lighting Research & Technology, Bd. 47, S. 316–337, 2015.
- [Tay 74] Taylor, L.H.; Socov, E.W.: The movement of people toward lights, Journal of the Illuminating Engineering Society, S. 237–241, 1974.
- [Tec 12] TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH (Hrsg.): Video photometer LMK. Prospekt V2.0. Imaging light and colour measuring technique: Ilmenau, 2012.
- [Tec 15] TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH: Persönliche Gespräche mit Tobias Porsch am 15. Januar 2015 und 9. September 2015 zur Verbesserung der Bestimmung von UGR-Werten mit LMK. Ilmenau, 2015.
- [Tri 07] Trilux (Hrsg.): Trilux Beleuchtungspraxis. Innenbeleuchtung. Trilux GmbH & Co. KG: Arnsberg, 2007.
- [Tua 05] Tuaycharoen, N.; Tregenza, P.: Discomfort glare from interesting images, Lighting Research & Technology, Bd. 37, Nr. 4, S. 329–341, 2005.
- [Udo 13] Udovičić, L.; Mainusch, F.; Janßen, M.; Nowack, D.; Ott, G.: Photobiologische Sicherheit von Licht emittierenden Dioden (LED). Abschlussbericht zum Projekt F 2115, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Baua: Dortmund, 2013.
- [Val 83] Valeton, J.M., von Norren, D.: Light adaptation of primate cones: An analysis based on extracellular data, Vision Research, Bd. 23, Nr. 12, S. 1539–1547, 1983.
- [Van 12] Vandahl, C.; Herzog, I.; Bieske, K.; Schierz, C.; Markytan, A.: Untersuchungen an LED-Leuchten im Bürobereich, Tagungsband der 20. Gemeinschaftstagung der deutschsprachigen lichttechnischen Gesellschaften, Berlin, 11. bis 14. September 2012, S. 84–91.

- [Ver 52] Vermeulen, D.; Boer, J.B. de: On the admissible brightness of lighting fixtures, *Applied Sciences Research*, Bd. 2, Nr. 1, S. 85–107, 1952.
- [Völ 06] Völker, S.: Hell- und Kontrastempfindung - ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kfz-Scheinwerfern. Habilitationsschrift, Universität Paderborn: Paderborn, 2006.
- [Wat 95] Waters, C.E.; Mistrick, R.G.; Bernecker, C.A.: Discomfort glare from sources of nonuniform luminance, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Bd. 24, Nr. 2, S. 73–85, 1995.
- [Wat 14] Watson, A.B.: A formula for human retinal ganglion cell receptive field density as a function of visual field location, *Journal of Vision*, Bd. 14, Nr. 7, S. 1–17, 2014.
- [Wes 65] Westheimer, G.: Spatial interaction in the human retina during scotopic vision, *J. Physiol.*, Nr. 181, S. 881–894, 1965.
- [Wes 67] Westheimer, G.: Spatial interaction in human cone vision, *J. Physiol.*, Nr. 190, S. 139–154, 1967.
- [Wie 06] Wienold, J.; Christoffersen, J.: Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras, *Energy and Buildings*, Bd. 38, Nr. 7, S. 743–757, 2006.
- [Wil 84] Wilkins, A.J.; Nimmo-Smith, I.; Tait, A.; McManus, C.; Della Sala, S.; Tilley, A.; Arnold, K.; Barrie, M.; Scott, S.: A neurological basis for visual discomfort, *Brain*, Bd. 107, S. 989–1017, 1984.
- [Wil 15] Wilkins, A.J.: Physiological basis for visual discomfort: Application in lighting design. Proceedings of the 28th Session of the CIE, Manchester 28. Juni – 4. Juli 2015, S. 81–90, 2015.
- [Wol 03] Wolf, S., Gall, D.: Luminance analysers - What they are and how they work, Proceedings of the 25th Session of the CIE, San Diego, 25. Juni – 2. Juli 2003, S. D2-66 – D2-69.
- [Wol 04] Wolf, S.: Entwicklung und Aufbau eines Leuchtdichte-Analysators zur Messung von Blendungskennzahlen. Dissertation, Technische Universität Ilmenau: Ilmenau, 2004.
- [Wol 14] Wolska, A.; Sawicki, D.: Evaluation of discomfort glare in the 50+ elderly: Experimental study, *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, Bd. 27, Nr. 3, S. 444–459, 2014.



- [Yan 15a] Yang, Y.; Ma, S.N.; Lou, M.R.; Liu, X.Y.: Discomfort glare by non-uniform white LED matrices. Proceedings of the 28th Session of the CIE, Manchester 28. Juni – 4. Juli 2015, S. 393–399, 2015.
- [Yan 15b] Yang, Y.; Lou, M.R.; Ma, S.N.; Liu, X.Y.: Assessing glare. Part 1: Comparing uniform and non-uniform LED luminaires, *Lighting Research & Technology*, 2015. DOI: 10.1177/1477153515607396



## Sonstige verwendete Literatur

Adrian, W.: Eine Modifikation der Methode zur Blendungsbewertung in der Straßenbeleuchtung, *Lichttechnik*, Bd. 23, Nr. 8, S. 441–446, 1971.

Aktan, F., Schnell, T.: Effects of High Intensity Discharge and Tungsten-Halogen Headlamp Glare on Driver Looking Behavior, *Progress in automobile lighting*, S. 23–36: Darmstadt, 23.-24. September 2003.

Baer, R. (Hrsg.): *Beleuchtungstechnik*, 2. Aufl., 386 S., Verlag Technik: Berlin, 1996.

Bargary, G., Furlan, M., Raynham, P.J., Barbur, J.L., Smith, A.T.: Cortical hyperexcitability and sensitivity to discomfort glare, *Neuropsychologia*, Bd. 69, S. 194–200, 2015.

Barlow, H.B.: Eye Movements During Fixation, *Journal of Physiology*, Bd. 116, S. 290–306, 1952.

Bennett, C.A.: Discomfort Glare: A review of some research. In: *Traffic control devices, geometrics, visibility, and route guidance*. Transportation research record, Bd. 737, S. 84–86, National Research Council, National Academy of Sciences: Washington, DC, 1979.

Benz, C., Leibig, J., Roll, K.-F.: Gestalten der Sehbedingungen am Arbeitsplatz. Einflüsse, Gestaltungsmaßnahmen und Beispiele, *Praxis der Ergonomie*, Verlag TÜV Rheinland: Köln, 1988.

Blascheck, T.: Eyetracking basiertes Analysekonzept zur Evaluation von Visualisierungen. Diplomarbeit, Universität Stuttgart: Stuttgart, 2012.

Bodmann, H.W.; Eberbach, K.: Untersuchungen zur Blendung einzelner Spiegelraster-Leuchten, *Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe: Karlsruhe*, 1988.

Boer, J.B. de et al.: *Public Lighting*, Philips Technical Library, U.D.C. No. 628.971, N. V. Philips Gloeilampfabrieken: Eindhoven, 1967.

Böhm, M.: Adaptive Frontbeleuchtungssysteme im Kraftfahrzeug: Ein Beitrag zur nächtlichen Verkehrssicherheit?. Dissertation, Technische Universität Chemnitz: Chemnitz, 2012.

Bollough, J.D.: Luminance versus luminous intensity as a metric for discomfort glare, *SAE International*, 2011.

- Bollough, J.D., Sweater Hickcox, K.: Interactions among light source luminance, illuminance and size on discomfort glare, SAE International, 2012.
- Börner, F.: Altes Problem, neuer Lösungsansatz. Beschreibung der Adaptationsleuchtdichte inhomogener Szenen über die Kugelprojektion, Tagungsberichte der Lux Junior 2013, Dörnfeld/Ilm, 27.-29. September 2013.
- Bortz, J.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, Springer-Lehrbuch, 6. Aufl., Springer-Verlag: Heidelberg, 2005.
- Bourne, L.E., Ekstrand, B.R.: Einführung in die Psychologie, 4. Aufl., Klotz: Eschborn, 2005.
- Boyce, P.R.: Human Factors in Lighting, Applied Science Publishers London, 1981.
- Boyce, P.R.: Lighting research for interiors: the beginning of the end or the end of the beginning, Lighting Research & Technology, Bd. 36, Nr. 4, S. 283–294, 2004.
- Çakir, A.: Licht und Gesundheit. Gesundheits- und Befindlichkeitsstörungen bei der Büro- und Bildschirmarbeit, 3. Aufl., Ergonomic, Institut für Arbeits- und Sozialforschung: Berlin, 1998.
- Chase, C.; Tosha, C.; Borsting, E.; Ridder; W.H.III.: Visual Discomfort and Objective Measures of Static Accomodation, Optometry and Vision Science, Bd. 86, Nr. 7, S. 883–889, 2009.
- Clear, R.D.: Discomfort Glare: What Do We Actually Know?, Lighting Research & Technology, S. 1–18, 2012.
- Conlon, E.; Lovegrove; W.; Hine, T.; Chekaluk, E.; Piatek, K.; Hayes-Williams, K.: The effects of visual discomfort and pattern structure on visual search, Perception, Bd. 27, Nr. 1, S. 21–33, 1998.
- Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.): Die Begrenzung der Direktblendung nach DIN 5035, LiTG: Karlsruhe, 1976.
- Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.): Methoden zur Bewertung der Blendung in der Straßenbeleuchtung, LiTG: Hamburg, 1981.
- Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hg.): Beleuchtung im Büro. Hilfen für die Planung von Beleuchtungsanlagen von Räumen mit Bildschirm- und Büroarbeitsplätzen, Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V.; Verwaltungs-Berufgenossenschaft, 2005.
- Dowling, J.E.: The retina. An approachable part of the brain, Belknap Press of Harvard University Press: Cambridge, Massachusetts, 1987.

- Duchowski, A.T.: Eye tracking methodology. Theory and practice, 2. Aufl., Springer: London, 2007.
- Eckert, M.: Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr, 1. Aufl., Verlag Technik: Berlin, 1993.
- Einhorn, H.D.: Unified Glare Rating (UGR): Merits and Application of Multiple Sources, *Lighting Research & Technology*, Bd. 30, Nr. 2, S. 89–93, 1998.
- Franck, N. (Hrsg.): Die Technik wissenschaftlichen Arbeitens. Eine praktische Anleitung, 15. Aufl., Schöningh: Paderborn, München, Wien, Zürich, 2009.
- Fry, G.A.: The Evaluation of Discomfort Glare, *Illuminating Engineering*, Bd. 51, Nr. 11, S. 722–728, 1956.
- Gall, D.: Blendungsuntersuchungen an Leuchten mit Lampen hoher Leuchtdichte. Forschungsbericht, Technische Hochschule Ilmenau: Ilmenau, 1992.
- Gall, D.: Blendungsuntersuchungen an Leuchten mit Lampen hoher Leuchtdichte. Ergänzende Untersuchungen. Forschungsbericht, Technische Hochschule Ilmenau: Ilmenau, 1993.
- Gall, D.: Einzelplatzbeleuchtung und Allgemeinbeleuchtung am Arbeitsplatz, *Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz Forschung*, Bd. 753, 2. Aufl., Wirtschaftsverlag NW Verlag für Neue Wissenschaften: Bremerhaven, 1998.
- Geerdinck, L.: Glare perception in terms of acceptance and comfort. Masterarbeit, Technische Universität Eindhoven: Eindhoven, August 2012.
- Greiner Mai, U.: Methodenauswahl zur Bestimmung von Seh- und Arbeitsleistungen. Diplomarbeit, Technische Hochschule Ilmenau: Ilmenau, Dezember 1990.
- Hartmann, E., Ucke, C.: Der Einfluss der Blendquellengröße auf die physiologische Blendung bei kleinen Blendwinkeln, *Lichttechnik*, Bd. 26, Nr. 1, S. 20–23, 1974.
- Herzog, I.: Untersuchungen von flächigen LED-Leuchten im Innenbereich. Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau: Ilmenau, 2012.
- Hopkinson, R.G.: The multiple criterion technique of subjective appraisal., *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Bd. 2, Nr. 3, S. 124–131, 1950.
- Hubel, D.H.: Auge und Gehirn. Neurobiologie des Sehens, *Spektrum der Wissenschaft*: Heidelberg, 1989.

Illuminating Engineering Society of North America (Hrsg.): American national standard practice for office lighting, IESNA: New York, 1991.

Ijspeert, J.K. et al.: The Intraocular Straylight Function in 129 Healthy Volunteers; Dependence on Angle, Age and Pigmentation, *Vision Research*, Bd. 30, Nr. 5, S. 699–707, 1990.

Illuminating Engineering Society (Hrsg.): Evaluation of discomfort glare: the IES glare index system for artificial lighting installations. IES Technical Report Nr. 10: London, 1967.

Iwata, T., Tokura, M.: Position index for a glare source located below the line of vision, *Lighting Research & Technology*, Bd. 29, Nr. 3, S. 172–178, 1997.

Iwata, T., Tokura, M.: Examination of the limitations of predicted glare sensation vote (PGSV) as a glare index for a large source. Towards a comprehensive development of discomfort glare evaluation, *Lighting Research & Technology*, Bd. 30, Nr. 2, S. 81–88, 1998.

Knoop, M.: Lighting Quality Measures for Interior Lighting with LED Lighting Systems, Proceedings of the 27th Session of the CIE, Sun City, 10.-15. Juli, S. 219–225, 2011.

Landau, K.: Lexikon Arbeitsgestaltung. Best Practice im Arbeitsprozess, 1. Aufl., Gentner: Stuttgart, 2007.

Lin, Y., Liu, Y., Sun, Y., Zhu, X., Lai, J., Heynderickx, I.: Model predicting discomfort glare caused by LED road lights, *Optic Express*, Bd. 22, Nr. 15, S. 18056–18071, 2014.

Linney, A.S.: Maximum Luminances and Luminance Ratios and their Impact on Users' Discomfort Glare Perception and Productivity in Daylit Offices. Testing the hypothesis: Maximum luminance and ratio recommendations for visual comfort should be specific to the luminous conditions and by accounting for the impact of adaptation, the recommendations will be more accurate. Master thesis, Victoria University of Wellington: Wellington, 2008.

Logan, H.L., Lange, A.W.: The Evaluation of Visual Comfort Data, *Illuminating Engineering*, Bd. 47, Nr. 4, S. 195–205, 1952.

Lynes, J. A.: Research note: Discomfort glare and visual distraction, *Lighting Research & Technology*, Bd. 9, Nr. 1, S. 51–52, 1977.

Markytan, A.: Untersuchungen zur flächenbezogenen Beleuchtung in Büroräumen. Dissertation, Technische Universität Ilmenau: Ilmenau, 2007.

- Methling, D., Peschke, M.: Licht, Beleuchtung und Sehen in der Arbeitsumwelt, 2. Aufl., Verlag Tribüne: Berlin, 1987.
- Minnerup, J.: Qualitätsanforderungen an LED-Beleuchtung in kommunalen Anwendungsfeldern. Licht im öffentlichen Raum. Trilux GmbH & Co. KG: Lengede, 11.07.2012.
- Nahar, N.K., Gowrisankaran, S., Hayes, J.D., Sheedy, J.E.: Interactions of visual and cognitive stress, *Optometry*, Bd. 82, S. 689–696, 2011.
- Navarro, R., Moreno, E., Dorronsoro, C.: Monochromatic aberrations and point-spread functions of the human eye across the visual field, *Journal of Optical Society of America*, Bd. 15, Nr. 9, S. 2522–2529, 1998.
- Nechwatal, J.: Messtechnische Erfassung der lichttechnischen Bewertungsgröße UGR in realen Beleuchtungslösungen unter Feldbedingungen basierend auf der LMK-Mobile-Technologie. Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau: Ilmenau, 2008.
- Osterhaus, W.K.E., Veitch, J.A.: Workshop on Discomfort Glare: Final Report. Workshop at 27th Session of the CIE, Sun City, 14. Juli 2011, 2011.
- Porsch, T., Schmidt, F.: Assessment of daylight glare parameters with imaging luminance measuring devices (ILMD) and image processing. Proceedings of the 2nd CIE Expert Symposium on Appearance, Gent, 8.-10. September 2010, 2 S..
- Rodriguez, R.G., Pattini, A.: Tolerance of Discomfort Glare from a Lagre Area Source for Work on a Visual display, *Lighting Research & Technology*, S. 1–14, 2012.
- Röhler, R.: Sehen und Erkennen. Psychophysik des Gesichtssinnes. Springer: Berlin, 1995.
- Sarey Khanie, M. et al.: Investigation of gaze patterns in daylight workplaces: using eye-tracking methods to objectify view direction as a function of lighting conditions, Proceedings of the CIE Centenary Conference, Paris, 15.-16. April 2013, S. 250–259, 2013.
- Schenkman, B., Fukada, T., Persson, B.: Glare from monitors measured with subjective scales and eye-movements, *Displays*, Bd. 20, Nr. 1, S. 11–21, 1999.
- Schiller, C., Sprute, J.H., Haferkemper, N., Bodrogi, P., Khanh, T.Q.: Psychologische Blendung bei Halogen- und Xenonscheinwerfern, *Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 111, Nr. 2, S. 132–138, 2009.

Schneider, G.: "EyeTracking". Darstellung und Analyse der Daten, Stand vom 27. Februar 2007, Humboldt-Universität Berlin, erreichbar unter [www2.hu-berlin.de/reha/eye/EyeTrackerDarstellung.pdf](http://www2.hu-berlin.de/reha/eye/EyeTrackerDarstellung.pdf), zitiert am 29. November 2013.

Sendrup, P.: Generalization of the Unified Glare Rating Method: A Proposal and Laboratory Test, *Lighting Research & Technology*, Bd. 33, Nr. 4, S. 243–257, 2001.

Söllner, G.: Bemerkungen zu einigen Verfahren der Blendungsbewertung, *Lichttechnik*, Bd. 20, Nr. 10, S. 111–118, 1968.

Söllner, G.: Blendungsbewertung in Beleuchtungsanlagen mit Lampen hoher Leuchtdichte, *Lichttechnik*, Bd. 26, Nr. 4, S. 169–172, 1974.

Söllner, G.: Blendungsbewertung in Innenräumen. Forschungen zur Beleuchtungstechnik vor 40 Jahren, Tagungsbericht der Lux Junior 2003, Arnstadt, 19.-21. September 2003.

Strahlenschutzkommission (Hrsg.): Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, 2006.

Sweater Hickcox, K., Narendran, N., Bullough, J.D., Freyssinier, J.P.: Effect of different coloured luminous surrounds on LED discomfort glare perception, *Lighting Research & Technology*, Bd. 45, Nr. 4, S. 464–475, 2013.

The Lighting Research Institute (Hrsg.): Proceedings of the 1st International Symposium on Glare, New York, 24.-25. Oktober 1991.

Theeuwes, J., Alferdinck, J.W.A.M., Perel, M.: Relation Between Glare and Driving Performance, *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Bd. 44, Nr. 1, S. 95–107, 2002.

Tiller, D.K., Veitch, J.A.: Perceived Room Brightness: Pilot Study on the Effect of Luminance Distribution, *Lighting Research & Technology*, Bd. 27, Nr. 2, S. 93–101, 1995.

Vandahl, C., Gudd, N., Schierz, C.: Subjective Assessment of Brightness Depending on Colour Temperature, Tagungsband der Lux Europa 2009, Istanbul, 9.-11. September 2009, S. 109–115., 2009.

Völker, S.: Blendung - Ein Rückblick über 100 Jahre Forschung, Tagungsband der 20. Gemeinschaftstagung der deutschsprachigen lichttechnischen Gesellschaften, Berlin, 11.-14. September 2012, S. 476–483, 2012.

Vos, J.J.: Reflections on Glare, *Lighting Research & Technology*, Bd. 35, Nr. 2, S. 163–176, 2003.



Walter, T.: Sich den Blick zu Nutzen machen: Was bei Eye-Tracking zu beachten ist, Stand vom 6. Mai 2013, erreichbar unter <http://www.planung-analyse.de/news/pages/protected/show.php?id=7011&sortierid=1&currPage=1&timer=-1&params=1>, zitiert am 29. November 2013.

Waters, C.E., Mistrick, R.G., Bernecker, C.A.: Brightness Perception From Sources of Non-Uniform Luminance, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Bd. 27, Nr. 2, S. 89–101, 1998.

Weisberg, S.: *Applied linear regression*, Wiley series in probability and mathematical statistics, 2. Aufl., Wiley: New York, 1985.

Wesemann, W.: Die Grenzen der Sehschärfe. Teil 6: Welche Sehschärfe erreicht der Mensch?, *Deutsche Optikerzeitung*, Nr. 2, S. 42–47, 2003.

Wittlich, M.: *Blendung - Theoretischer Hintergrund*. Informationen des Instituts für Arbeitsschutz der DGUV, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: Sankt Augustin, 2010.

Zydek, B.W.: *Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern unter dynamischen Bedingungen*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt: Darmstadt, 2014.



## Im Rahmen der Dissertation entstandene Publikationen

FUNKE, CARSTEN:

### **Blendungsbewertung von LED-Leuchten in Innenräumen**

Fachvortrag im Rahmen der 10. Sitzung des FA Expertenforum Innenbeleuchtung am 15. Mai 2013 in Regensburg.

FUNKE, CARSTEN:

### **Aktueller Stand der Blendungsbewertung in Innenräumen**

Fachvortrag im Rahmen des 1. Blendungsworkshops am 02. September 2013 in Berlin.

FUNKE, CARSTEN:

### **Untersuchungskonzept zur Blendungsbewertung von LED-Leuchten in Innenräumen**

Fachvortrag im Rahmen der Jahreshauptversammlung des Vereins zur Förderung des Fachgebiets Lichttechnik der TU Ilmenau am 18. Oktober 2013 in Ilmenau.

FUNKE, CARSTEN:

### **Blendungsbewertung von LED-Leuchten in Innenräumen**

Fachvortrag im Rahmen der 11. Sitzung des FA Expertenforum Innenbeleuchtung am 14. Februar 2014 in Dornbirn.

FUNKE, CARSTEN:

### **What are possible underlying causes of discomfort glare?**

Fachvortrag im Rahmen des Workshops 4: "Glare of LED Lighting Products" auf der CIE Tagung Lighting Quality & Energy Efficiency am 25. April 2014 in Kuala Lumpur.

FUNKE, CARSTEN:

### **Blendungsbewertung von strukturierten LED-Leuchten in Innenräumen**

Fachvortrag im Rahmen des 2. Blendungsworkshops am 09. Juli 2014 in Darmstadt.

FUNKE, CARSTEN; SCHIERZ, CHRISTOPH:

**Untersuchung zur Erweiterung des UGR-Blendungsverfahrens für strukturierte LED-Leuchten**

Fachvortrag auf der 21. Gemeinschaftstagung der deutschsprachigen lichttechnischen Gesellschaften am 26. September 2014 in Den Haag.

FUNKE, CARSTEN; SCHIERZ, CHRISTOPH:

**Untersuchung zur Erweiterung des UGR-Blendungsverfahrens für strukturierte LED-Leuchten**

Fachvortrag im Rahmen der 12. Sitzung des FA Expertenforum Innenbeleuchtung am 29. September 2014 in Wismar.

FUNKE, CARSTEN; SCHIERZ, CHRISTOPH:

**Untersuchung zur Erweiterung des UGR-Blendungsverfahrens für strukturierte LED-Leuchten**

Fachvortrag im Rahmen der Sitzung des ZVEI Fachausschusses Technik „Innenbeleuchtung“ am 5. November 2014 in Frankfurt/Main.

FUNKE, CARSTEN; SCHIERZ, CHRISTOPH:

**Einfluss der Leuchtdichtestruktur der Blendquelle auf die psychologische Blendung** Fachvortrag im Rahmen des 3. Blendungworkshops am 14. Dezember 2014 in Berlin.

FUNKE, CARSTEN; SCHIERZ, CHRISTOPH:

**Untersuchung zur Erweiterung des UGR-Blendungsbewertungsverfahrens für strukturierte LED-Leuchten**

Beitrag in: „UNILED. Erfassung und Beseitigung von Innovationshemmnissen beim Solid State Lighting. Ausgewählte Ergebnisse des Forschungsvorhabens.“. Hrsg.: Völker, Stephan; Schumacher, Heike. S. 139-143, Universitätsverlag der TU Berlin: Berlin, 2015.

FUNKE, CARSTEN:

**Variation der Umfeldleuchtdichte bei Blendungsuntersuchungen mit einer strukturierten LED-Leuchte in Innenräumen**

Untersuchungsbericht der Forschungskooperation zwischen der ERCO GmbH und der TU Ilmenau vom 1. Dezember 2014 bis 31. Dezember 2014. Ilmenau, 30. Januar 2015.

FUNKE, CARSTEN; SCHIERZ, CHRISTOPH:

**Extension of the Unified Glare Rating Formula for Non-Uniform LED Luminaires**

Posterpräsentation auf der 28. Session der CIE am 01. Juli 2015 in Manchester.  
Beitrag im Tagungsband S. 1471-1480

FUNKE, CARSTEN; SCHIERZ, CHRISTOPH:

**Study on discomfort glare from non-uniform LED luminaires to extend UGR**

Fachvortrag im Rahmen des 1. Treffens des JTC 7 der CIE: "Discomfort caused by glare from luminaires with non-uniform source luminance" am 02. Juli 2015 in Manchester.

PORSCH, TOBIAS; FUNKE, CARSTEN; SCHMIDT, FRANZ; SCHIERZ, CHRISTOPH:

**Measurement of the Unified Glare Rating (UGR) based on using ILMD**

Fachvortrag auf der 28. Session der CIE am 02. Juli 2015 in Manchester.  
Beitrag im Tagungsband S. 536-542

PORSCH, TOBIAS; FUNKE, CARSTEN; SCHIERZ, CHRISTOPH; SCHMIDT, FRANZ:

**Ist eine objektive Beschreibung der Störungsempfindung bei künstlicher Beleuchtung möglich?**

Zeitschriftenbeitrag in: „LICHT“. Ausgabe Juli/August 2015. Pflaum-Verlag.  
S. 70-74.

FUNKE, CARSTEN:

**Einfluss der Struktur der leuchtenden Fläche auf die Blendung  
- Aktueller Stand Innenbeleuchtung -**

Fachvortrag im Rahmen des 4. Blendungsworkshops am 23. Juli 2015 in Ilmenau.

FUNKE, CARSTEN; SCHIERZ, CHRISTOPH:

**Extension of the Unified Glare Rating Formula for Non-Uniform LED Luminaires**

Fachvortrag auf der Lux Junior 2015, dem 12. Internationalem Forum für licht-technischen Nachwuchs, am 25. September 2015 in Dörnfeld/Ilm.

FUNKE, CARSTEN; SCHIERZ, CHRISTOPH:

**Einfluss der Struktur der leuchtenden Fläche auf die Blendung  
- Aktueller Stand Innenbeleuchtung -**

Fachvortrag im Rahmen der 14. Sitzung des Fachausschuss Expertenforum Innenbeleuchtung am 29. September 2015 in Hamburg.

FUNKE, CARSTEN; SCHIERZ, CHRISTOPH:

**Untersuchung zur Erweiterung des UGR-Blendungsverfahrens für strukturierte LED-Leuchten**

Fachvortrag auf der Technischen Fachtagung des Fachverbands Licht des ZVEI am 6. November 2015 in Frankfurt/Main.

FUNKE, CARSTEN; SCHIERZ, CHRISTOPH:

**Blendungsbewertung von strukturierten LED-Leuchten in Innenräumen**

Fachvortrag im Rahmen des VDI Wissensforums „Intelligente Beleuchtungssysteme mit LED“ am 11. November 2015 in Düsseldorf.

FUNKE, CARSTEN:

**Anwendung des neuen Blendungsbewertungsverfahrens auf kommerzielle LED-Leuchten**

Fachvortrag im Rahmen der 15. Sitzung des Fachausschuss Expertenforum Innenbeleuchtung am 05. April 2016 in Arnsberg.

GEERDINCK, LEONIE .M.; FUNKE, CARSTEN; VISSENBERG, MICHEL C.J.M., SCHIERZ, CHRISTOPH

**Discomfort glare of non-uniform luminaires – A literature review**

Beitrag auf dem 4. CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance im September 2016 in Prag.

FUNKE, CARSTEN; SCHIERZ, CHRISTOPH:

**Was ist die effektive Leuchtdichte oder effektive Fläche von strukturierten LED-Leuchten bei der Blendungsbewertung mit UGR?**

Beitrag auf der 22. Gemeinschaftstagung der deutschsprachigen lichttechnischen Gesellschaften im September 2016 in Karlsruhe.

# Anhang

## A.1 Konfigurationen der Blendquelle

Tab. A.1 Konfigurationen der Blendquelle – einzelne LED-Punkte (Teil 1). Bei den angegebenen Werten handelt es sich um Planungswerte (außer die gemessene mittlere Leuchtdichte). Bei der Berechnung der Raumwinkel wurde die Neigung der Leuchte zum Beobachter berücksichtigt, indem die Fläche der Leuchte mit  $\cos 60^\circ$  multipliziert wurde.

Nr.	Struktur (Abb. 3.1)	Leuchtdichte LED ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )	Anzahl LP	Größe LED (sr)	Leuchtdichte unim. Umg. ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )	Leuchtdichte dir. unim. Umg. ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )	Leuchtdichte unim. Umg. ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )	Größe dir. Umfeld (sr)	Größe Leuchte (sr)	LED-Abstand ( $^\circ$ )	mittlere Leuchtdichte ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )	UGR $30^\circ$	UGR $15^\circ$	UGR $0^\circ$	Lichtstrom Leuchte (lm)	gemessene mittlere Leuchtdichte ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )	Mögliche Schlussfolgerungen aus Vergleich							
1	7	800	49	1,58E-05	-	-	80	-	1,87E-02	1,0	110	-7,4	-2,9	1,0	115,97	110	Unterschied homogene Fläche zu Einzel-LEDs							
2	8		121							1,0	153	-5,1	-0,5	3,3	162,15	130	bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten							
3	1	8000	1	-	-	-	80	-	-	-	87	-9,0	-4,5	-0,6	91,58	99								
4	1						800			-	806	6,5	11,0	14,9	851,86	134								
5	6						80			-	-	-	-	1,0	-	-	140	-5,7	-1,2	2,7	147,84	124	Einfluss des Abstandes der LEDs bei	
6	9													2,9			125							
7	10						4,8			125														
8	6						1,0			718														
9	9						2,9			719														
10	10						4,8			719														
11	11						8000			9	1,58E-05	800	-	80	-	1,87E-02	1,0	170	-4,4	0,2	4,0	179,24	147	Einfluss des unmittelbaren Hintergrunds bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
12	12													7,74E-04			213	-2,8	1,8	5,6	225,01	190		
13	7	8000	49	1,58E-05	-	-	80	-	-	1,0	406	1,7	6,2	10,1	429,14	263	Unterschied							
14	7						800			1096	8,6	13,1	17,0	1158,74	847	homogene Fläche zu Einzel-LEDs								
15	8	8000	121	-	-	-	80	-	-	1,0	885	7,1	11,7	15,5	935,49	498	bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten							
16	8						800			1532	10,9	15,5	19,3	1619,05	1061									

Tab. A.2 Konfigurationen der Blendquelle – einzelne LED-Punkte (Teil 2). Bei den angegebenen Werten handelt es sich um Planungswerte (außer die gemessene mittlere Leuchtdichte). Bei der Berechnung der Raumwinkel wurde die Neigung der Leuchte zum Beobachter berücksichtigt, indem die Fläche der Leuchte mit  $\cos 60^\circ$  multipliziert wurde.

Nr.	Struktur (Abb. 3.1)	Leuchtdichte LED ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )	Anzahl LP	Größe LED (sr)	Leuchtdichte dir. unim. Umg. ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )	Leuchtdichte unim. Umg. ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )	Größe dir. Umfeld (sr)	Größe Leuchte (sr)	LED-Abstand ( $^\circ$ )	mittlere Leuchtdichte ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )	UGR $30^\circ$	UGR $15^\circ$	UGR $0^\circ$	Lichtstrom Leuchte (lm)	gemessene mittlere Leuchtdichte ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )	Mögliche Schlussfolgerungen aus Vergleich
17	1					80			-	147	-5,3	-0,8	3,1	155,73	128	
18	1		1			800			-	867	7,0	11,5	15,4	916,01	724	
19	1					8000			-	8061	22,5	27,0	30,9	8518,79	6869	
20	6					80			1,0	686	5,4	9,9	13,8	725,23	388	
21	9					800			2,9	1401	10,3	14,8	18,7	1480,38	388	Einfluss des Abstandes der LEDs bei
22	10					800			4,8					0,00	974	verschiedenen
23	6					800			2,9					0,00	981	Kontrasten /
24	9					800			4,8					9031,85	987	Leuchtdichten
25	10					8000			1,0	8546	22,9	27,4	31,3	0,00	7081	
26	6					8000			2,9					0,00	7072	
27	9		9			8000			4,8					0,00	7067	
28	10			1,58E-05		8000		1,87E-02						0,00	403	Einfluss des
29	11				800		7,74E-04			716	5,7	10,2	14,0	756,73	403	Einfluss des
30	12				8000		1,90E-03			759	6,1	10,6	14,5	802,65	442	unmittelbaren
31	11				8000		7,74E-04		1,0	1014	8,1	12,6	16,5	1071,68	663	Hintergrunds bei
32	12				8000		1,90E-03			1492	10,8	15,3	19,2	1576,80	1121	verschiedenen
33	11				8000		7,74E-04			1699	11,7	16,2	20,1	1795,33	1218	Kontrasten /
34	12				8000		1,90E-03			2133	13,2	17,8	21,6	2254,53	1628	Leuchtdichten
35	7					80			1,0	3381	16,4	21,2	24,8	3572,72	1793	Unterschied
36	7		49			800			1,0	4071	17,7	22,4	26,1	4302,22	2384	homogene Fläche
37	7					8000			1,0	10974	24,6	29,3	33,0	11597,16	8429	zu Einzel- LEDs
38	8					80			1,0	8230	22,6	27,3	31,0	8698,21	4181	bei verschiedenen
39	8		121			800			1,0	8877	23,1	27,9	31,5	9381,53	4665	Kontrasten /
40	8					8000			1,0	15343	26,9	31,7	35,3	16214,71	10490	Leuchtdichten
41	6					400			1,0					1875	1875	Einfluss des
42	9					4000			2,9	3431	16,5	21,3	24,9	3626,16	1846	Abstandes der
43	10					4000			4,8					1895	1895	LEDs bei
44	6					4000	0,0186		1,0	7004	21,5	26,2	29,9	7401,90	4797	verschiedenen
45	9					4000			2,9					4825	4825	Kontrasten /
46	10			1,58E-05		4000			4,8					4894	4894	Leuchtdichten
47	11		9			400		0,0186889		3580	16,8	21,4	25,2	3783,64	1907	Einfluss der Größe
48	12				4000		7,74E-04		1,0	3797	17,2	21,8	25,6	4013,24	2121	und der
49	11				40000		1,90E-03			5070	19,3	23,8	27,7	5358,40	3163	Leuchtdichte der
50	12				40000		7,74E-04			7460	21,9	26,5	30,3	7883,99	5286	unmittelbaren
51	11				40000		1,90E-03			8494	22,8	27,4	31,2	8976,66	6028	Umgebung
52	12				40000		7,74E-04			10666	24,4	28,9	32,8	11272,65	8155	



Tab A.3 Konfigurationen der Blendquelle – homogene Flächen. Bei den angegebenen Werten handelt es sich um Planungs-werte (außer die gemessene mittlere Leuchtdichte). Bei der Berechnung der Raumwinkel wurde die Neigung der Leuchte zum Beo

Nr.	Struktur (Abb. 3.1)	Leuchtdichte Lichtpunkt (cd/m²)	Größe Fläche in mm² (%)	Größe LED (sr)	Leuchtdichte dir. umm. Umg. (cd/m²)	Leuchtdichte umm. Umg. (cd/m²)	Größe dir. Umfeld (sr)	Größe Leuchte (sr)	LED-Abstand (°)	mittlere Leuchtdichte (cd/m²)	UGR 30°	UGR 15°	UGR 0°	Lichtstrom Leuchte (lm)	Gemessene mittlere Leuchtdichte (cd/m²)	Mögliche Schlussfolgerungen aus Vergleich
53	3	800	118 x 118 (3,6)	7,74E-04	80	80	-	-	-	110	-7,4	-2,7	1,3	116,04	125	Unterschied homogene Fläche zu Einzel- LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
54	4		185 x 185 (9,5)	1,90E-03	80	80			0,0186889	-	153	-5,1	-0,3	3,6	161,96	168
55	5	8000	600 x 600 (100)	1,87E-02	800	800	-	-	-	800	6,4	11,1	15,1	845,47	696	Einfluss des Abstandes der LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
56	2		50 x 50 (0,7)	1,39E-04	80	80			1,87E-02	-	139	-5,7	-1,0	3,0	146,75	167
57	2	8000	118 x 118 (3,6)	7,74E-04	800	800	-	-	-	854	6,9	11,6	15,6	902,01	752	Einfluss des Abstandes der LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
58	3								80	408	1,7	6,5	10,4	409	409	Unterschied homogene Fläche zu Einzel- LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
59	3	8000	185 x 185 (9,5)	1,90E-03	800	800	-	-	-	1098	8,6	13,3	17,3	1160,42	971	Einfluss des Abstandes der LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
60	4								80	886	7,1	11,9	15,8	862	862	Unterschied homogene Fläche zu Einzel- LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
61	4	8000	600 x 600 (100)	1,87E-02	8000	8000	-	-	-	1533	10,9	15,7	19,6	1619,62	1378	Einfluss des Abstandes der LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
62	5								8000	8000	22,4	27,1	31,1	8454,65	6881	Unterschied homogene Fläche Einzelpunkte bei gleicher mittlerer Leuchtdichte
63	2	80000	50 x 50 (0,7)	1,39E-04	80	800	-	-	-	674	5,2	10,0	13,9	712,24	505	Einfluss des Abstandes der LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
64	2								800	1389	10,3	15,0	19,0	1467,50	1065	Unterschied homogene Fläche zu Einzel- LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
65	2	80000	118 x 118 (3,6)	7,74E-04	800	8000	-	-	-	8535	22,9	27,6	31,6	9020,14	7185	Einfluss des Abstandes der LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
66	3								80	3388	16,5	21,2	25,2	3580,53	2716	Unterschied homogene Fläche zu Einzel- LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
67	3	80000	185 x 185 (9,5)	1,90E-03	800	8000	-	-	-	4078	17,7	22,5	26,4	4309,95	3174	Einfluss des Abstandes der LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
68	3								800	10980	24,6	29,3	33,3	11604,19	9146	Unterschied homogene Fläche zu Einzel- LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
69	4	80000	185 x 185 (9,5)	1,90E-03	80	800	-	-	-	8211	22,6	27,3	31,3	8677,63	7512	Einfluss des Abstandes der LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
70	4								800	8658	23,1	27,9	31,8	9361,13	7683	Unterschied homogene Fläche zu Einzel- LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
71	4	80000	185 x 185 (9,5)	1,90E-03	800	8000	-	-	-	15325	26,9	31,7	35,6	16196,17	13012	Einfluss des Abstandes der LEDs bei verschiedenen Kontrasten / Leuchtdichten
									8000							

## A.2 Versuchseinweisung der Probanden

### Versuchseinweisung – Teil 1: Rechnen auf Monitor

Willkommen und vielen Dank für Ihre Bereitschaft uns zu helfen.

Ihre Aufgabe in den nächsten 90 Minuten wird es sein, verschiedene Lichtsituationen zu beurteilen. Zunächst möchten wir Ihnen erläutern

- was Sie tun sollen
- was Sie konkret beurteilen werden
- wie Sie urteilen sollen

#### Was Sie tun

In Ihrem oberen Gesichtsfeld befindet sich eine Deckenleuchte, die in Ihrer Struktur und Helligkeit variiert wird. Eine Beleuchtungseinstellung wird jeweils 15 Sekunden dargeboten. Währenddessen sollen Sie eine Rechenaufgabe am Monitor der gegenüberliegenden Wand lösen. Die Rechenaufgabe setzt sich aus zwei Zeilen mit jeweils drei Zahlen zusammen, die addiert oder subtrahiert werden. Ihre Aufgabe ist es, die Zeilenergebnisse zu berechnen und anschließend das kleinere Ergebnis vom größeren Ergebnis abzuziehen.

Beispiel:

$$1 + 5 - 3 = 3 \quad \rightarrow \text{merken}$$

$$3 + 2 + 4 = 9 \quad \rightarrow 9 - 3 = 6$$

Nachdem die Aufgabe verschwindet, nennen Sie bitte ausschließlich das Endergebnis.

#### Was Sie beurteilen

Abgesehen von der Rechenaufgabe möchten wir Sie bitten, Ihre Störimpfindung zu beurteilen, die durch die blendende Lichtquelle hervorgerufen wird. In anderen Worten, bitte beurteilen Sie, wie sehr Sie die Lichtquelle beim Lesen/Durchführen der Rechenaufgaben stört. Die Blendungsbeurteilung wird nach Verschwinden der Rechenaufgabe folgendermaßen abgegeben:

- A** keine Blendung wahrnehmbar
- B** Blendung zwischen nicht wahrnehmbar und merkbar
- C** Blendung merkbar
- D** Blendung zwischen merkbar und störend
- E** Blendung störend
- F** Blendung zwischen störend und unerträglich
- G** Blendung unerträglich

Geben Sie die Blendungsbewertung bitte als Buchstabe A bis G ab.

Wenn Sie das Gefühl haben, eine Lichtsituation schon einmal beurteilt zu haben, so versuchen Sie bitte nicht, sich an das alte Urteil zu erinnern, sondern urteilen Sie wieder spontan nach Ihrem aktuellen Störimpfinden. Dieser Test umfasst insgesamt 71 Lichtsituationen. Alle Lichtsituationen sind ungefährlich für Ihre Augen, auch wenn Sie einmal in die Blendquelle schauen sollten.

### **Wie Sie urteilen**

Ihr Kopf liegt auf der Kinnstütze auf und Sie schauen möglichst entspannt auf den Monitor. Wenn der erste Piepton ertönt, erscheint die Rechenaufgabe für 15 s. Beim nächsten Piepton verschwindet die Aufgabe und Sie sind gebeten, das Endergebnis der Rechenaufgabe zu nennen und etwa gleichzeitig ein Urteil über das Blendempfinden abzugeben.

Zum Beispiel: **6 C** (Rechenergebnis 6, Blendung merkbar)

Bitte schauen Sie nicht höher und auf keinen Fall in die Lichtquelle. Sollte dies doch einmal passieren, so teilen Sie es bitte dem Versuchsleiter mit. Urteilen Sie spontan ohne lang zu überlegen ihrem Eindruck entsprechend. Es gibt keine falschen Urteile.

Während des Versuchs läuft ein Eye-Tracking-Gerät mit, welches Ihre Blickbewegungen aufzeichnet und somit Rückschlüsse auf ihr Blickverhalten bei verschiedenen Lichtsituationen erlaubt. Es werden keine Videos aufgezeichnet sondern nur die Blickkoordinaten. Vor Beginn der eigentlichen Untersuchung wird das Gerät eingerichtet und ein kurzer Probedurchlauf durchgeführt.

Falls Sie Fragen haben, können Sie diese jetzt oder während des Versuchs stellen.

### A.3 Diagramme zum Einfluss des LED-Abstands innerhalb der Blendquelle

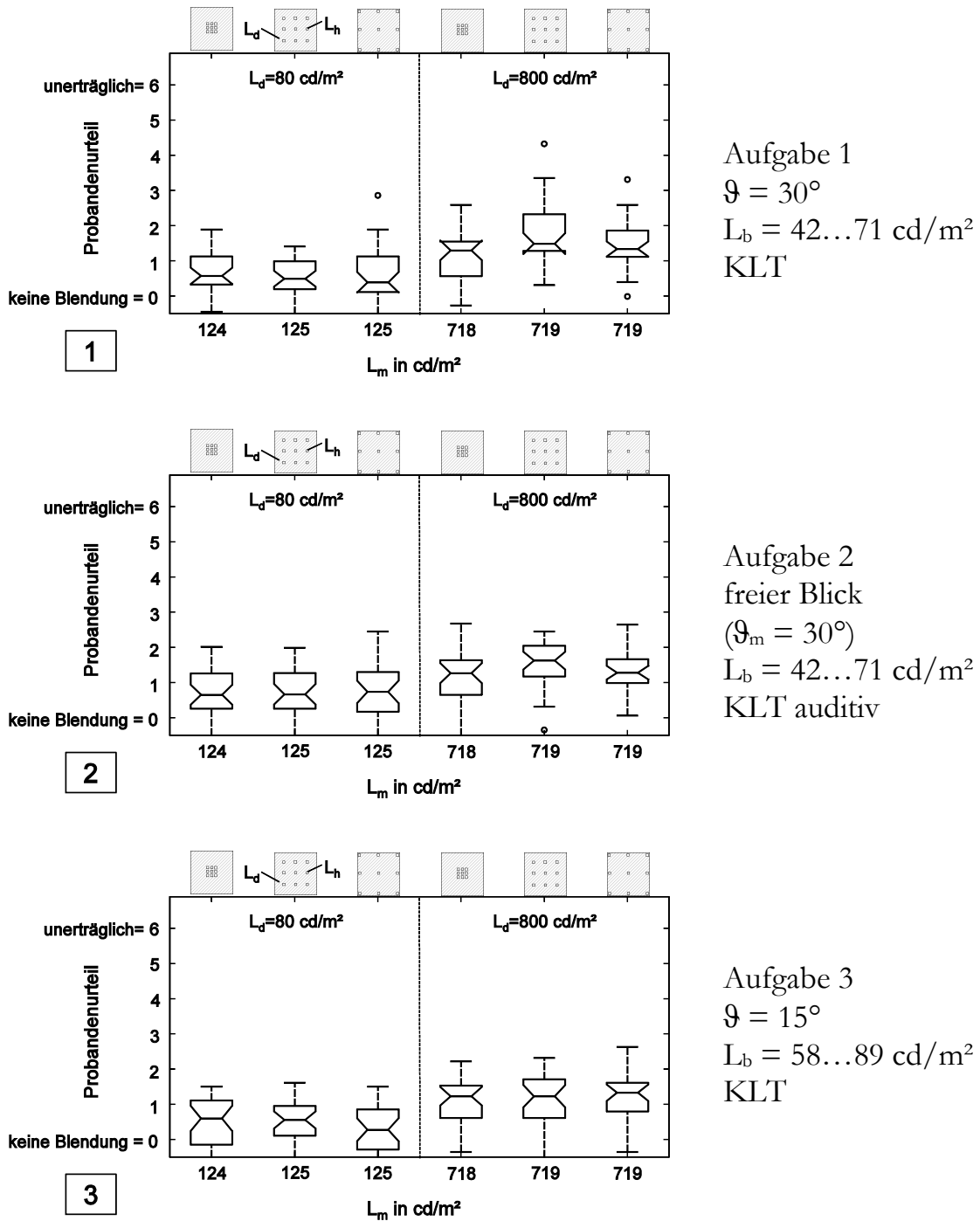
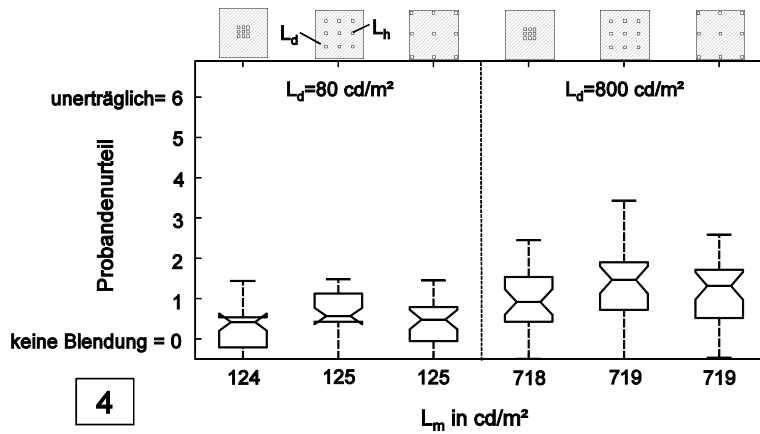
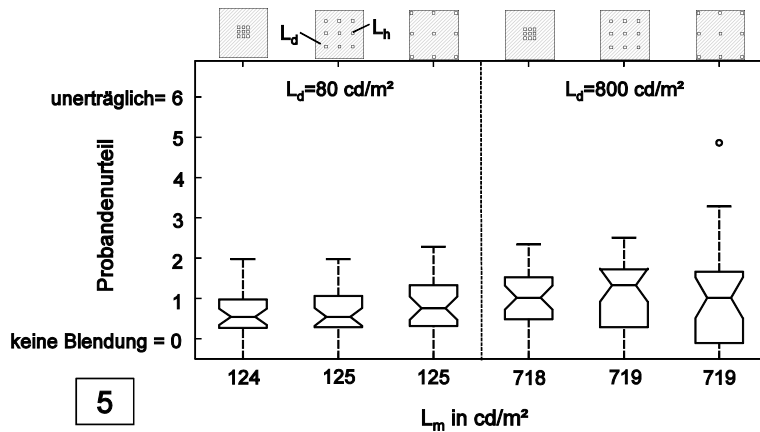


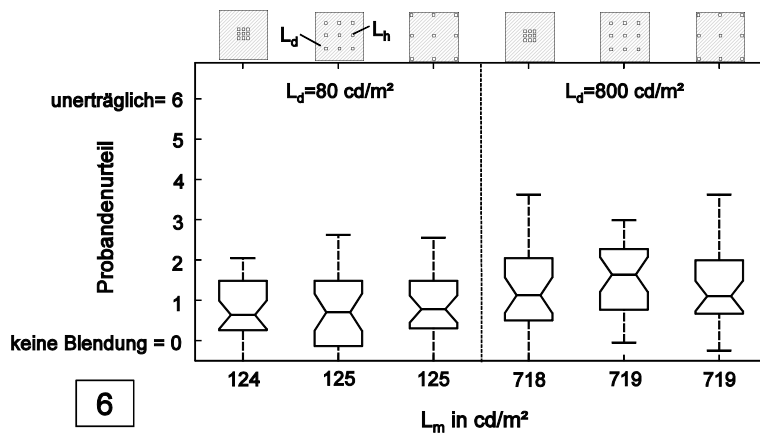
Abb. A.1 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1-3,  $L_h = 8000 \text{ cd/m}^2$ )



Aufgabe 4  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 Punkt fixieren

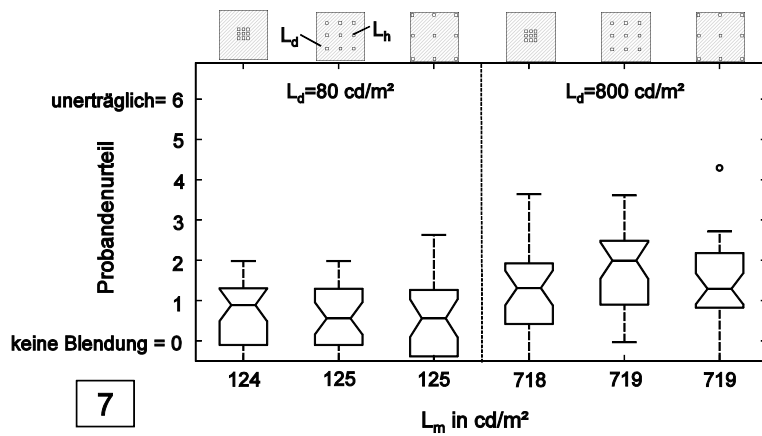


Aufgabe 5  
 $\vartheta = 0^\circ$   
 $L_b = 57 \dots 94 \text{ cd/m}^2$   
 kurzer Blick in  
 Leuchte

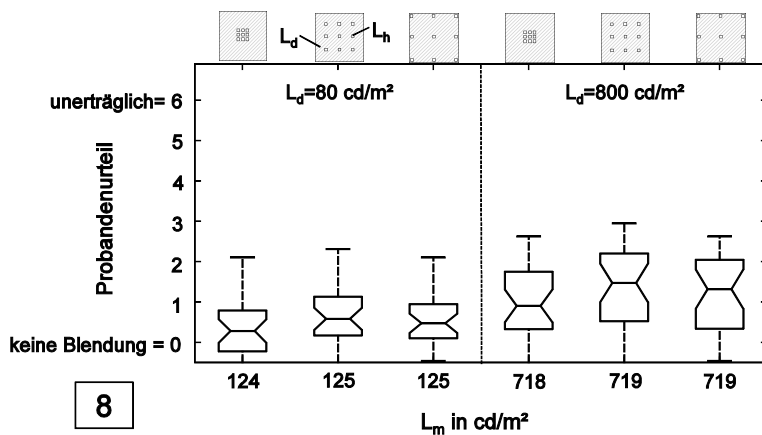


Aufgabe 6  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42 \dots 44 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

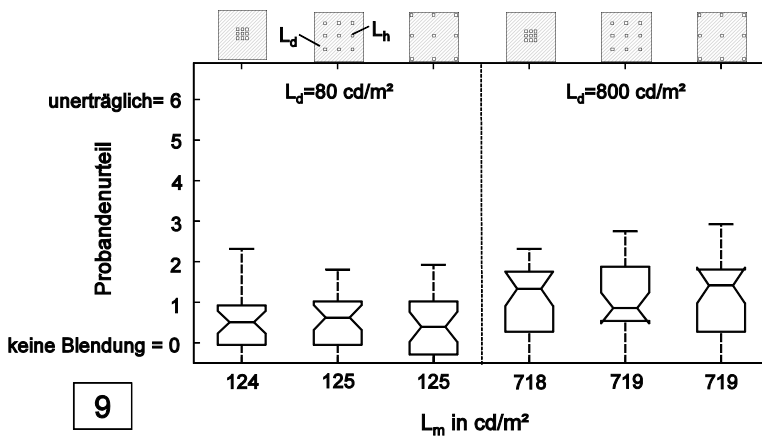
Abb. A.2 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 4-6,  $L_h = 8000 \text{ cd/m}^2$ )



Aufgabe 7  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 172 \dots$   
 $\dots 190 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

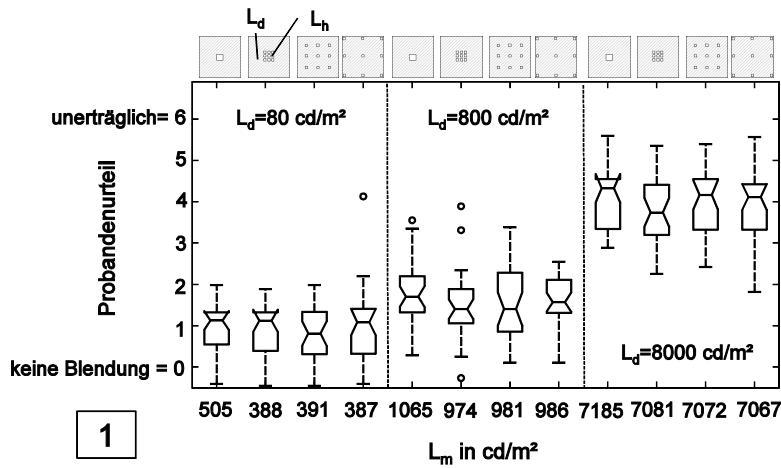


Aufgabe 8  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 56 \dots 62 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv



Aufgabe 9  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 161 \dots$   
 $\dots 183 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A.3 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 7-9,  $L_h = 8000 \text{ cd/m}^2$ )

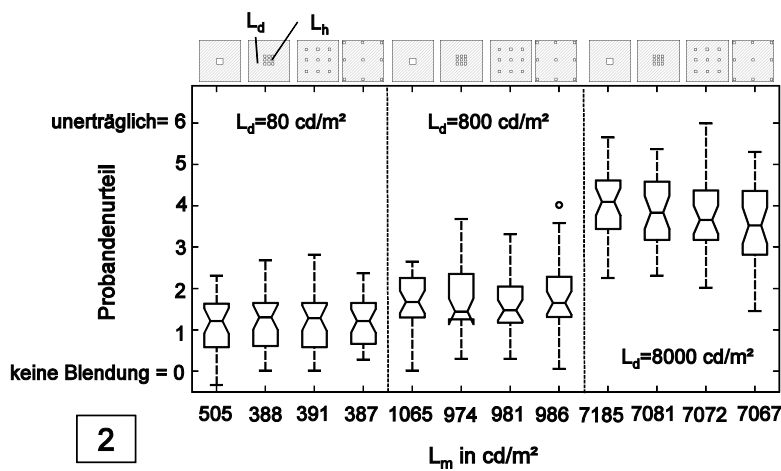


Aufgabe 1

$\vartheta = 30^\circ$

$L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$

KLT



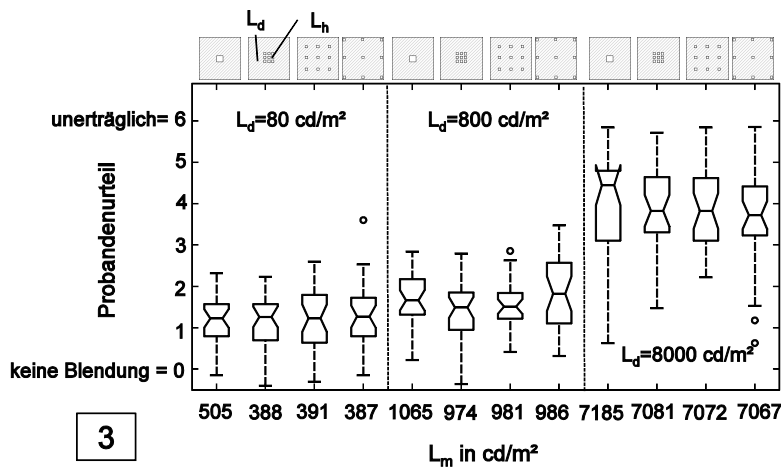
Aufgabe 2

freier Blick

( $\vartheta_m = 30^\circ$ )

$L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$

KLT auditiv



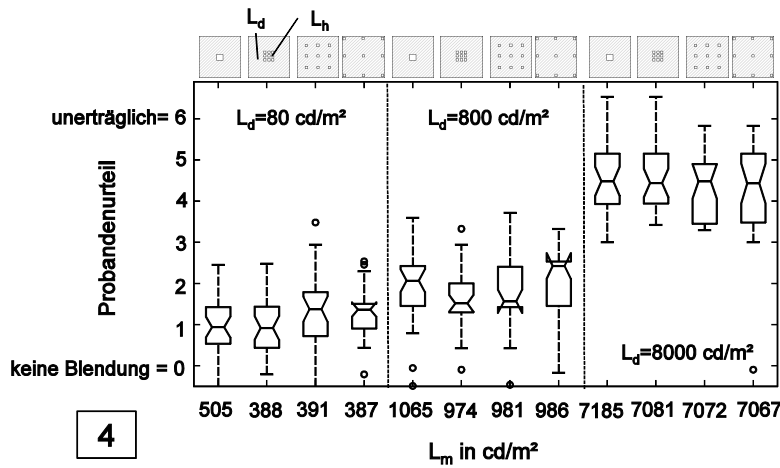
Aufgabe 3

$\vartheta = 15^\circ$

$L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$

KLT

Abb. A.4 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1-3,  $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ )

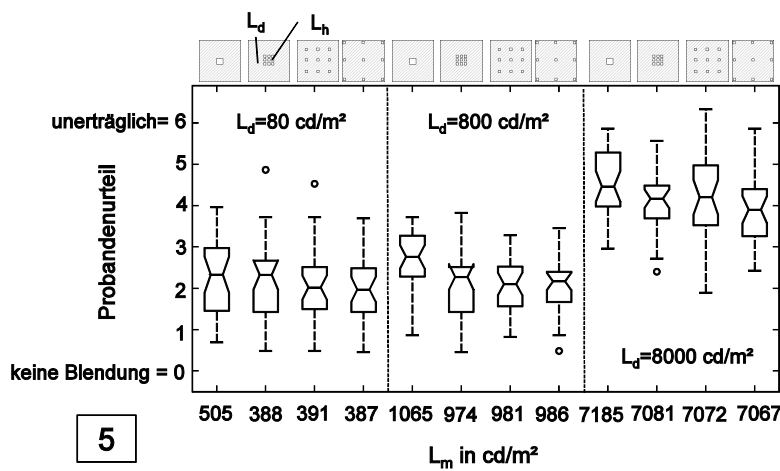


Aufgabe 4

$\vartheta = 15^\circ$

$L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$

Punkt fixieren



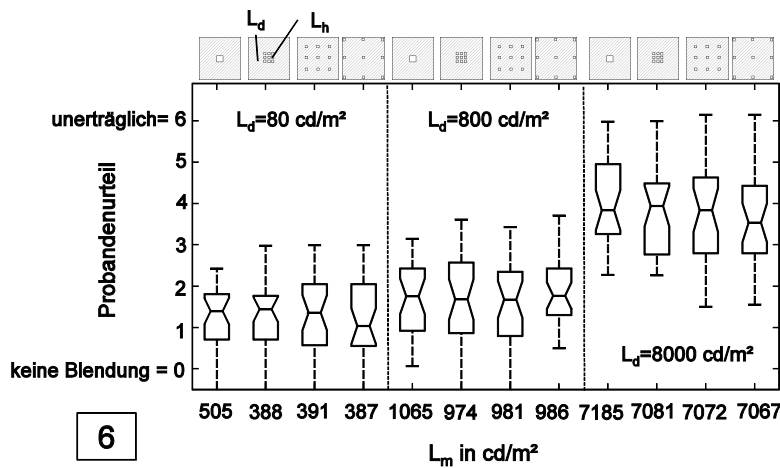
Aufgabe 5

$\vartheta = 0^\circ$

$L_b = 57 \dots 94 \text{ cd/m}^2$

kurzer Blick in

Leuchte



Aufgabe 6

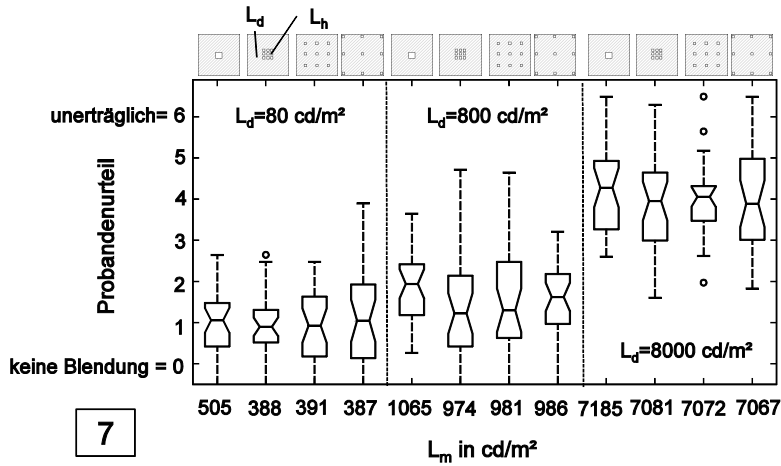
$\vartheta = 30^\circ$

$L_b = 42 \dots 44 \text{ cd/m}^2$

KLT

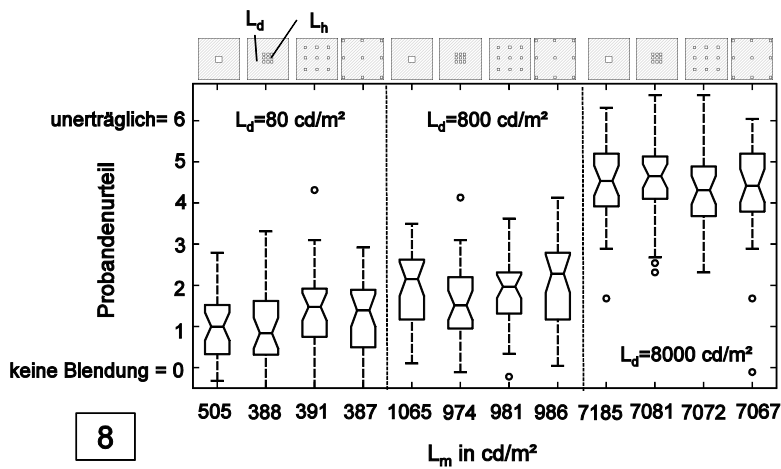
Abb. A.5 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 4-6,  $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ )





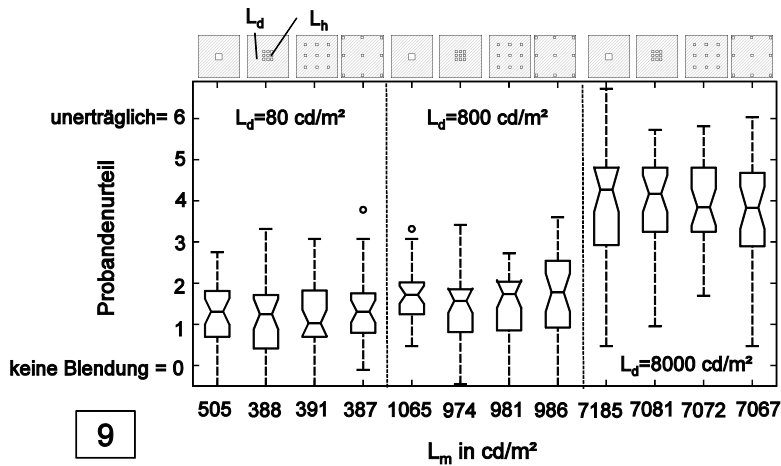
7

Aufgabe 7  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 172 \dots$   
 $\dots 190 \text{ cd/m}^2$   
 KLT



8

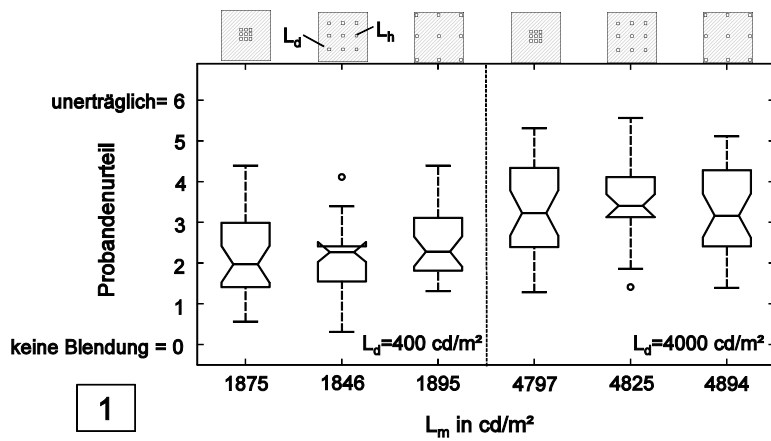
Aufgabe 8  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 56 \dots 62 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv



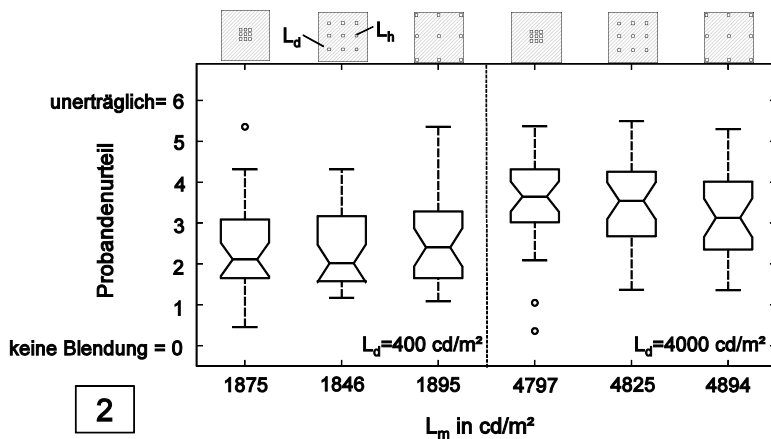
9

Aufgabe 9  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 161 \dots$   
 $\dots 183 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

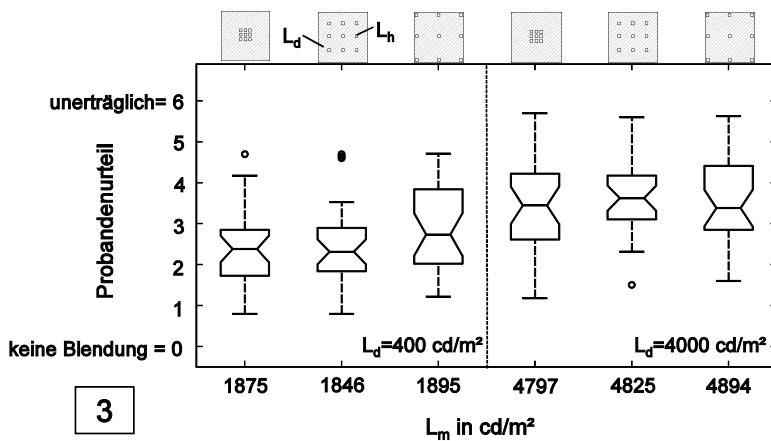
Abb. A.6 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 7-9,  $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ )



Aufgabe 1  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

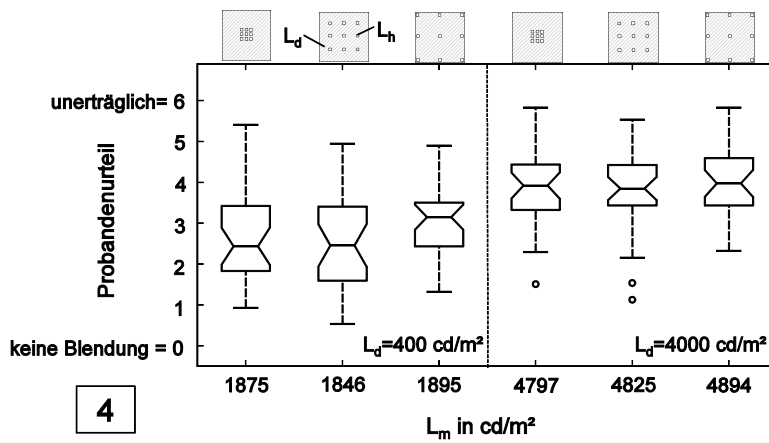


Aufgabe 2  
 freier Blick  
 $(\vartheta_m = 30^\circ)$   
 $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv

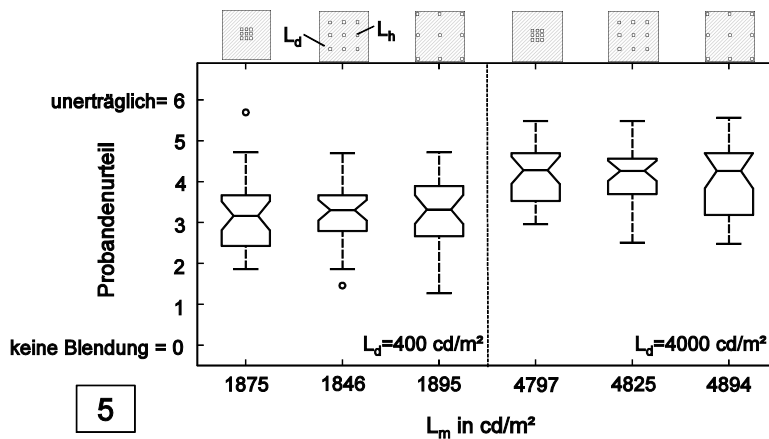


Aufgabe 3  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

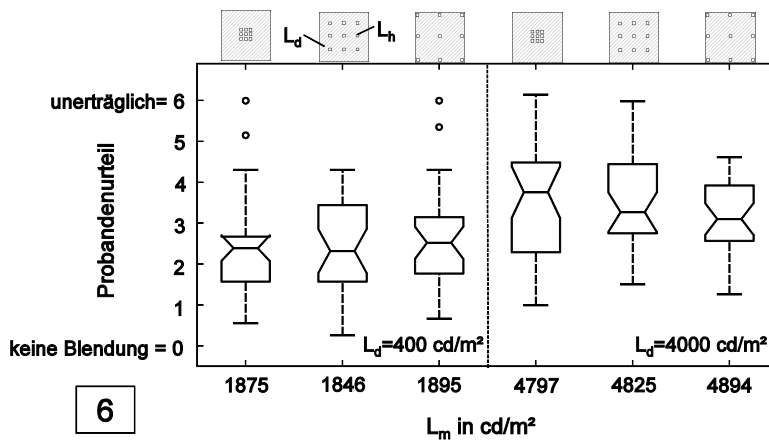
Abb. A.7 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1-3,  $L_h = 400000 \text{ cd/m}^2$ )



Aufgabe 4  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 Punkt fixieren

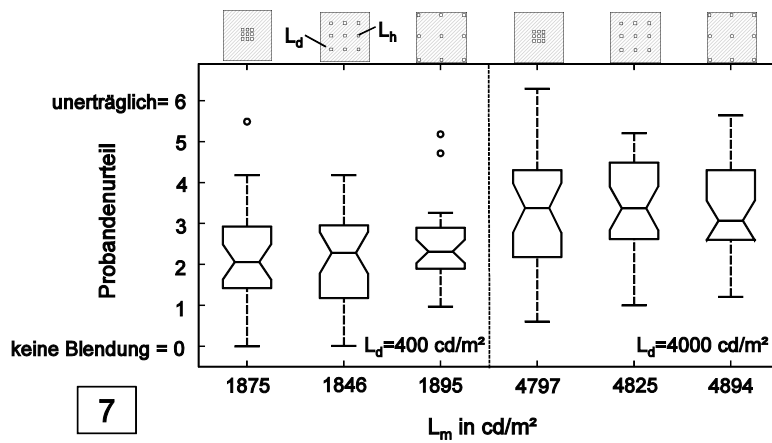


Aufgabe 5  
 $\vartheta = 0^\circ$   
 $L_b = 57 \dots 94 \text{ cd/m}^2$   
 kurzer Blick in  
 Leuchte

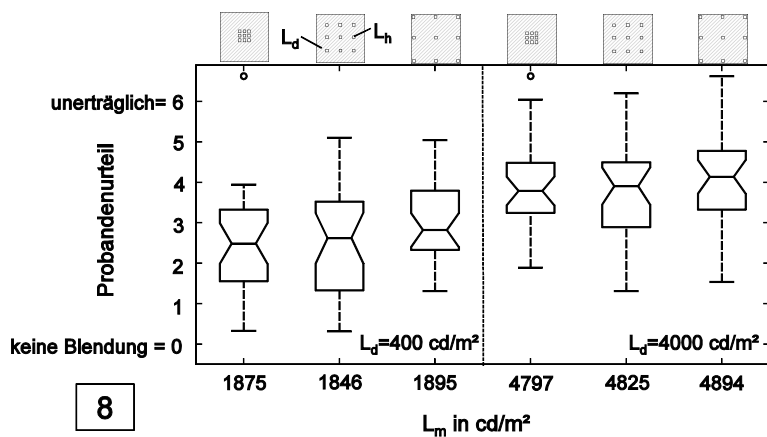


Aufgabe 6  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42 \dots 44 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

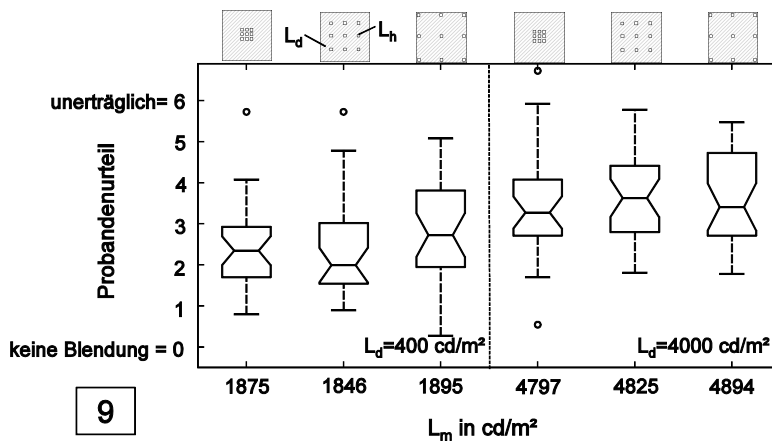
Abb. A.8 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 4-6,  $L_h = 400000 \text{ cd/m}^2$ )



Aufgabe 7  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 172 \dots$   
 $\dots 190 \text{ cd/m}^2$   
 KLT



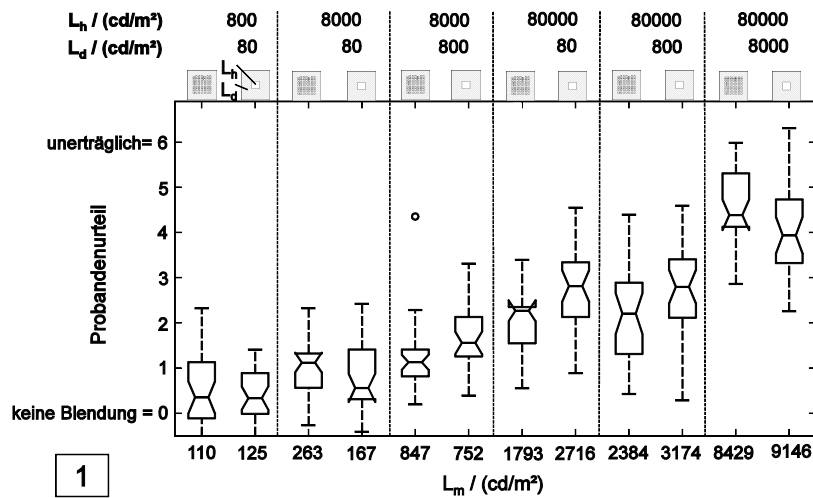
Aufgabe 8  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 56 \dots 62 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv



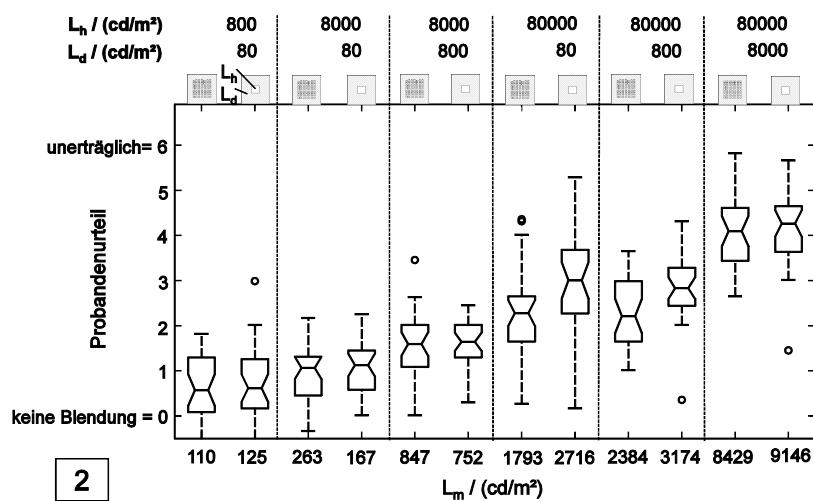
Aufgabe 9  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 161 \dots$   
 $\dots 183 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A.9 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und verschiedenen Blendquellenabständen innerhalb der Leuchte (Aufgabe 7-9,  $L_h = 400000 \text{ cd/m}^2$ )

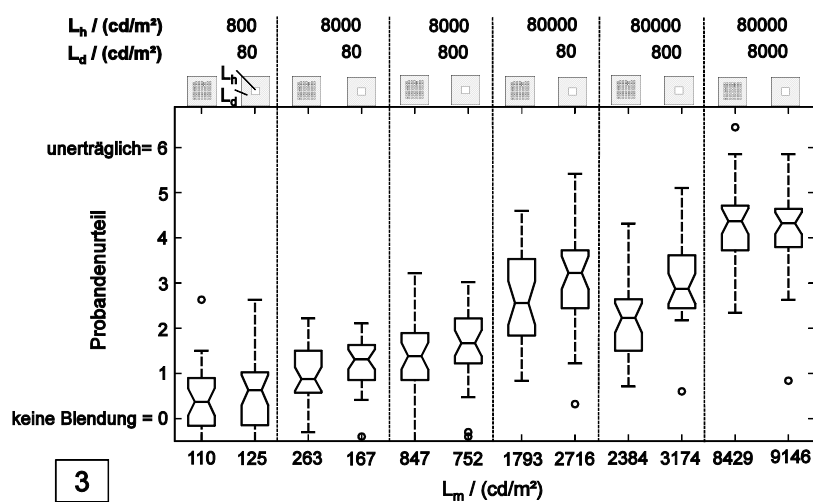
## A.4 Diagramme zur Additivität von LED-Punkten



Aufgabe 1  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42\dots$   
 $\dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

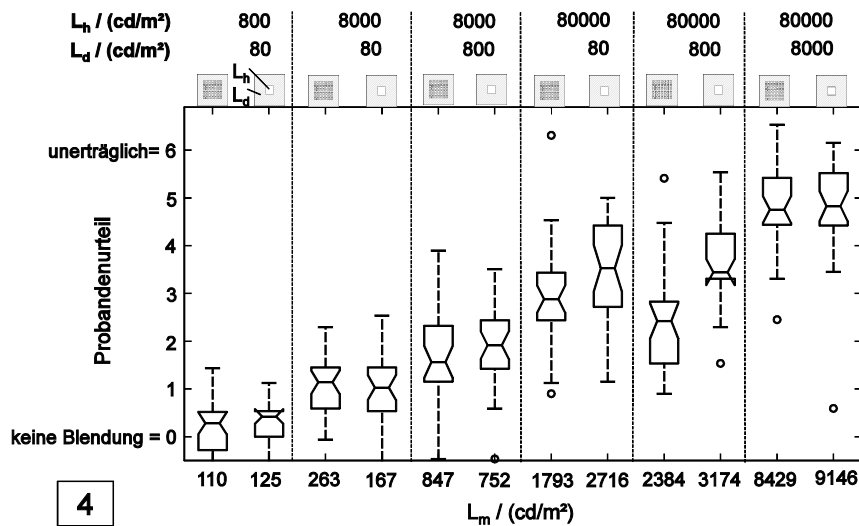


Aufgabe 2  
 freier Blick  
 $(\vartheta_m = 30^\circ)$   
 $L_b = 42\dots$   
 $\dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv



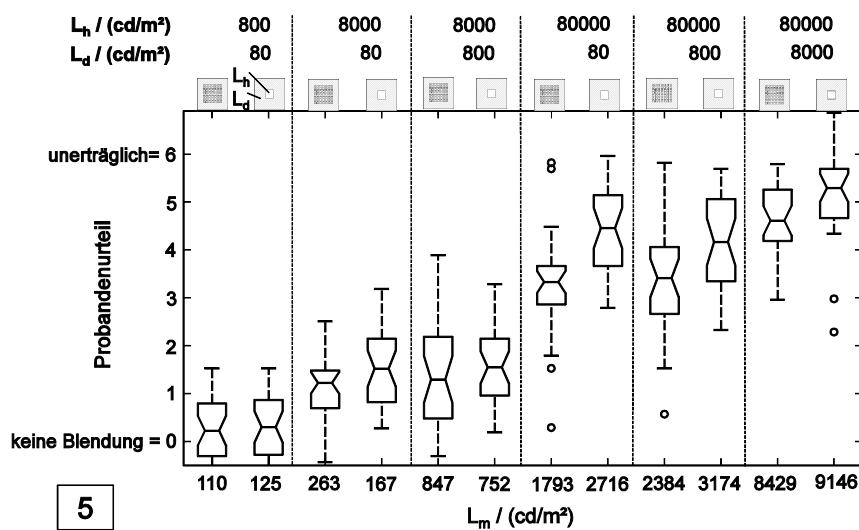
Aufgabe 3  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58\dots$   
 $\dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A.10 Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 3 und 7 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1-3)



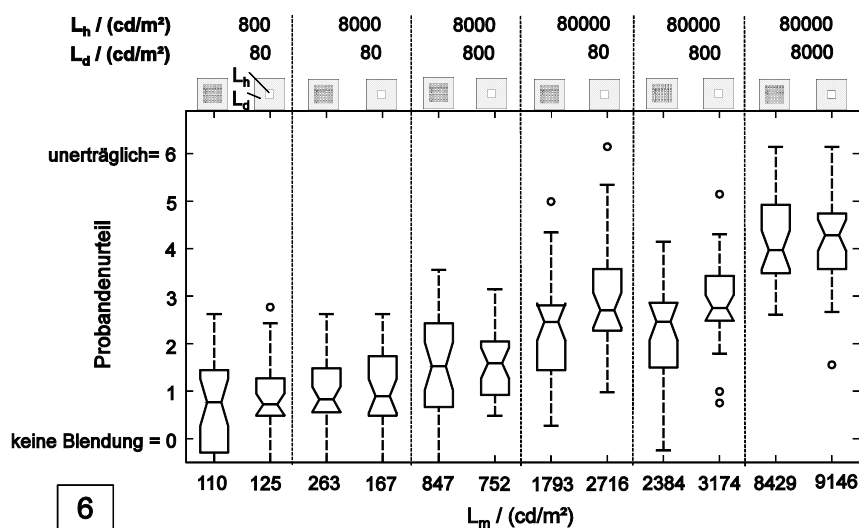
4

Aufgabe 4  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58 \dots$   
 $\dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 Punkt fixieren



5

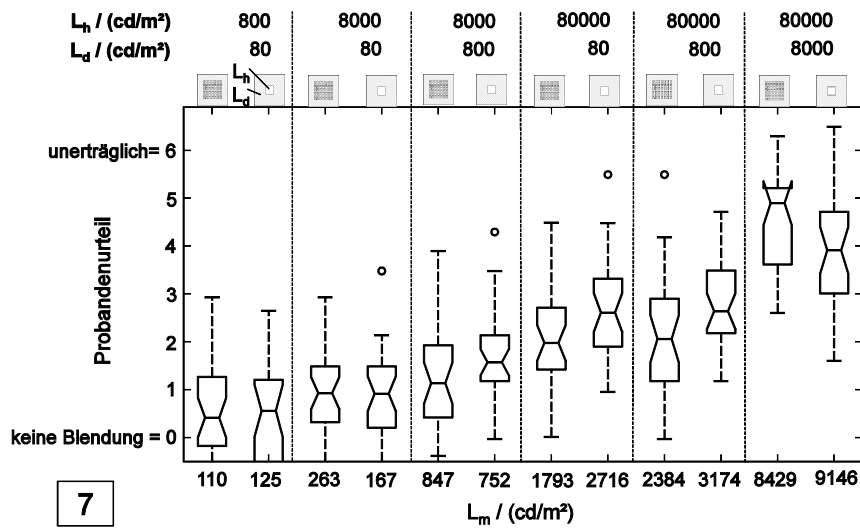
Aufgabe 5  
 $\vartheta = 0^\circ$   
 $L_b = 57 \dots$   
 $\dots 94 \text{ cd/m}^2$   
 kurzer Blick in  
 Leuchte



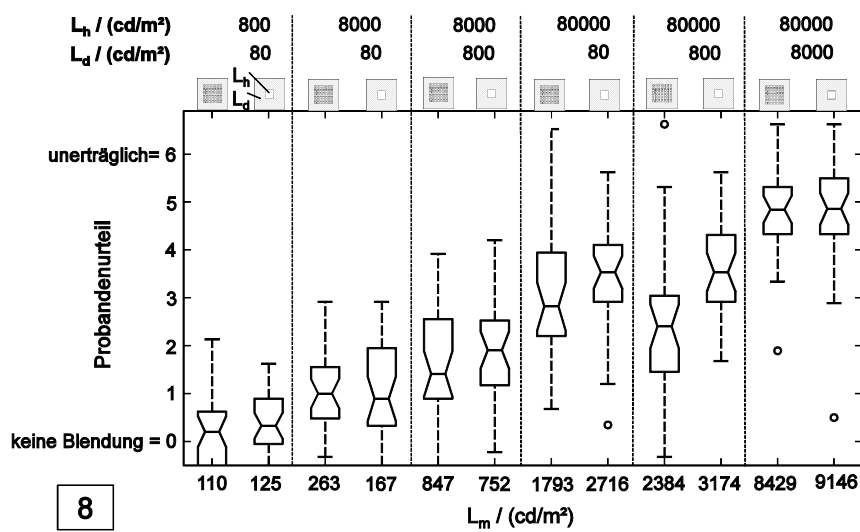
6

Aufgabe 6  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42 \dots$   
 $\dots 44 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

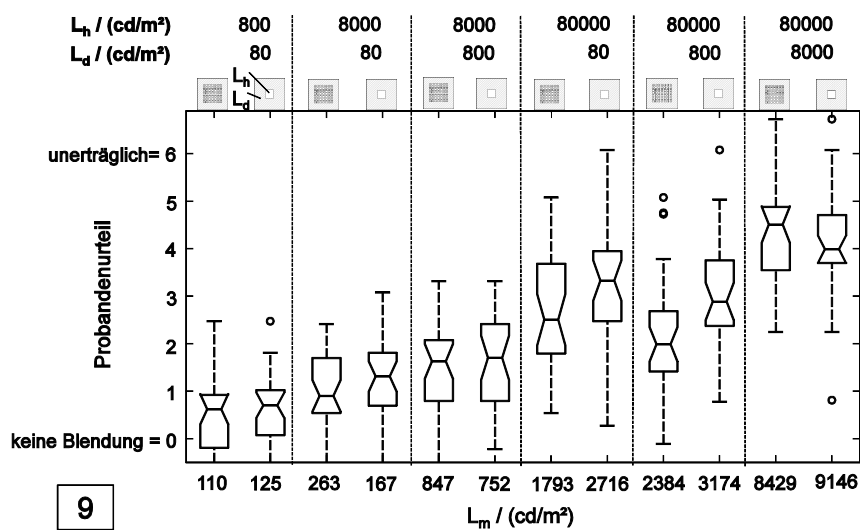
Abb. A.11 Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 3 und 7 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 4-6)



Aufgabe 7  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 172\dots$   
 $\dots 190 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

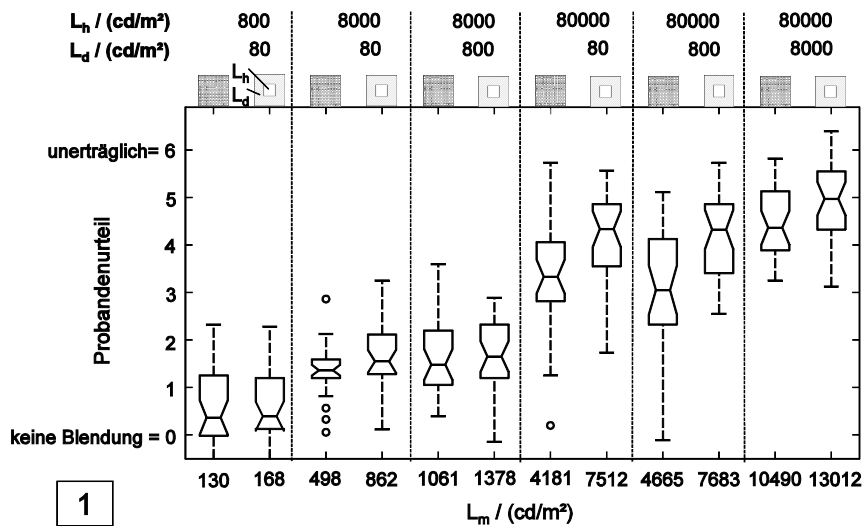


Aufgabe 8  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 56\dots$   
 $\dots 62 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv

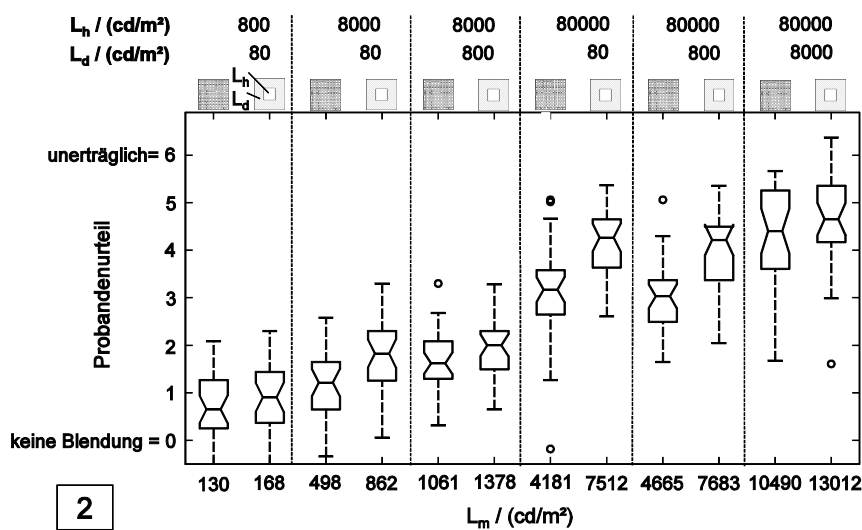


Aufgabe 9  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 161\dots$   
 $\dots 183 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

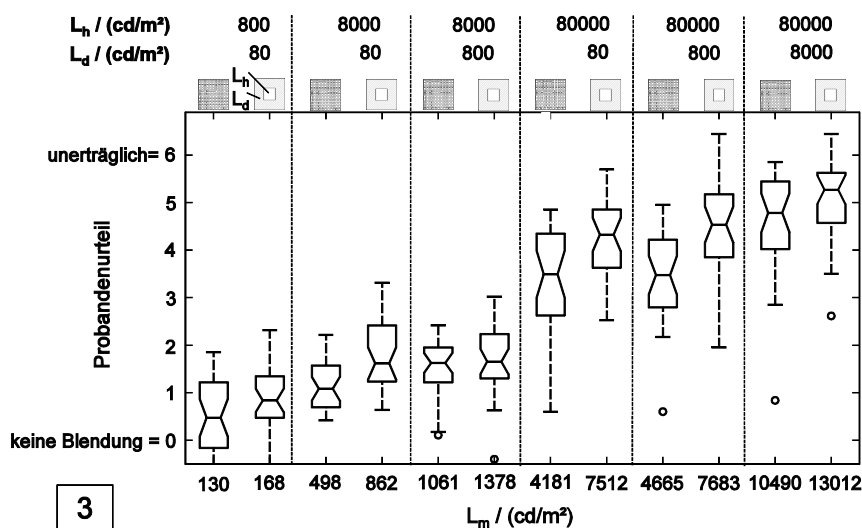
Abb. A.12 Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 3 und 7 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 7-9)



Aufgabe 1  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42\dots$   
 $\dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT



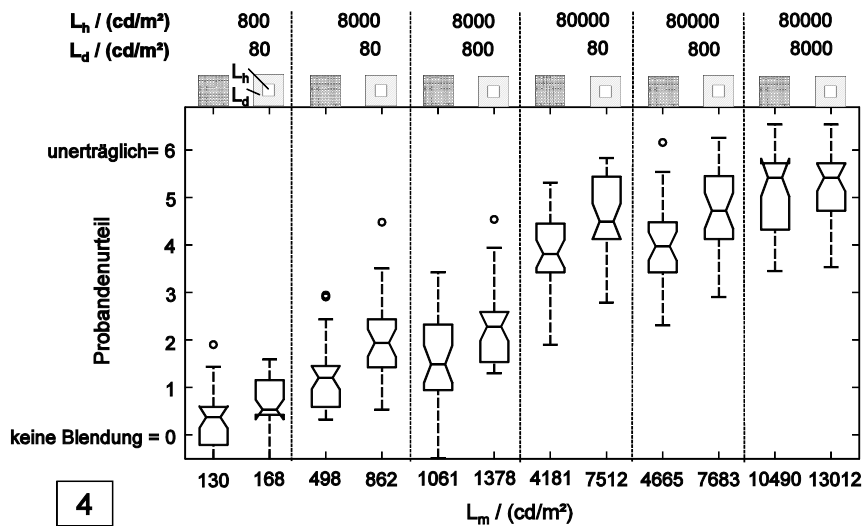
Aufgabe 2  
 freier Blick  
 $(\vartheta_m = 30^\circ)$   
 $L_b = 42\dots$   
 $\dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv



Aufgabe 3  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58\dots$   
 $\dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

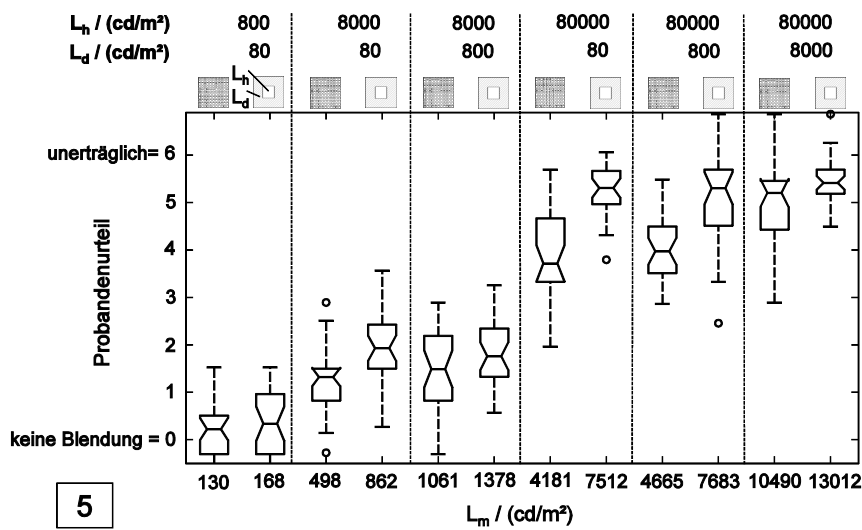
Abb. A.13 Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 4 und 8 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1-3)





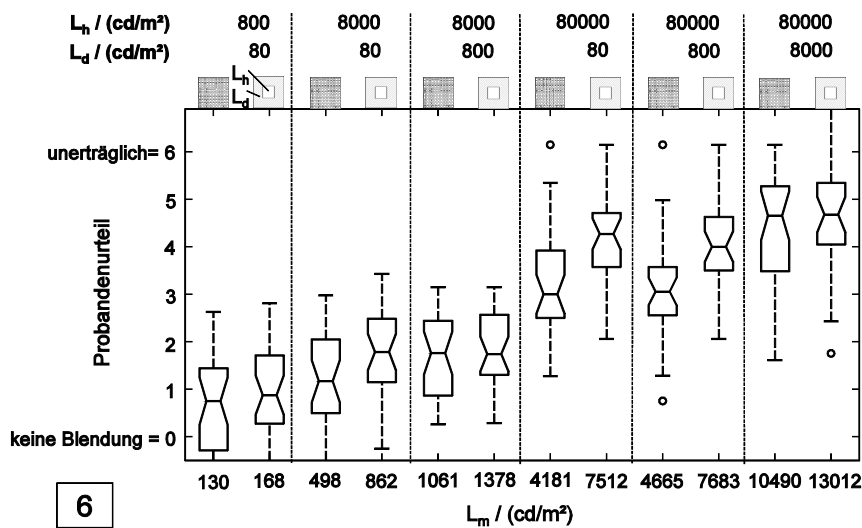
4

Aufgabe 4  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58 \dots$   
 $\dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 Punkt fixieren



5

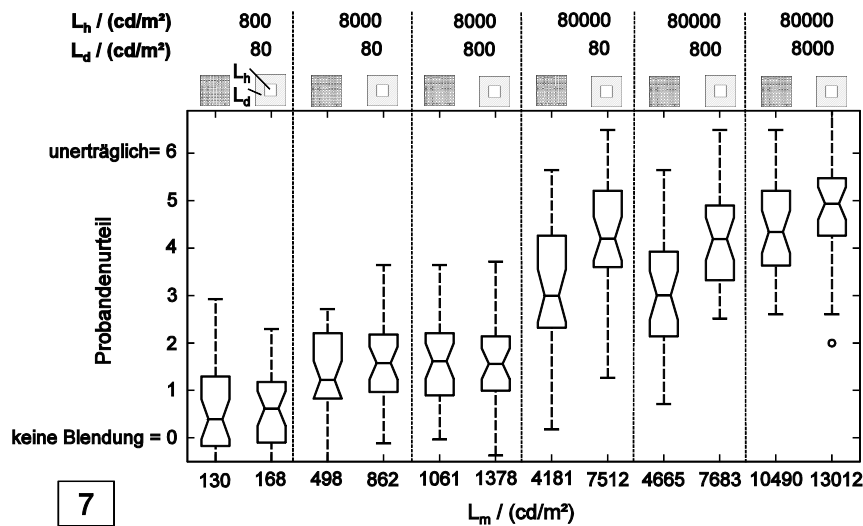
Aufgabe 5  
 $\vartheta = 0^\circ$   
 $L_b = 57 \dots$   
 $\dots 94 \text{ cd/m}^2$   
 kurzer Blick in  
 Leuchte



6

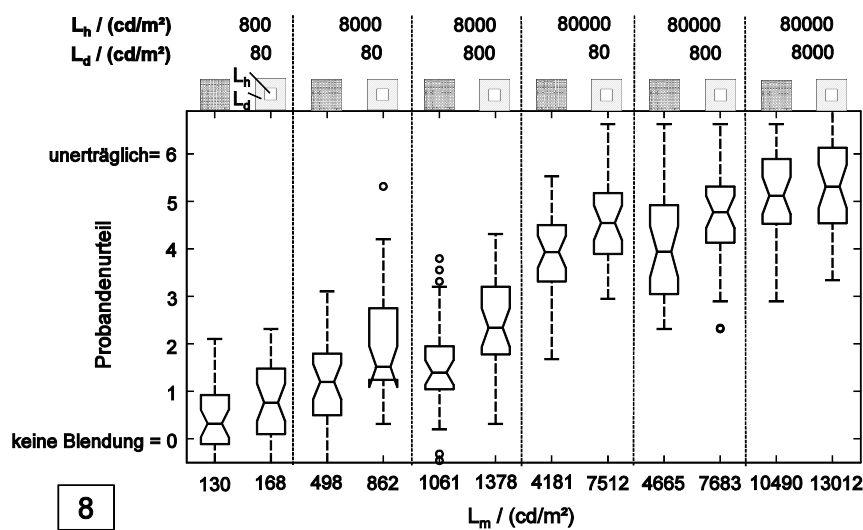
Aufgabe 6  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42 \dots$   
 $\dots 44 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A.14 Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 4 und 8 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 4-6)



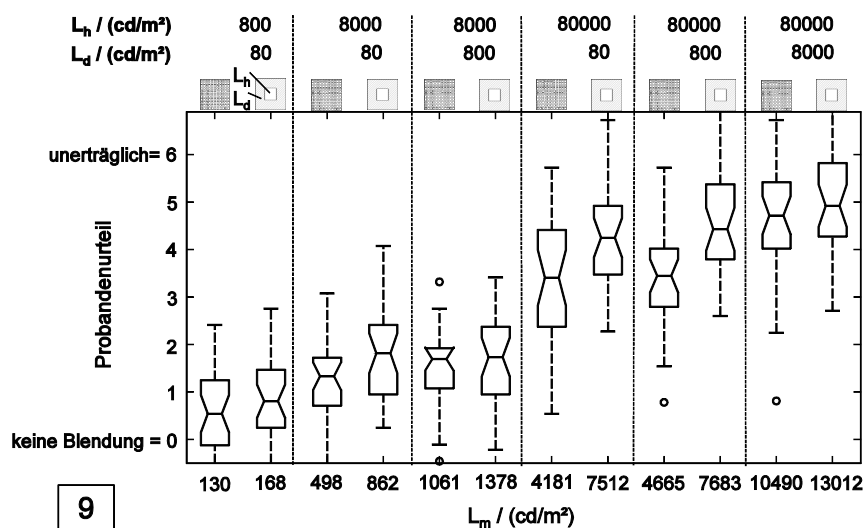
7

Aufgabe 7  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 172\dots$   
 $\dots 190 \text{ cd/m}^2$   
 KLT



8

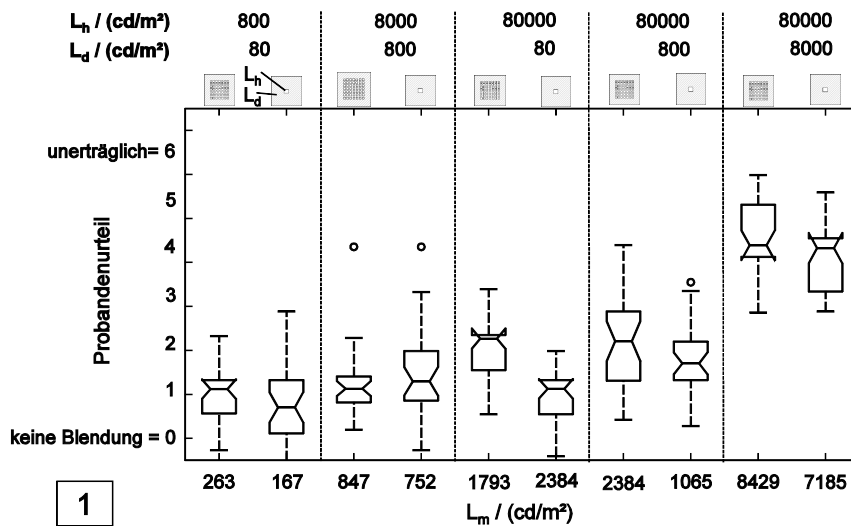
Aufgabe 8  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 56\dots$   
 $\dots 62 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv



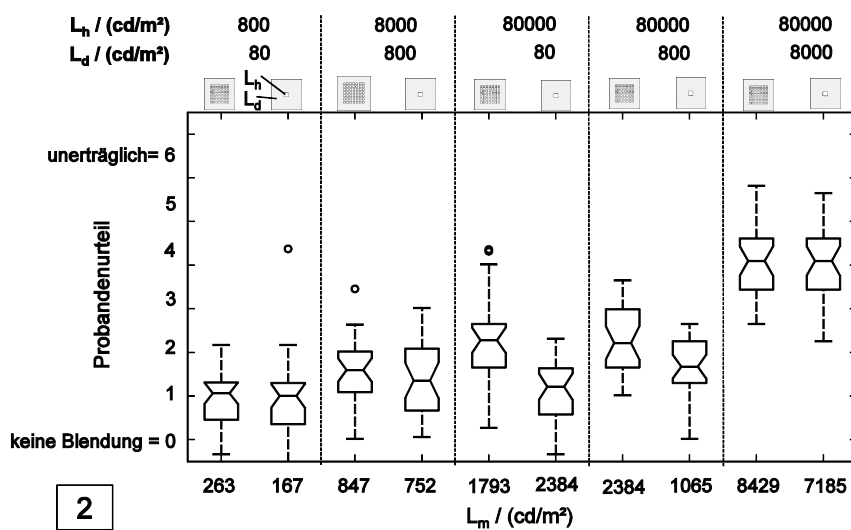
9

Aufgabe 9  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 161\dots$   
 $\dots 183 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

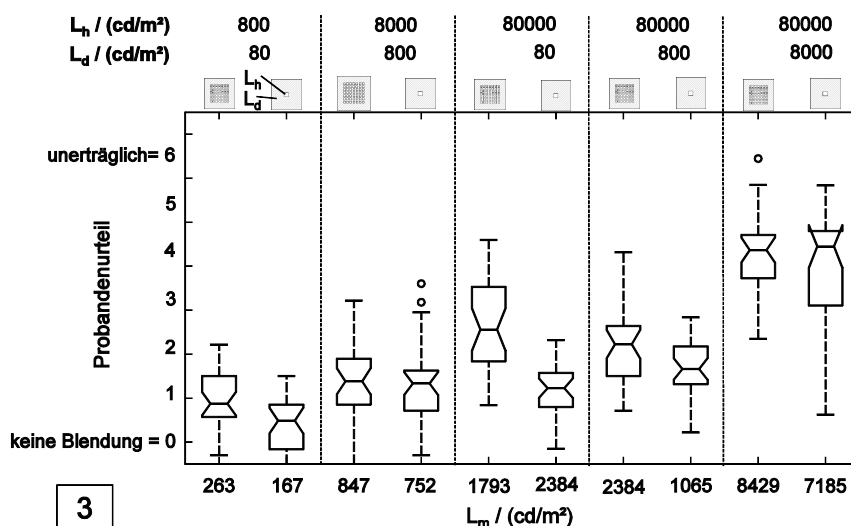
Abb. A.15 Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 4 und 8 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 7-9)



Aufgabe 1  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42\dots$   
 $\dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

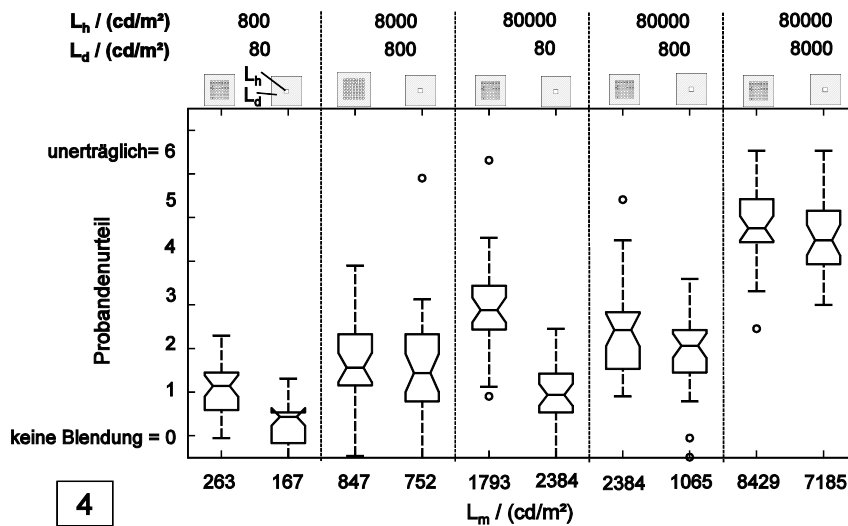


Aufgabe 2  
 freier Blick  
 $(\vartheta_m = 30^\circ)$   
 $L_b = 42\dots$   
 $\dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv



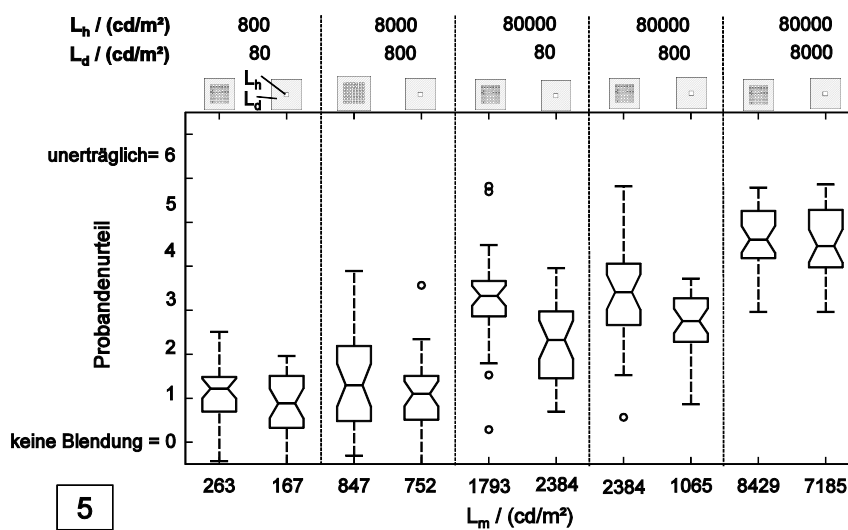
Aufgabe 3  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58\dots$   
 $\dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A16 Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 3 und 6 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1-3)



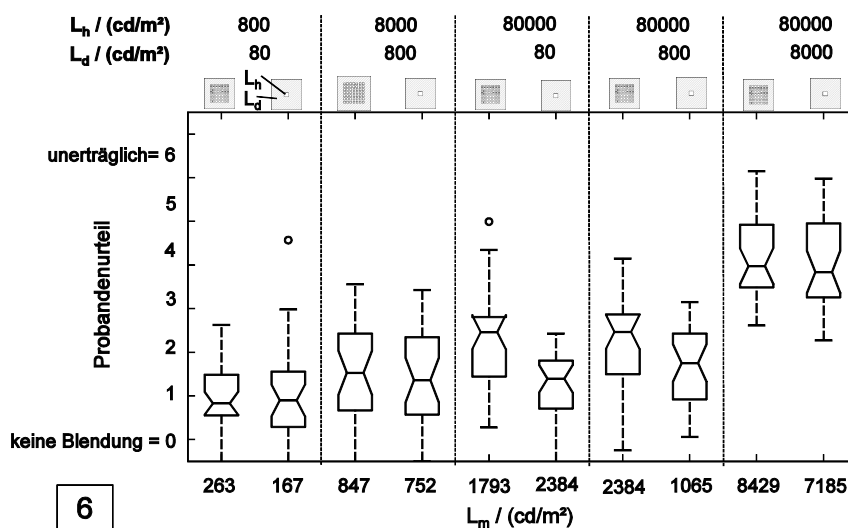
4

Aufgabe 4  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58\dots$   
 $\dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 Punkt fixieren



5

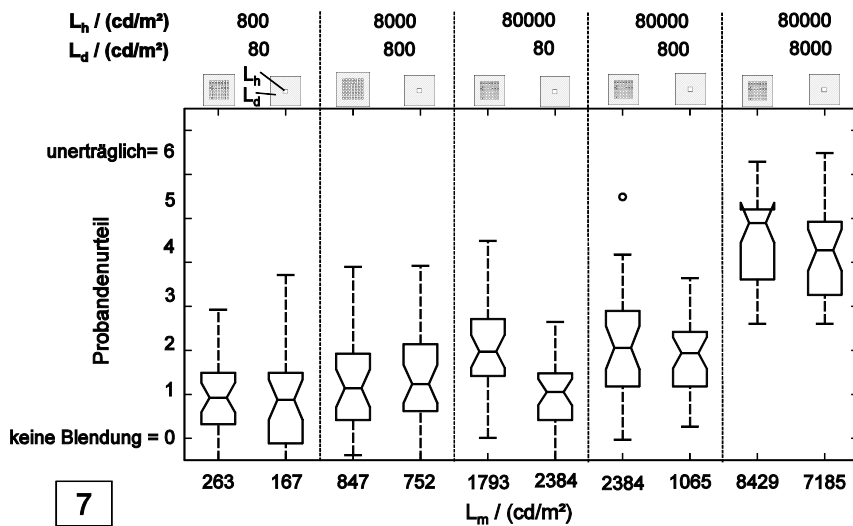
Aufgabe 5  
 $\vartheta = 0^\circ$   
 $L_b = 57\dots$   
 $\dots 94 \text{ cd/m}^2$   
 kurzer Blick in  
 Leuchte



6

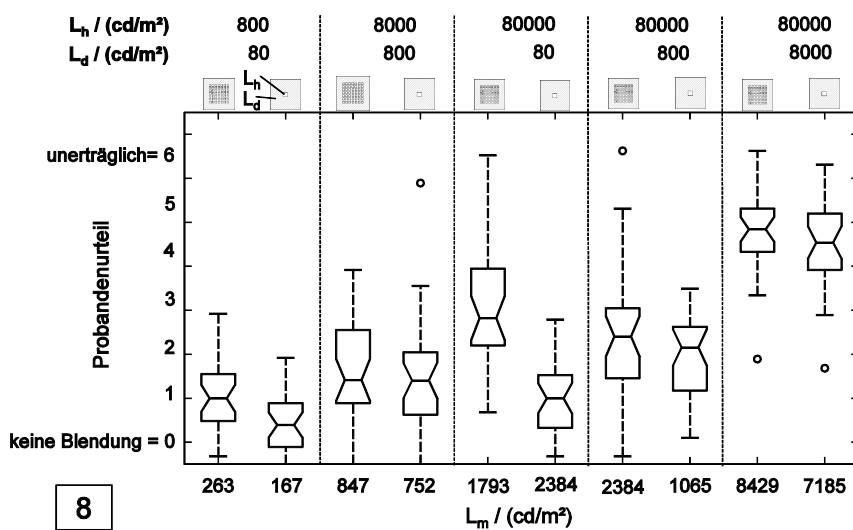
Aufgabe 6  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42\dots$   
 $\dots 44 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A.17 Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 3 und 6 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 4-6)



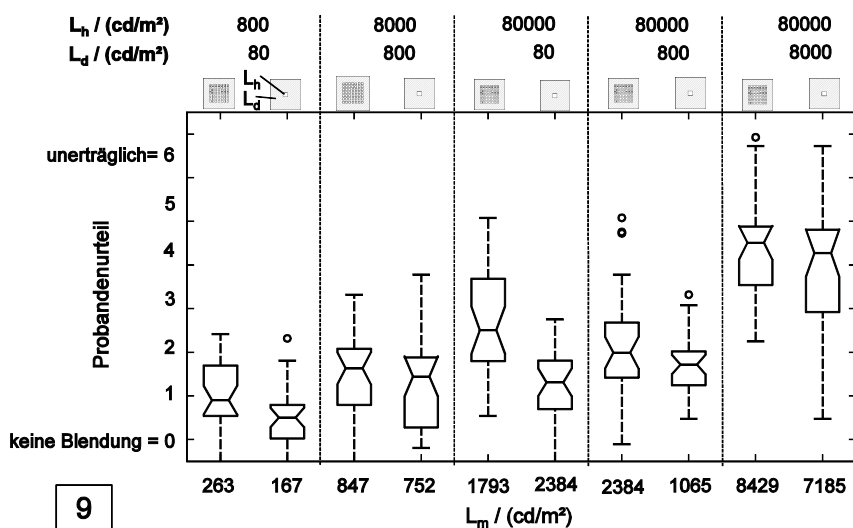
7

Aufgabe 7  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 172\dots$   
 $\dots 190 \text{ cd/m}^2$   
 KLT



8

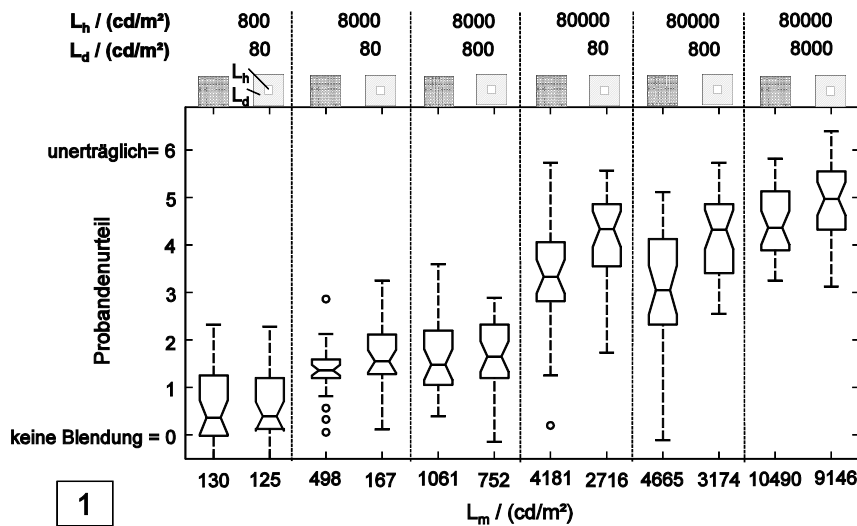
Aufgabe 8  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 56\dots$   
 $\dots 62 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv



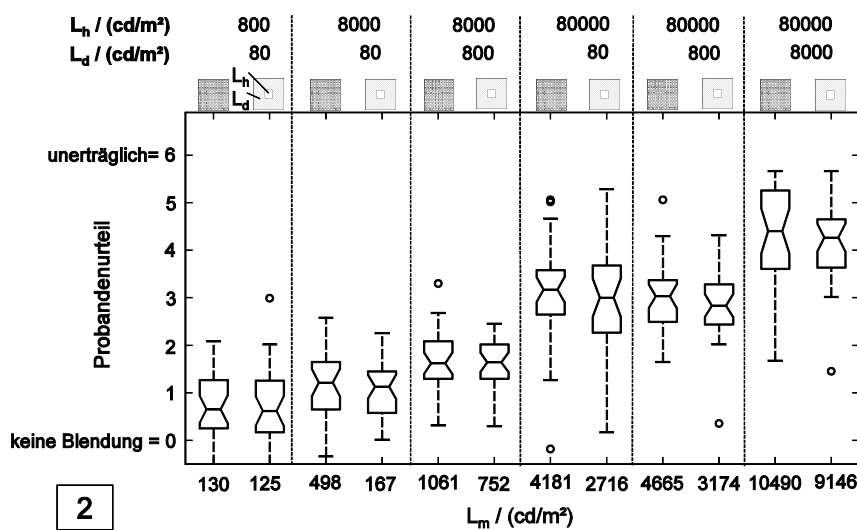
9

Aufgabe 9  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 161\dots$   
 $\dots 183 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

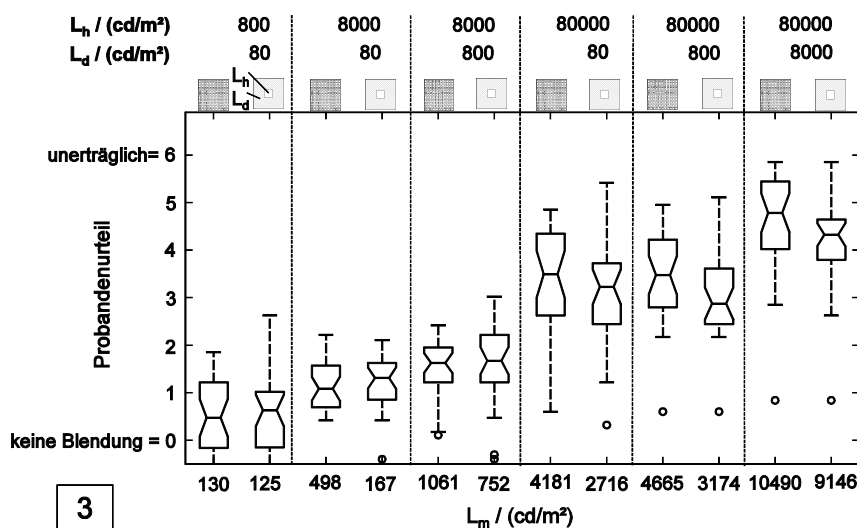
Abb. A.18 Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 3 und 6 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 7-9)



Aufgabe 1  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42\dots$   
 $\dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

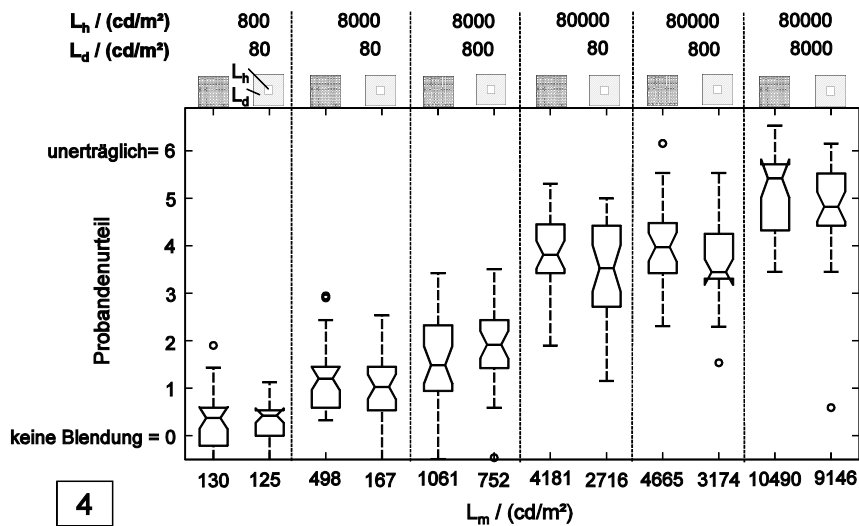


Aufgabe 2  
 freier Blick  
 $(\vartheta_m = 30^\circ)$   
 $L_b = 42\dots$   
 $\dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv

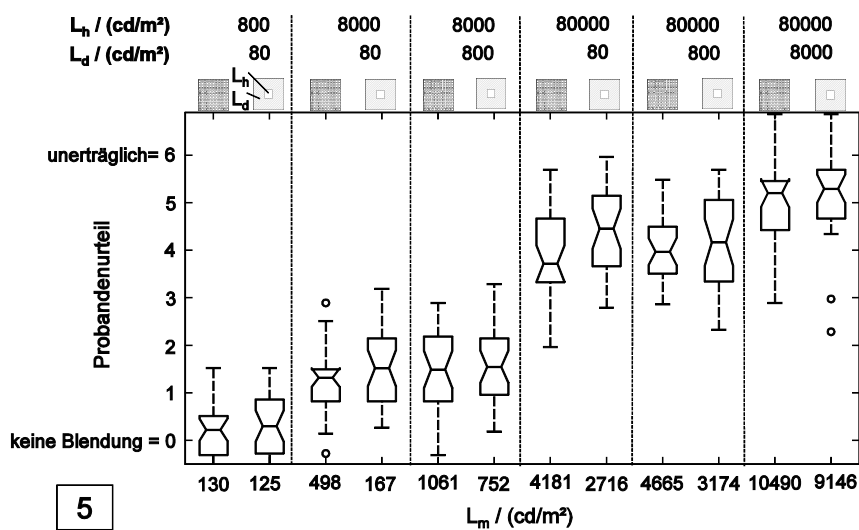


Aufgabe 3  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58\dots$   
 $\dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

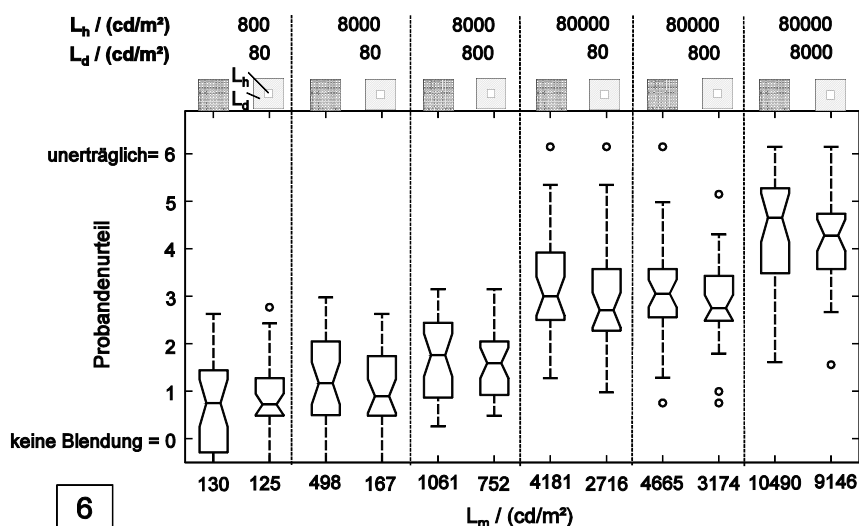
Abb. A.19 Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 4 und 7 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 1-3)



Aufgabe 4  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58\dots$   
 $\dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 Punkt fixieren

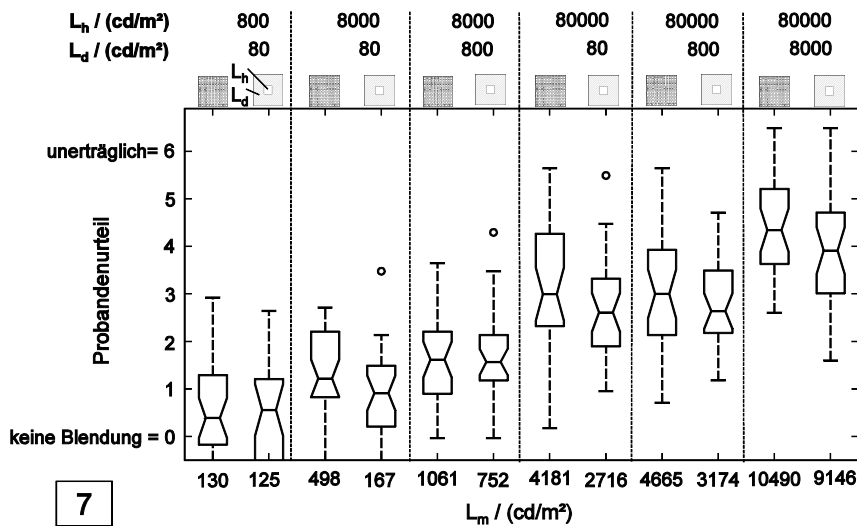


Aufgabe 5  
 $\vartheta = 0^\circ$   
 $L_b = 57\dots$   
 $\dots 94 \text{ cd/m}^2$   
 kurzer Blick in  
 Leuchte



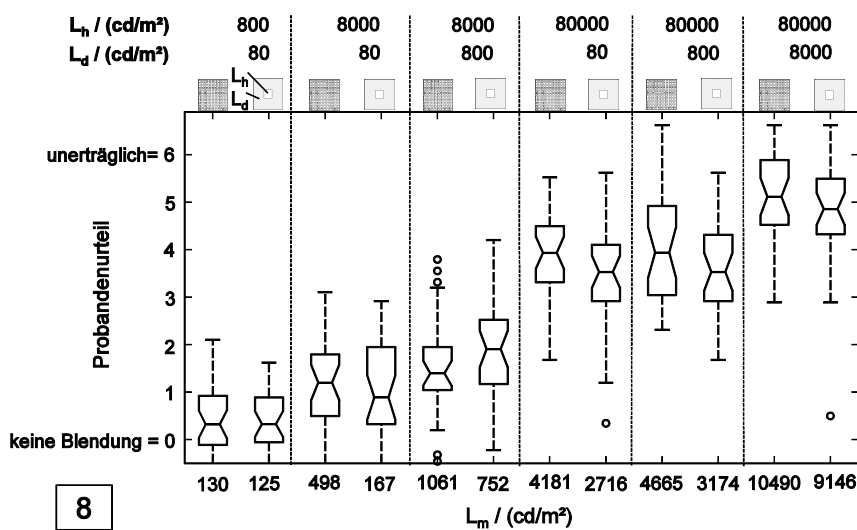
Aufgabe 6  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42\dots$   
 $\dots 44 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A.20 Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 4 und 7 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 4-6)



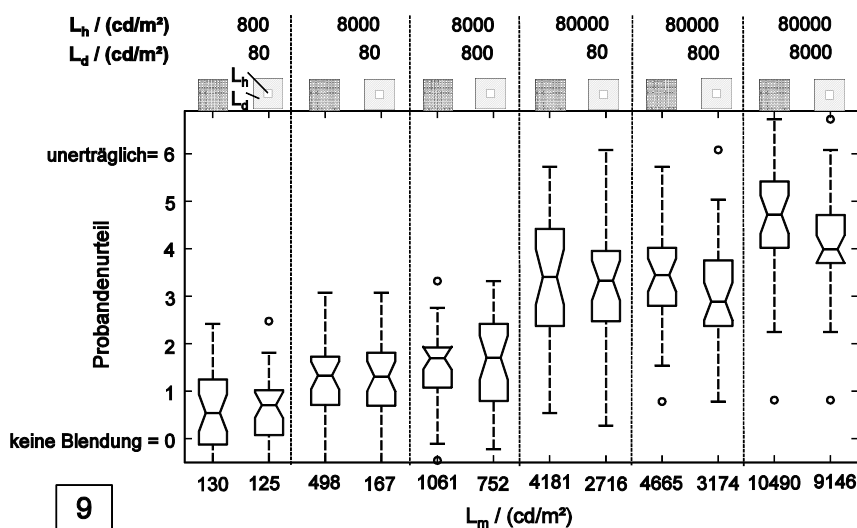
7

Aufgabe 7  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 172 \dots$   
 $\dots 190 \text{ cd/m}^2$   
 KLT



8

Aufgabe 8  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 56 \dots$   
 $\dots 62 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv



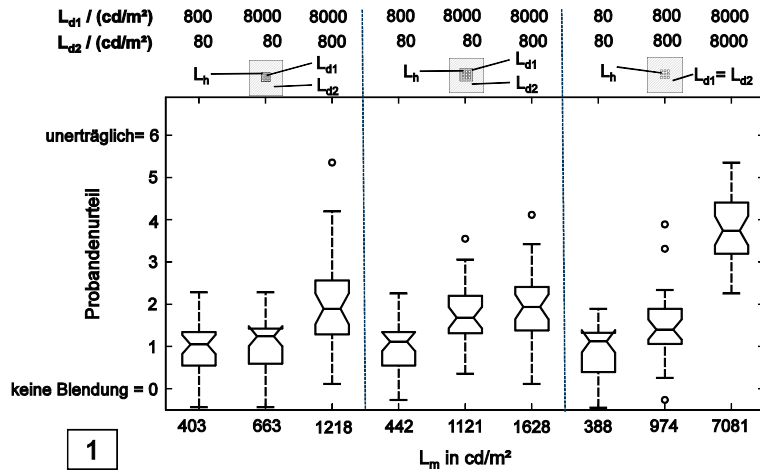
9

Aufgabe 9  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 161 \dots$   
 $\dots 183 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

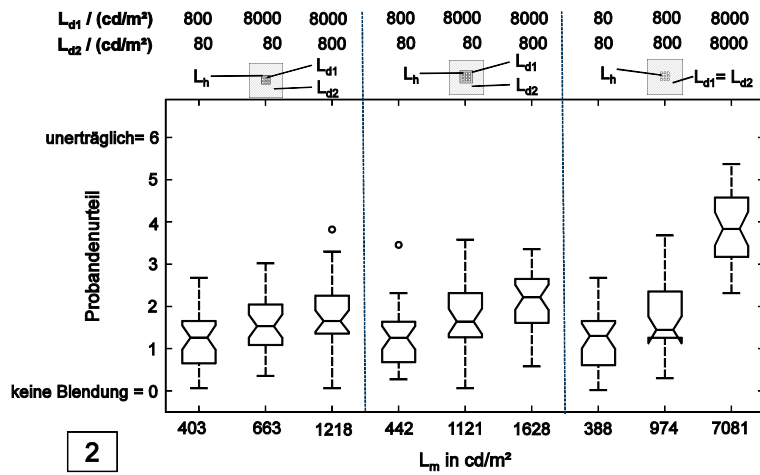
Abb. A.21 Vergleich der Probandenurteile der Strukturen 4 und 7 bei verschiedenen Kontrasten innerhalb der Leuchte (Aufgabe 4-6)



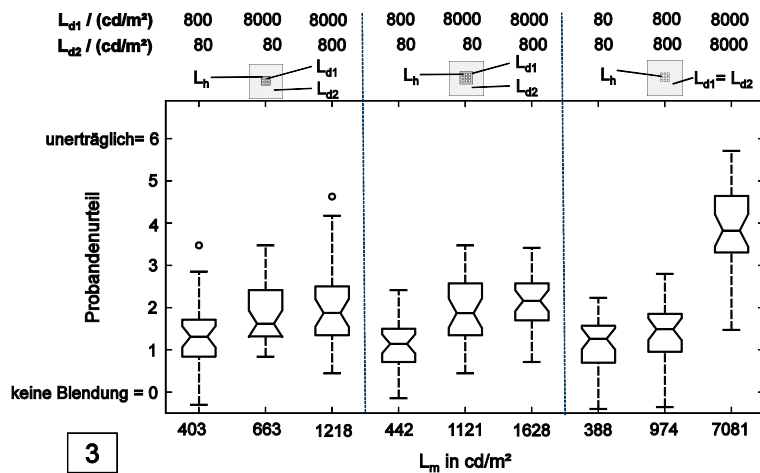
## A.5 Diagramme zum Einfluss der unmittelbaren Umgebung



Aufgabe 1  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

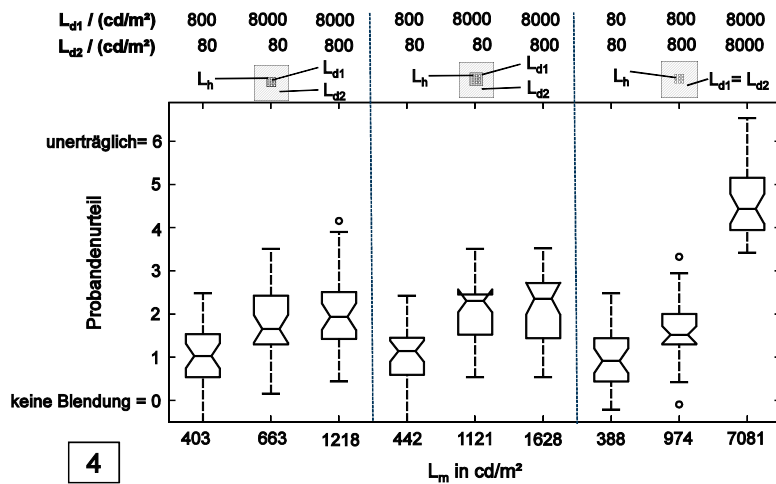


Aufgabe 2  
 freier Blick  
 $(\vartheta_m = 30^\circ)$   
 $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv



Aufgabe 3  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A.22 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Größen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 1-3,  $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ )



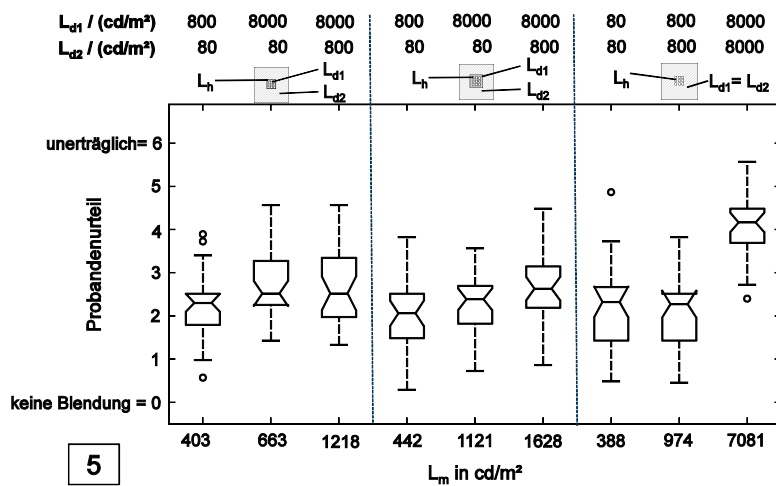
4

Aufgabe 4

$\vartheta = 15^\circ$

$L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$

Punkt fixieren



5

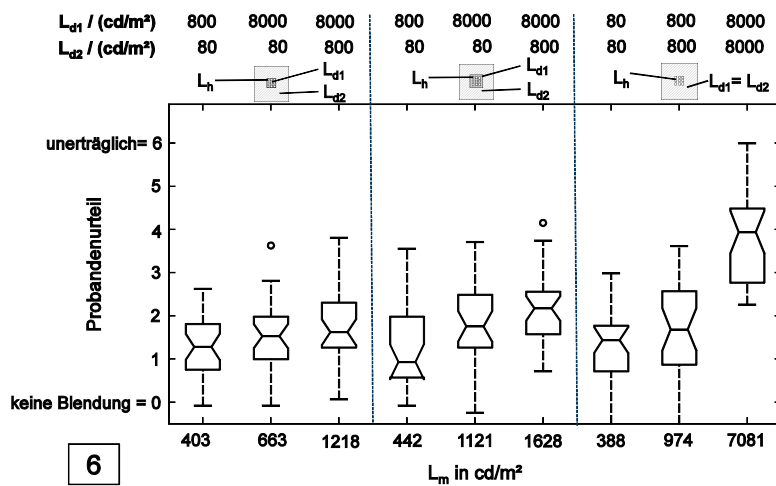
Aufgabe 5

$\vartheta = 0^\circ$

$L_b = 57 \dots 94 \text{ cd/m}^2$

kurzer Blick in

Leuchte



6

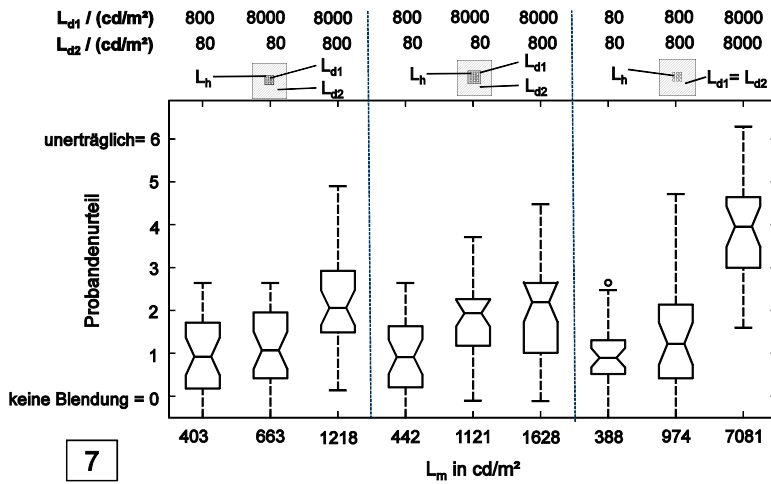
Aufgabe 6

$\vartheta = 30^\circ$

$L_b = 42 \dots 44 \text{ cd/m}^2$

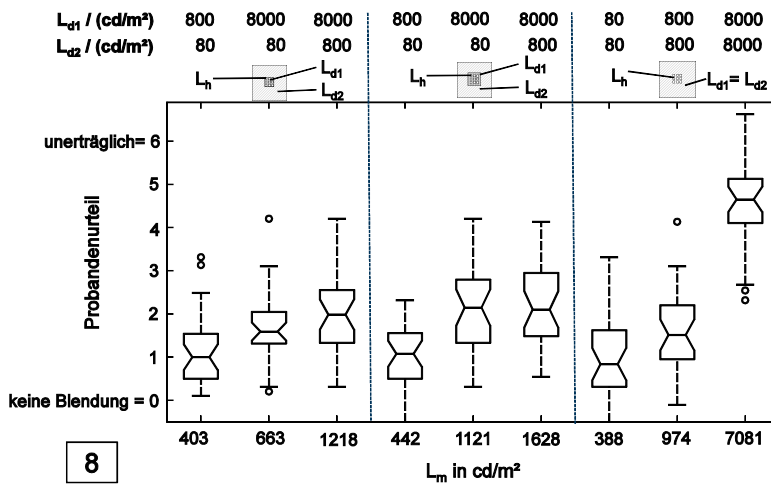
KLT

Abb. A.23 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Größen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 4-6,  $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ )



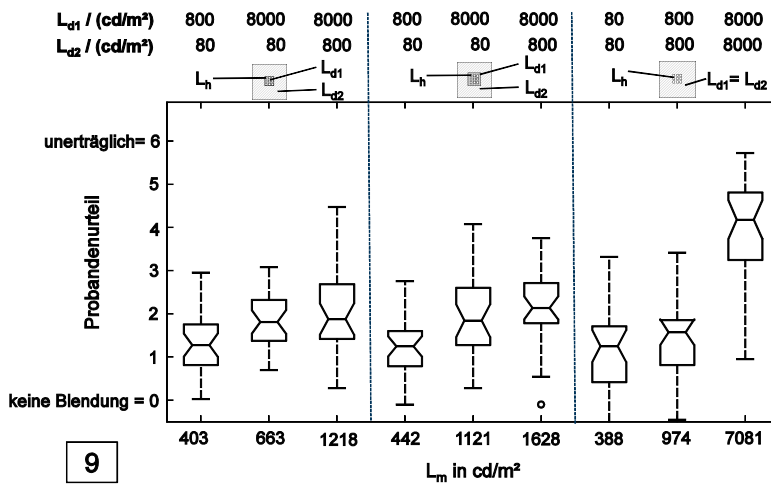
7

Aufgabe 7  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 172\dots$   
 $\dots 190 \text{ cd/m}^2$   
 KLT



8

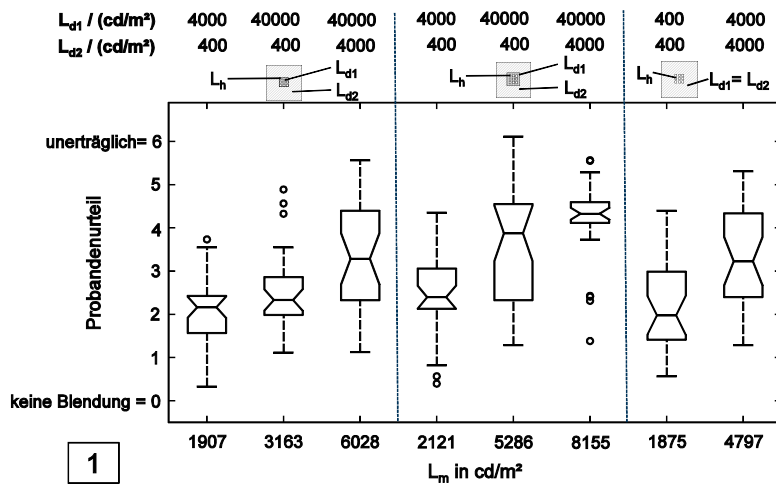
Aufgabe 8  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 56\dots 62 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv



9

Aufgabe 9  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 161\dots$   
 $\dots 183 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A.24 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Größen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 7-9,  $L_h = 80000 \text{ cd/m}^2$ )

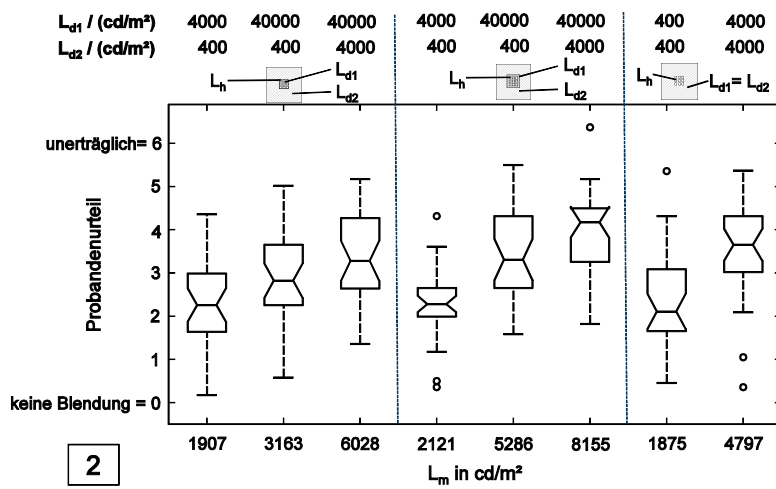


Aufgabe 1

$\vartheta = 30^\circ$

$L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$

KLT



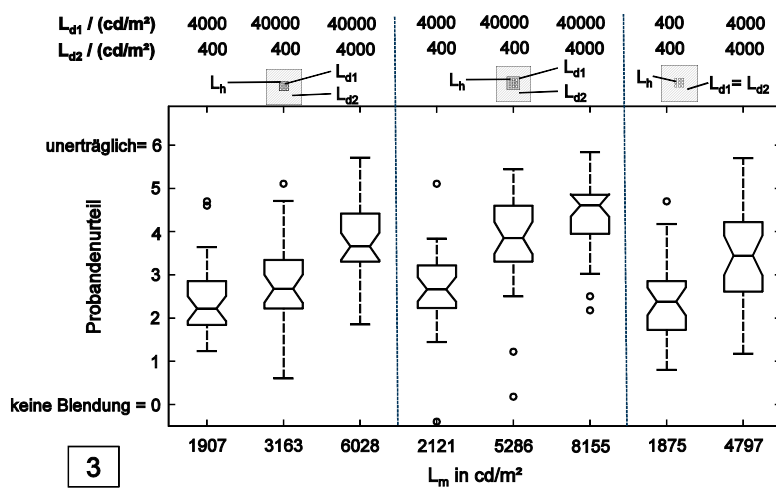
Aufgabe 2

freier Blick

( $\vartheta_m = 30^\circ$ )

$L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$

KLT auditiv



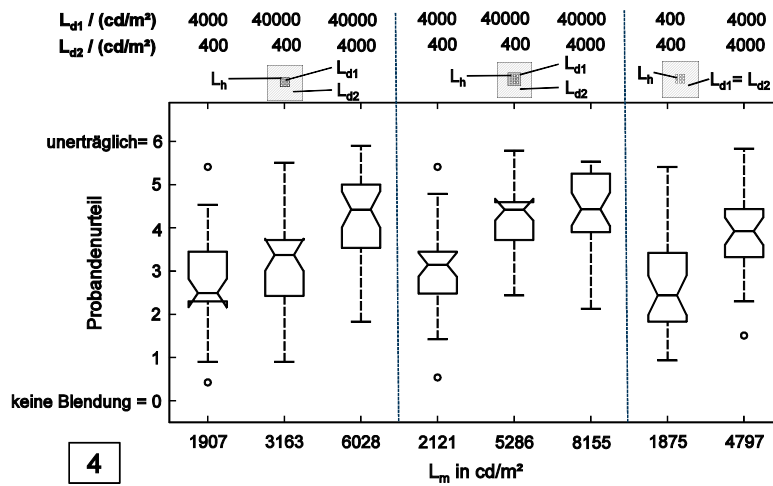
Aufgabe 3

$\vartheta = 15^\circ$

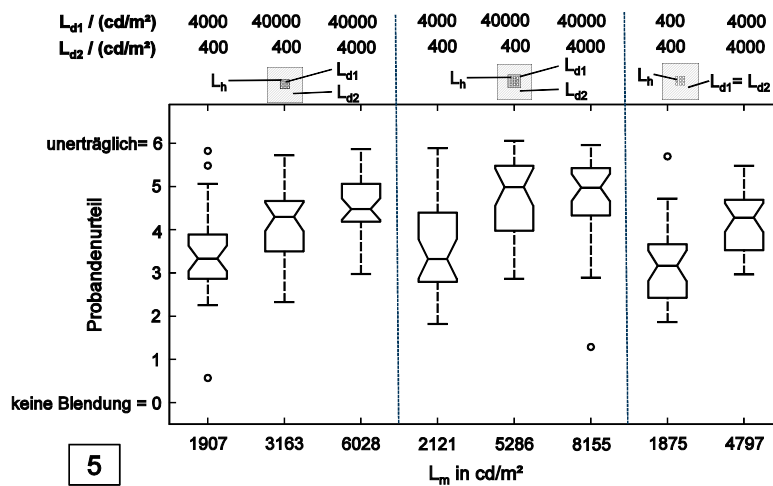
$L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$

KLT

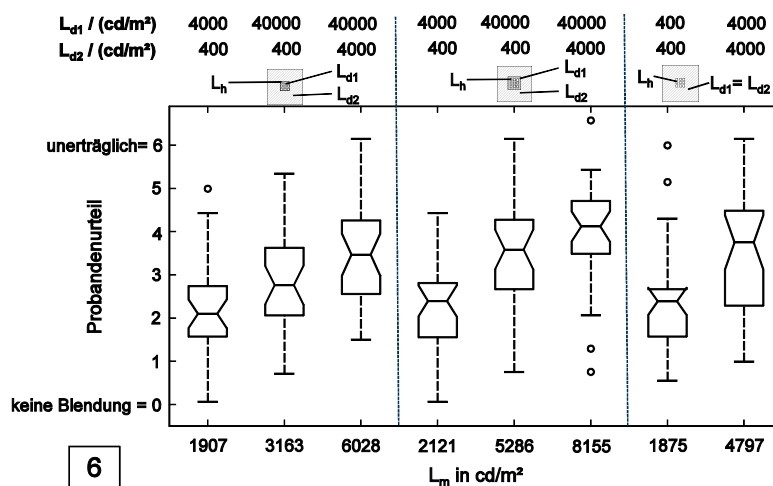
Abb. A.25 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Größen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 1-3,  $L_h = 400000 \text{ cd/m}^2$ )



Aufgabe 4  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 Punkt fixieren

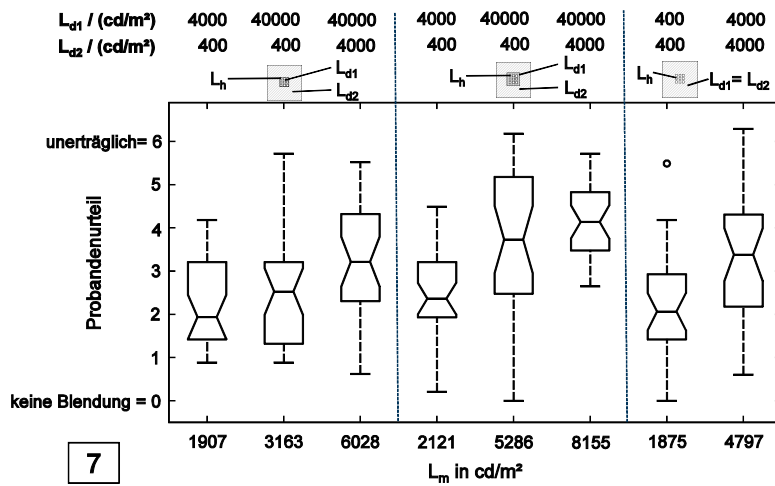


Aufgabe 5  
 $\vartheta = 0^\circ$   
 $L_b = 57 \dots 94 \text{ cd/m}^2$   
 kurzer Blick in  
 Leuchte



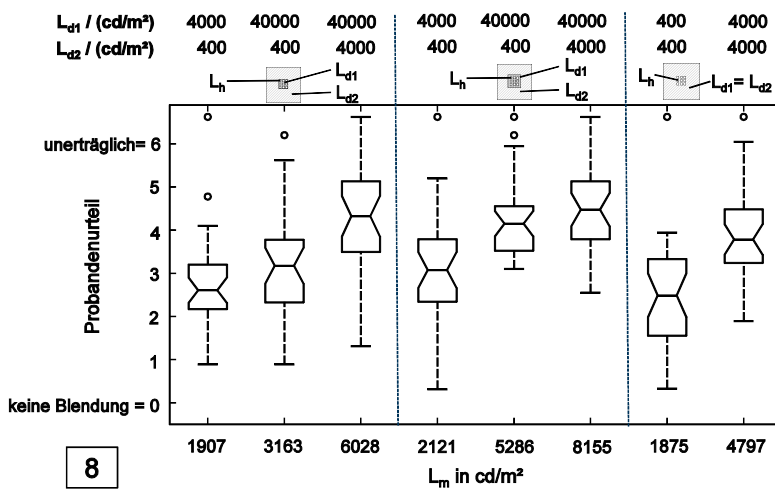
Aufgabe 6  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42 \dots 44 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A.26 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Größen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 4-6,  $L_h = 400000 \text{ cd/m}^2$ )



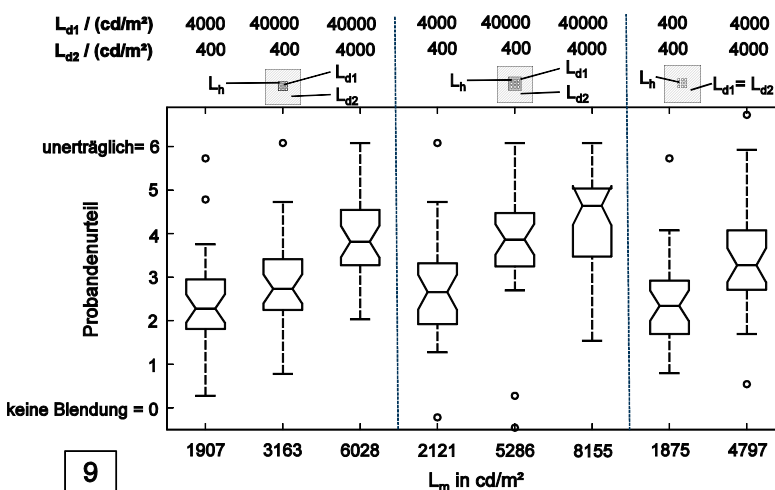
7

Aufgabe 7  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 172 \dots$   
 $\dots 190 \text{ cd/m}^2$   
 KLT



8

Aufgabe 8  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 56 \dots 62 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv

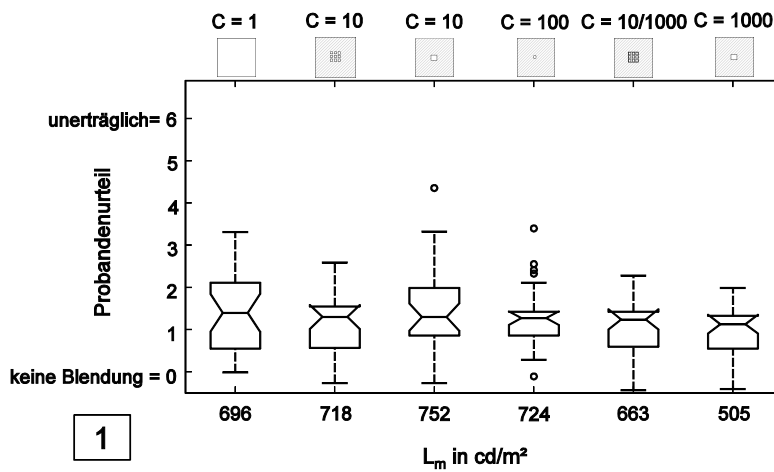


9

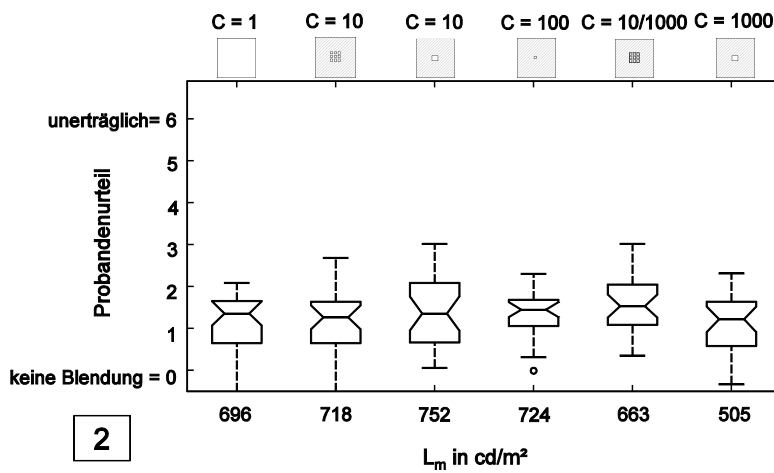
Aufgabe 9  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 161 \dots$   
 $\dots 183 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A.27 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Größen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 7-9,  $L_h = 400000 \text{ cd/m}^2$ )

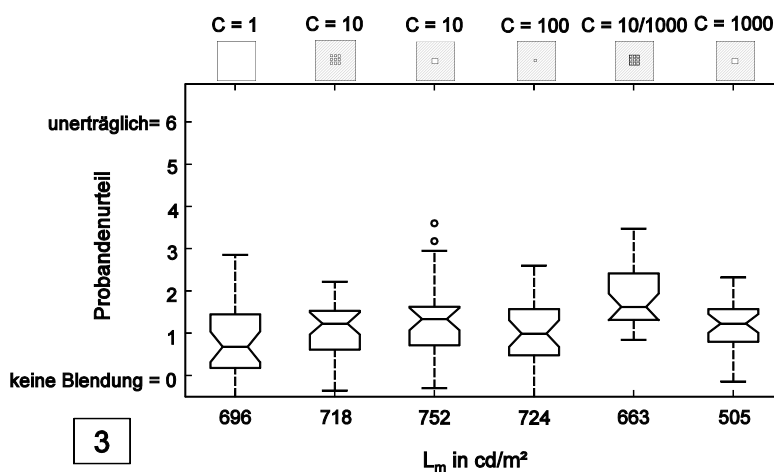
## A.6 Diagramme zum Einfluss des Kontrasts



Aufgabe 1  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

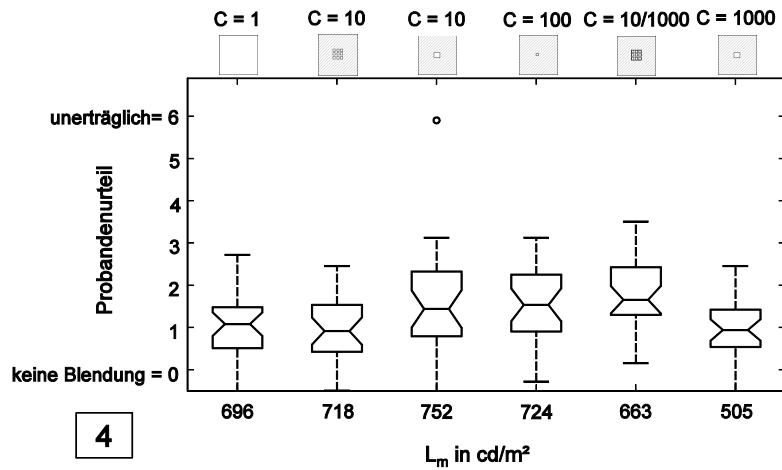


Aufgabe 2  
 freier Blick ( $\vartheta_m = 30^\circ$ )  
 $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv



Aufgabe 3  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A.28 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte (Aufgabe 1-3)

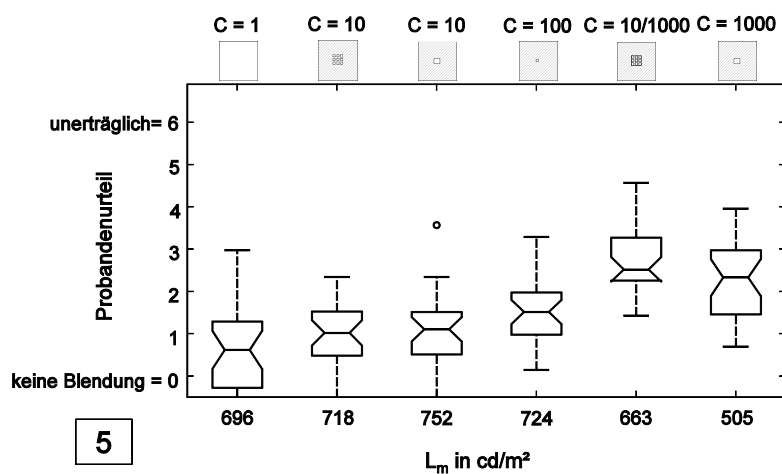


Aufgabe 4

$\vartheta = 15^\circ$

$L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$

Punkt fixieren



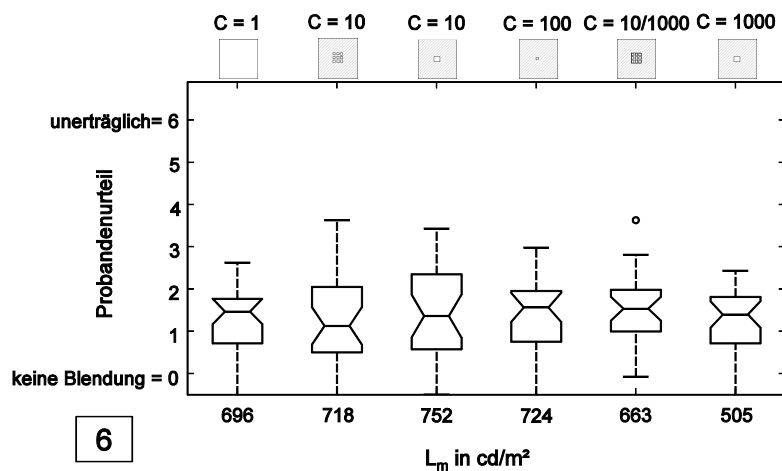
Aufgabe 5

$\vartheta = 0^\circ$

$L_b = 57 \dots 94 \text{ cd/m}^2$

kurzer Blick in

Leuchte



Aufgabe 6

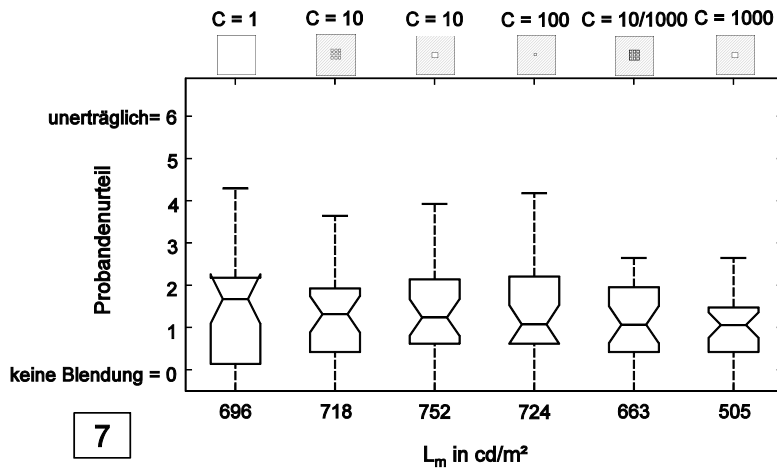
$\vartheta = 30^\circ$

$L_b = 42 \dots 44 \text{ cd/m}^2$

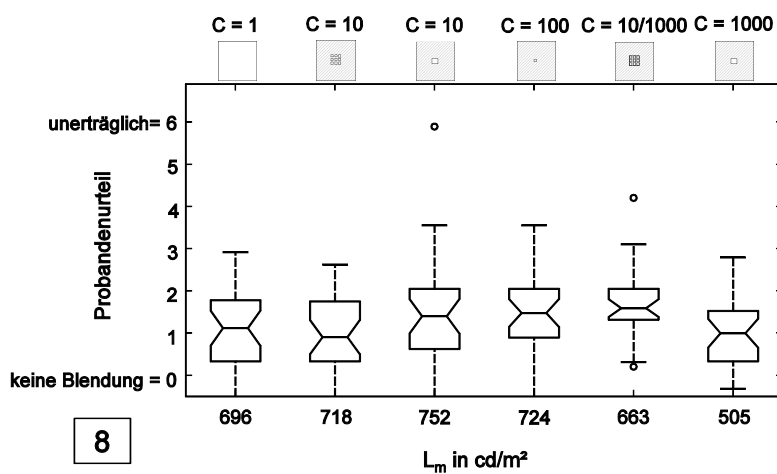
KLT

Abb. A.29 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte (Aufgabe 4-6)

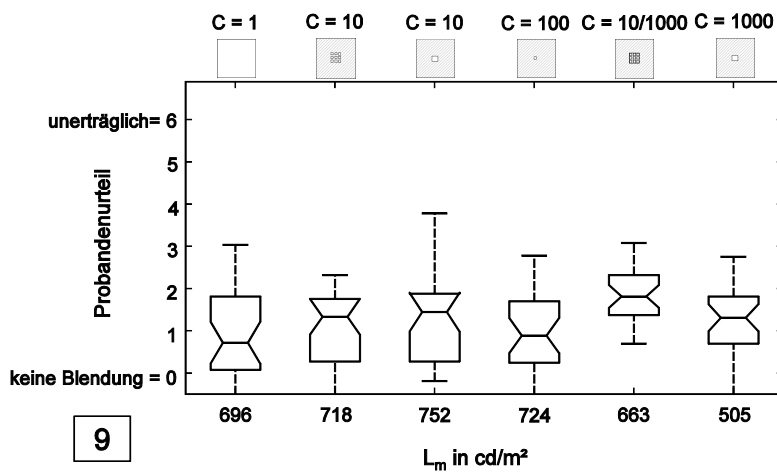




Aufgabe 7  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 172 \dots$   
 $\dots 190 \text{ cd}/\text{m}^2$   
 KLT

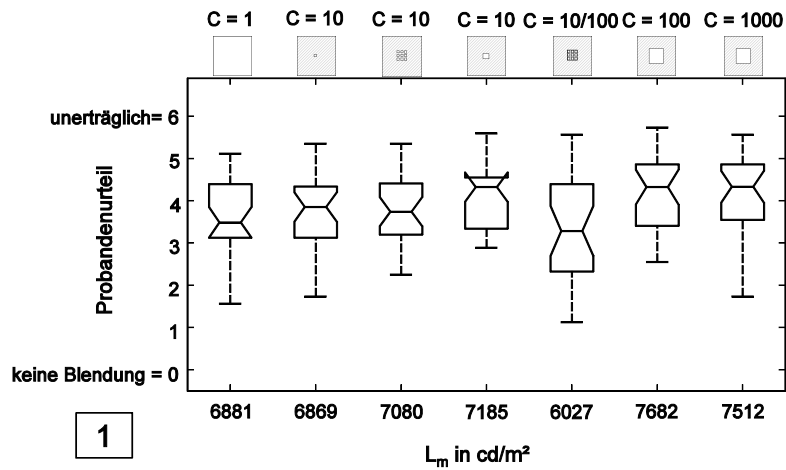


Aufgabe 8  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 56 \dots 62 \text{ cd}/\text{m}^2$   
 KLT auditiv

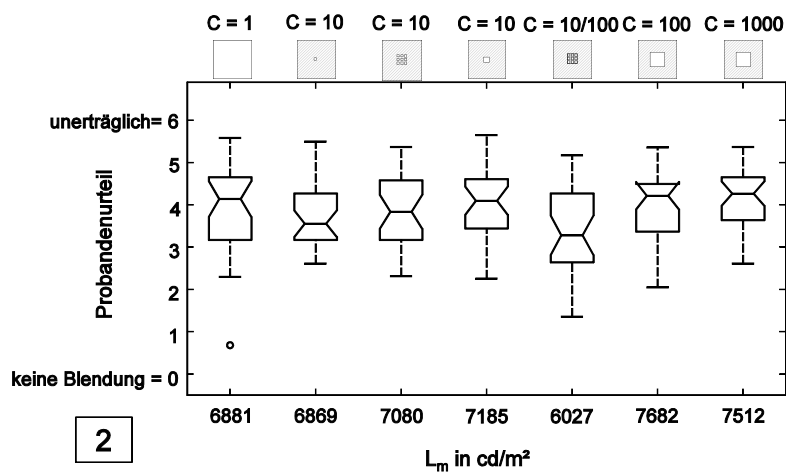


Aufgabe 9  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 161 \dots$   
 $\dots 183 \text{ cd}/\text{m}^2$   
 KLT

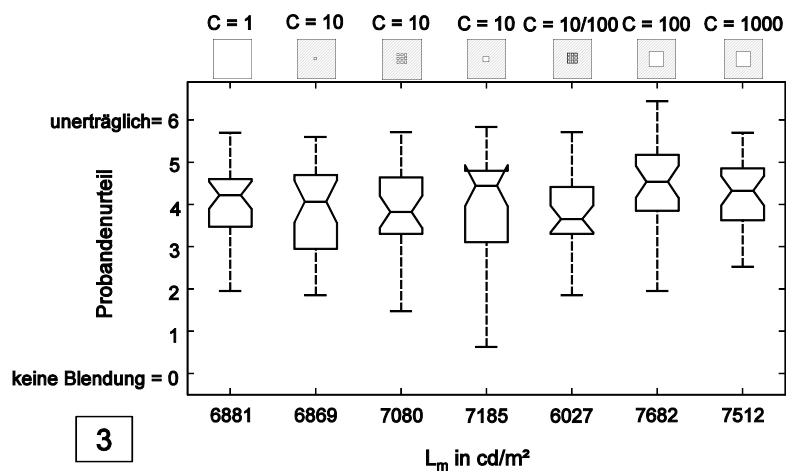
Abb. A.30 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte (Aufgabe 7-9)



Aufgabe 1  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

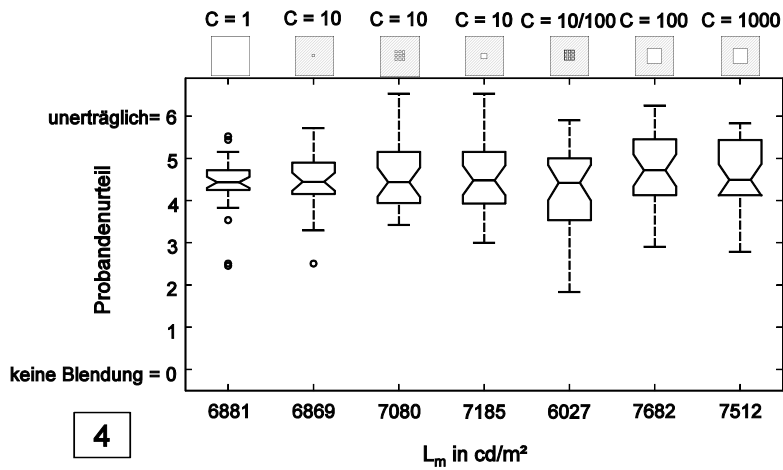


Aufgabe 2  
 freier Blick  
 $(\vartheta_m = 30^\circ)$   
 $L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv

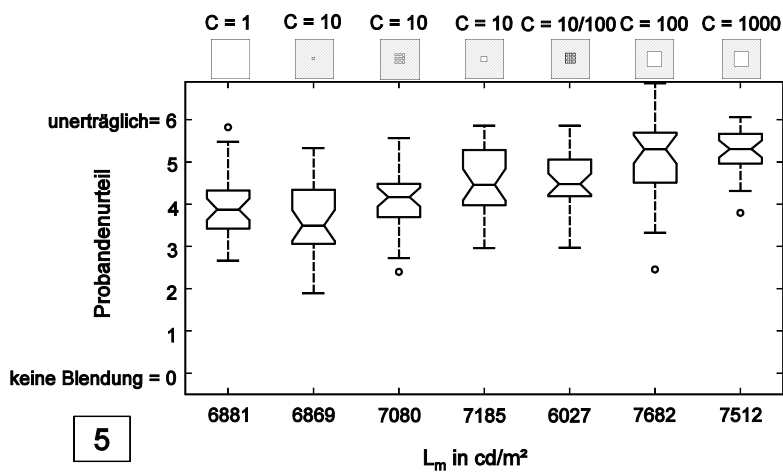


Aufgabe 3  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

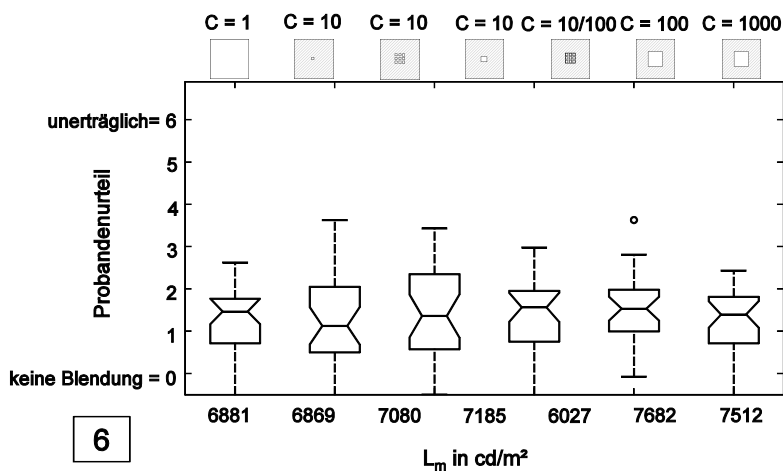
Abb. A.31 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte (Aufgabe 1-3)



Aufgabe 4  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 Punkt fixieren

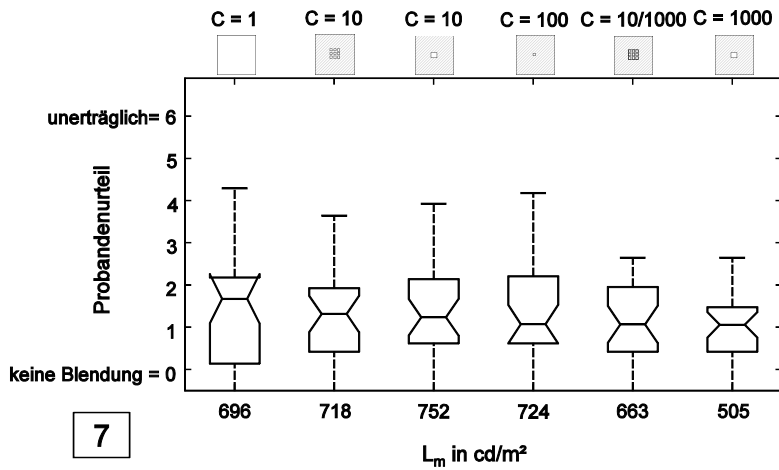


Aufgabe 5  
 $\vartheta = 0^\circ$   
 $L_b = 57 \dots 94 \text{ cd/m}^2$   
 kurzer Blick in  
 Leuchte

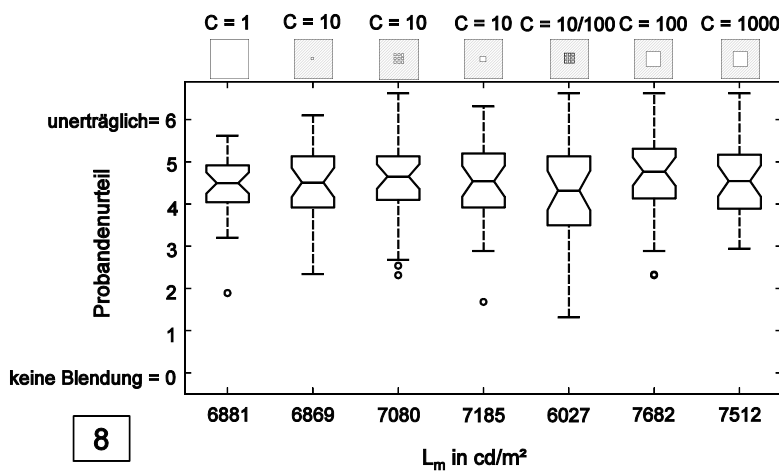


Aufgabe 6  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42 \dots 44 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

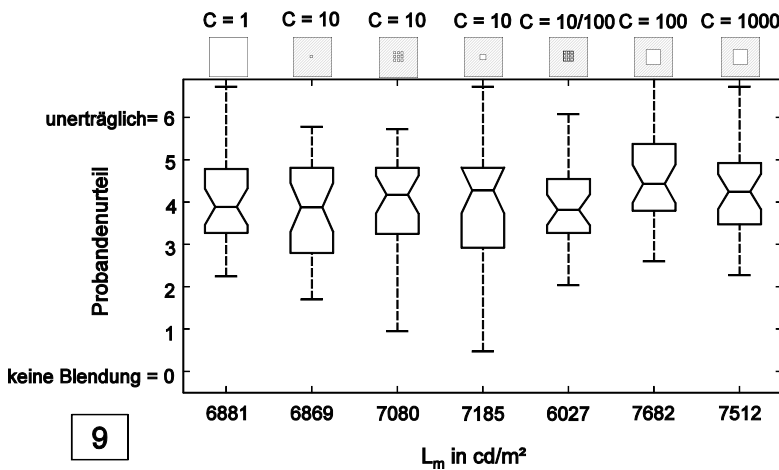
Abb. A.32 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte (Aufgabe 4-6)



Aufgabe 7  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 172 \dots$   
 $\dots 190 \text{ cd/m}^2$   
 KLT



Aufgabe 8  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 56 \dots 62 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv



Aufgabe 9  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 161 \dots$   
 $\dots 183 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A.33 Vergleich der Probandenurteile bei verschiedenen Kontrasten und ähnlicher mittlerer Blendquellenleuchtdichte (Aufgabe 7-9)

## A.7 Diagramme zur Gruppierung der Korrekturfaktoren nach HARA

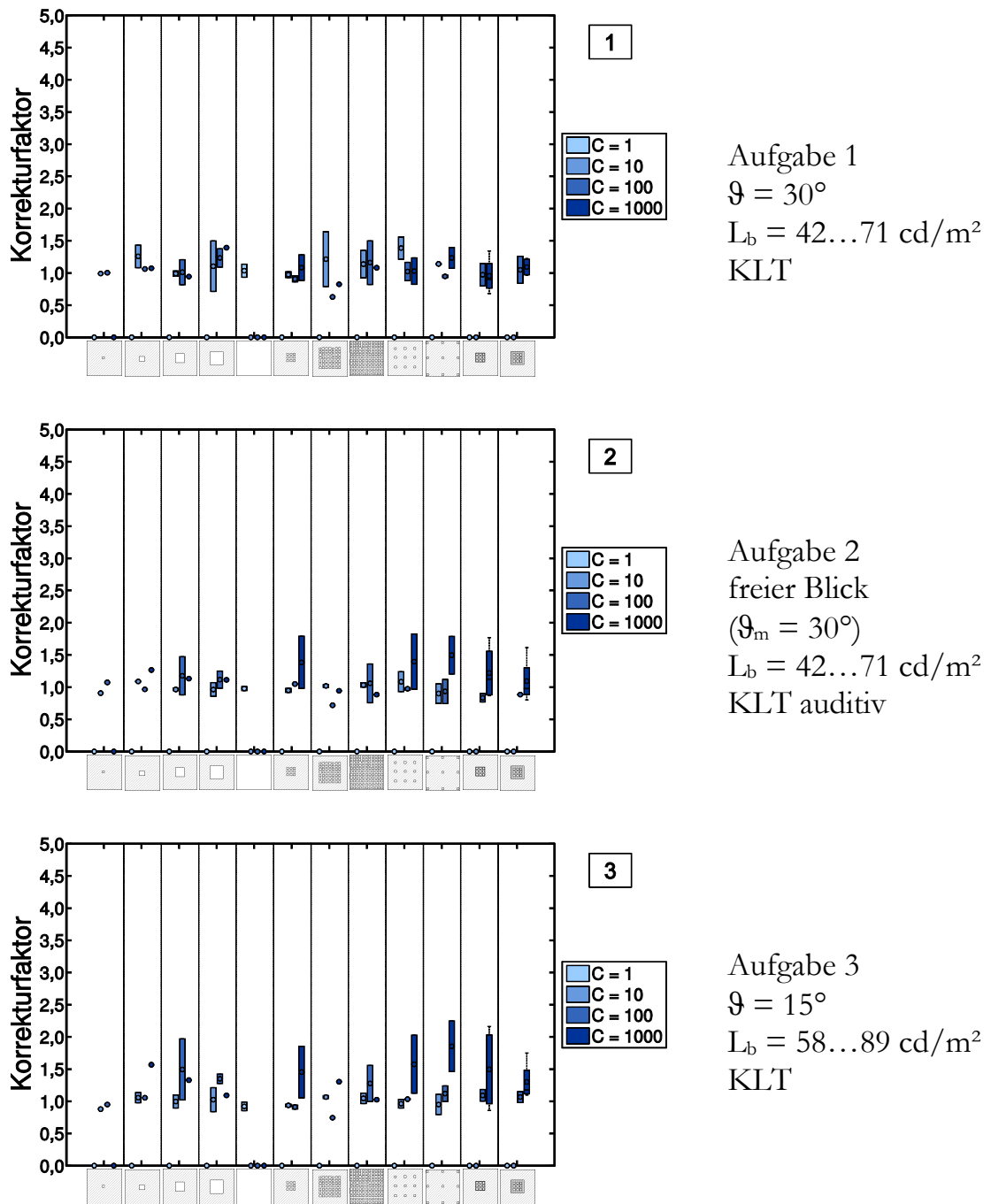
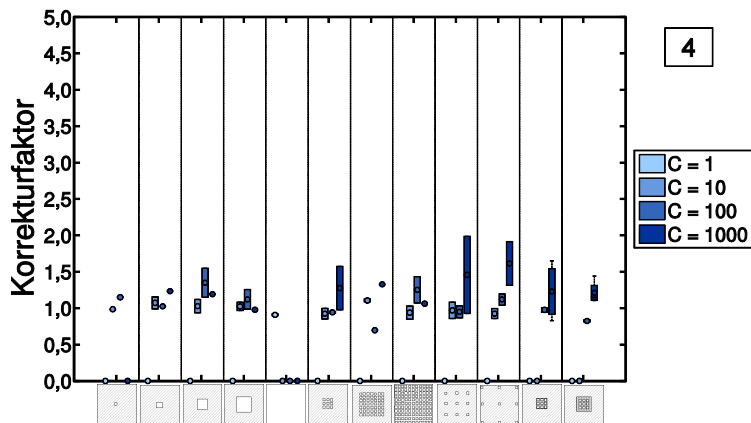
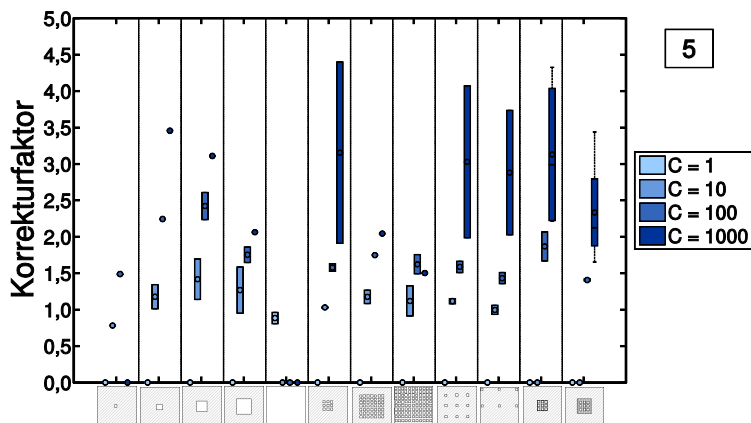


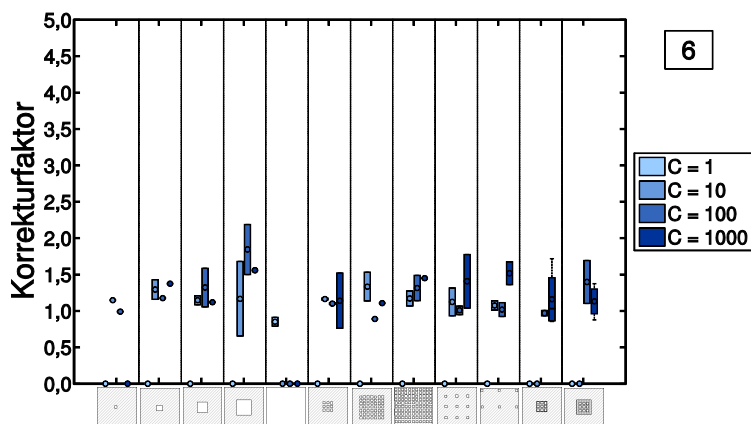
Abb. A.34 Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Kontraste (Aufgabe 1-3)



Aufgabe 4  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 Punkt fixieren

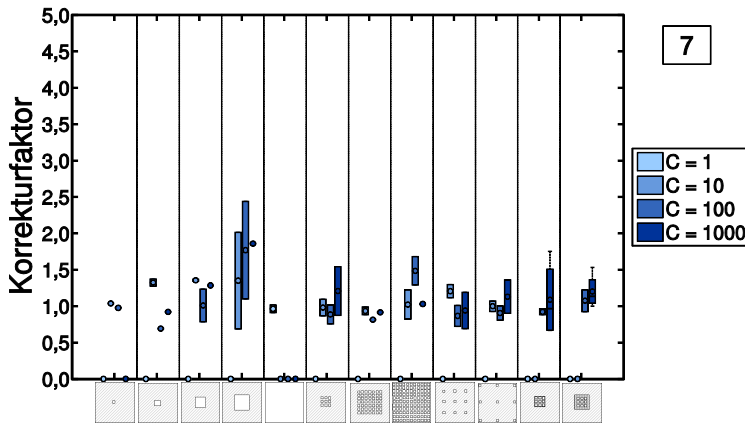


Aufgabe 5  
 $\vartheta = 0^\circ$   
 $L_b = 57 \dots 94 \text{ cd/m}^2$   
 kurzer Blick in  
 Leuchte

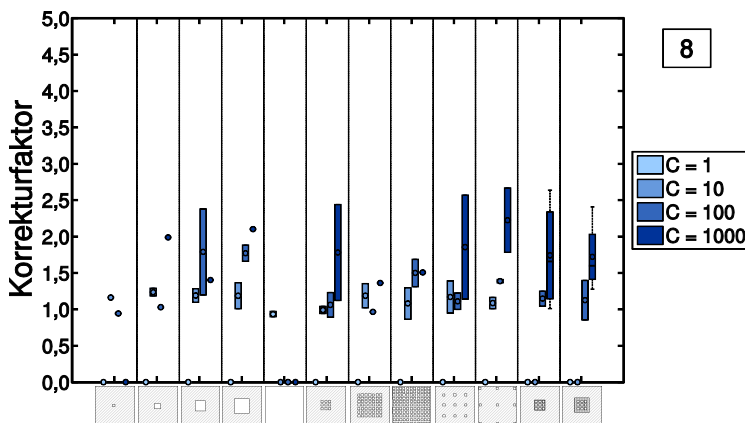


Aufgabe 6  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42 \dots 44 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

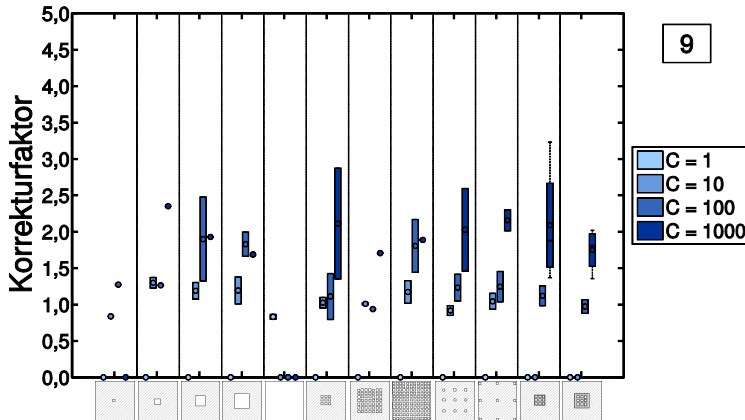
Abb. A.35 Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Kontraste (Aufgabe 4-6)



Aufgabe 7  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 172\dots$   
 $\dots 190 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

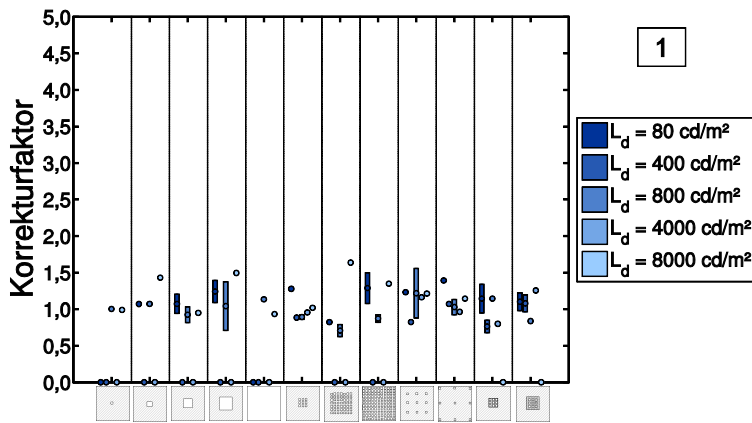


Aufgabe 8  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 56\dots 62 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv



Aufgabe 9  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 161\dots$   
 $\dots 183 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A.36 Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Kontraste (Aufgabe 7-9)



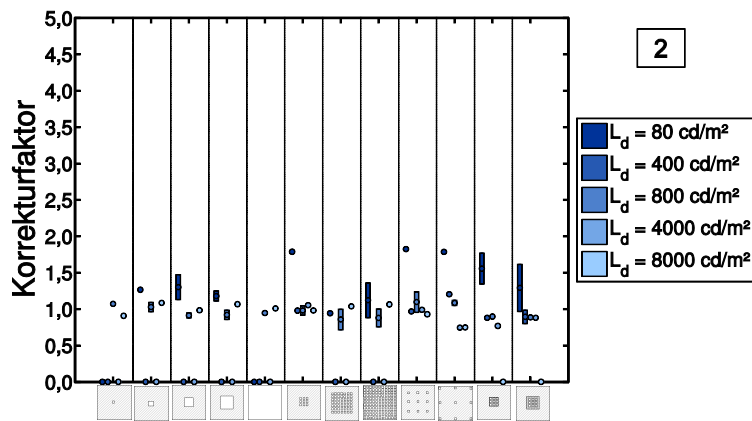
1

Aufgabe 1

$\vartheta = 30^\circ$

$L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$

KLT



2

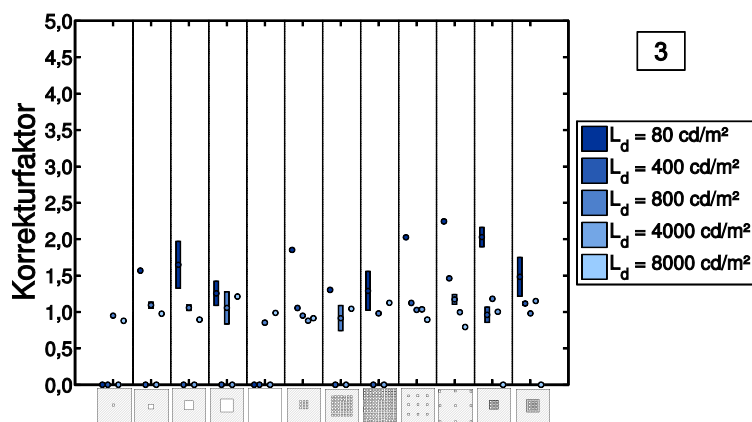
Aufgabe 2

freier Blick

$(\vartheta_m = 30^\circ)$

$L_b = 42 \dots 71 \text{ cd/m}^2$

KLT auditiv



3

Aufgabe 3

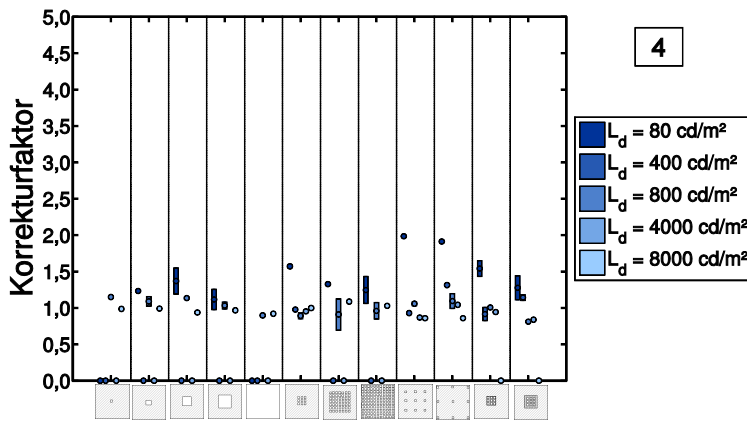
$\vartheta = 15^\circ$

$L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$

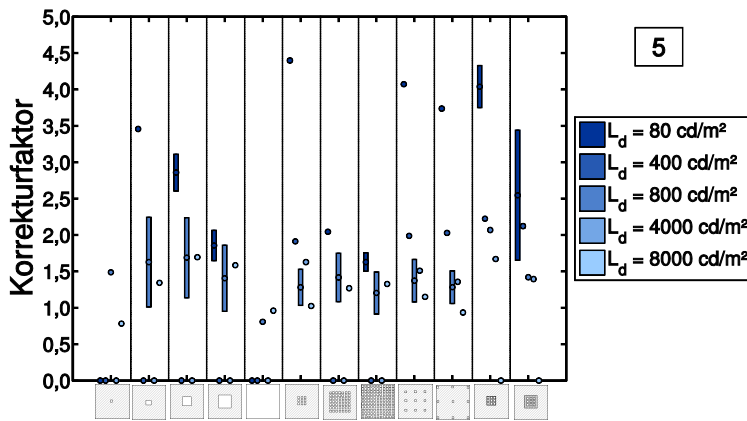
KLT

Abb. A.37 Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 1-3)

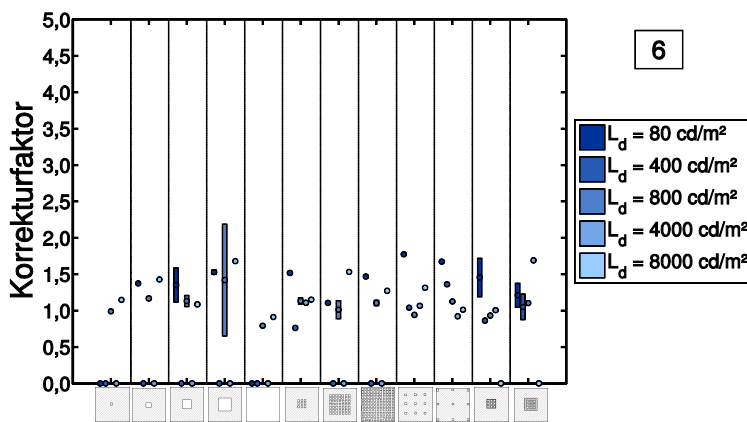




Aufgabe 4  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 58 \dots 89 \text{ cd/m}^2$   
 Punkt fixieren

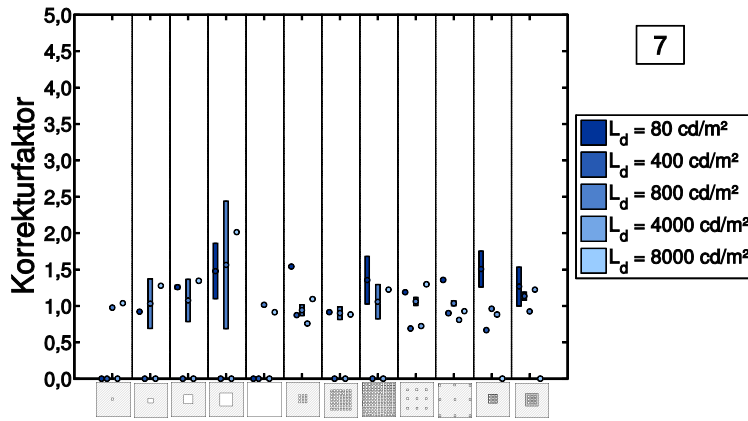


Aufgabe 5  
 $\vartheta = 0^\circ$   
 $L_b = 57 \dots 94 \text{ cd/m}^2$   
 kurzer Blick in  
 Leuchte



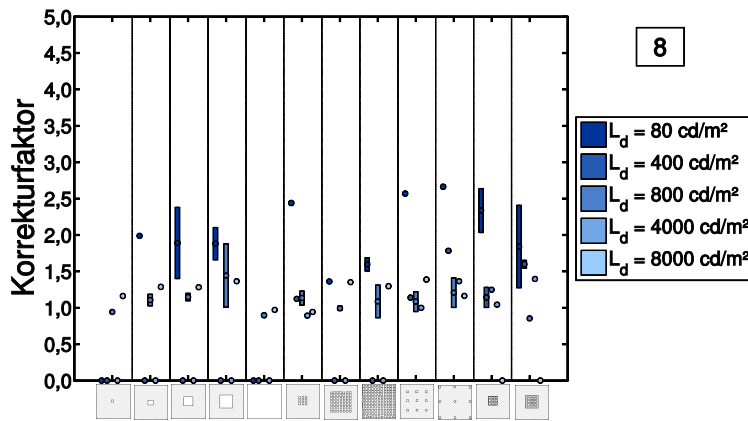
Aufgabe 6  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 42 \dots 44 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A.38 Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 4-6)



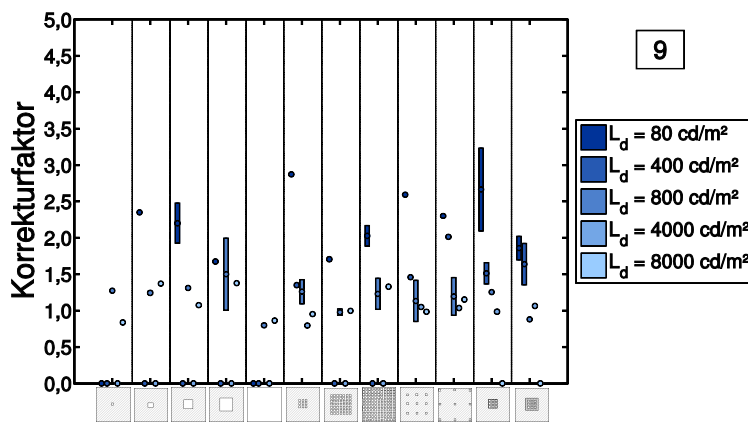
7

Aufgabe 7  
 $\vartheta = 30^\circ$   
 $L_b = 172\dots$   
 $\dots 190 \text{ cd/m}^2$   
 KLT



8

Aufgabe 8  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 56\dots 62 \text{ cd/m}^2$   
 KLT auditiv



9

Aufgabe 9  
 $\vartheta = 15^\circ$   
 $L_b = 161\dots$   
 $\dots 183 \text{ cd/m}^2$   
 KLT

Abb. A.39 Vergleich der Korrekturfaktoren nach HARA für verschiedene Strukturen und Leuchtdichten der unmittelbaren Umgebung (Aufgabe 7-9)

