

Stephan Völker, Heike Schumacher (Hrsg.)

UNILED – Erfassung und Beseitigung von Innovationshemmnissen beim Solid State Lighting

Ausgewählte Ergebnisse des Forschungsvorhabens



Stephan Völker | Heike Schumacher (Hrsg.)

UNILED
Erfassung und Beseitigung von
Innovationshemmnissen beim Solid State Lighting

Die Schriftenreihe des Fachgebietes Lichttechnik wird
herausgegeben von:
Prof. Dr. Stephan Völker
Heike Schumacher

Die Schriftenreihe des Fachgebietes Lichttechnik wurde mit dem Jahresbericht 2012 begonnen.
Hierüber werden Dissertationen, Tagungsbände, Jahres- und Forschungsberichte des Fachgebietes
veröffentlicht.

UNILED

**Erfassung und Beseitigung von
Innovationshemmnissen beim Solid State Lighting**

Ausgewählte Ergebnisse des Forschungsvorhabens

Herausgeber:
Stephan Völker
Heike Schumacher

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Universitätsverlag der TU Berlin, 2015

<http://verlag.tu-berlin.de>

Fasanenstr. 88, 10623 Berlin

Tel.: +49 (0)30 314 76131 / Fax: -76133

E-Mail: publikationen@ub.tu-berlin.de

Das Manuskript ist urheberrechtlich geschützt.

Druck: docupoint GmbH

Satz/Layout: Heike Schumacher, Cornelia Vandahl, Fenya Almstadt

Titelfoto: Leuchte der Firma WE-EF LEUCHTEN

ISBN 978-3-7983-2707-8 (print)

ISBN 978-3-7983-2708-5 (online)

ISSN 2196-338X (print)

ISSN 2198-5103 (online)

Zugleich online veröffentlicht auf dem Digitalen Repositorium der Technischen Universität Berlin:

URN [urn:nbn:de:kobv:83-opus4-55787](http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:83-opus4-55787)

<http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:83-opus4-55787>

Forschung für die Leuchtenindustrie – Ergebnisse des UNILED Projektes

Die vier lichttechnischen Fachgebiete an deutschen Universitäten – TU Berlin, TU Darmstadt, TU Ilmenau und KIT Karlsruhe – erforschten in den letzten vier Jahren gemeinsam die Hemmnisse, welche den Einsatz von Solid-State-Lighting verzögern oder behindern können.

Fast zwei Jahrzehnte wurde daran gearbeitet, die Leuchtdichte und die Lebensdauer der LED so zu erhöhen, dass sie zu einer ernsthaften Alternative für konventionelle Temperatur- oder Gasentladungslampen in der Allgemeinbeleuchtung wurde. 2008 war dieses Ziel erreicht. In neuen Produkten hatte die LED die konventionellen Lichtquellen fast vollständig verdrängt. Gleichzeitig war vielen Herstellern klar geworden, dass die neue Technik ein deutlich verändertes Know-How bei ihren Entwicklern voraussetzt. Fehlendes Wissen im Bereich Elektronik und Thermomanagement, insbesondere auf dem Gebiet der Alterung elektronischer Komponenten und der Degradation der LEDs, sowie neue Anforderungen an die Messtechnik und scheinbar nicht mehr aussagekräftige und damit ungenügende visuelle und nicht-visuelle Bewertungskriterien führten nicht selten zu Ausfällen und damit zu Klagen der Kunden.

Im Forschungsprojekt UNILED wurde eine exakte wissenschaftliche Beschreibung der LED-Technologie vorgenommen. Bereits existierende Vorschriften und Verfahren wurden evaluiert, Hilfestellungen für die Anwendung konventioneller Messtechnik auf die LED wurden erarbeitet. Darüber hinaus wurden ergänzende Planungswerkzeuge entwickelt, welche den Einsatz des Solid-State-Lighting noch verlässlicher gestalten.

Der vorliegende Forschungsbericht fasst die bisherigen Ergebnisse des UNILED Projektes zusammen. Die Beiträge von 16 im Projekt tätigen wissenschaftlichen Mitarbeiter beschreiben die Innovationshemmnisse beim Einsatz von Solid-State-Lighting umfassend und geben Lösungsansätze für deren Beseitigung. Die Forschung leistet damit einen wesentlichen Beitrag, die vielen positiven Effekte des Solid-State-Lighting in innovativen deutschen Produkten zum Tragen zu bringen. Sie erarbeitet einheitliche Bewertungskriterien und trägt somit zur Vergleichbarkeit von Beleuchtungsprodukten bei.

Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker

Projektpartner

Technische Universität Berlin
Fachgebiet Lichttechnik
Prof. Dr.-Ing. habil. Stephan Völker

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Lichttechnik
Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh

Technische Universität Ilmenau
Fachgebiet Lichttechnik
Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz

Karlsruher Institut für Technologie
Lichttechnisches Institut
Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann

Diese Forschungsarbeit wurde mit finanzieller Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungsprojekts UNILED (Förderkennzeichen: 13N10751) durchgeführt.



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhalt

01. Visuelle Kriterien

Neue Spektralwertfunktionen zur Erfassung visueller Farbgleichheit bei LED-Spektren <i>Saskia Polster, Karin Bieske</i> <i>Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik</i>	12
Towards a Field Size Independent Metamerism <i>Saskia Polster, Christoph Schierz</i> <i>Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik</i>	26
Einfluss der Beobachtungsfeldgröße auf Farbgleichversuche mit LED-Lichtquellen <i>Saskia Polster, Christoph Schierz</i> <i>Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik</i>	38
Einfluss unterschiedlicher Beleuchtungskonzepte und Lampenspektren in der Innenraumbeleuchtung <i>Wjatscheslaw Pepler, Marvin Böll, Peter Bodrogi, Tran Quoc Khanh</i> <i>Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik</i>	47
Innenraumbeleuchtung mit LED- und Leuchtstofflampen - lichtmesstechnische und visuelle Feldtests <i>Marvin Böll, Friederike Geßner, Wjatscheslaw Pepler, Tran Quoc Khanh</i> <i>Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik</i>	54
Untersuchungen an LED-Leuchten im Bürobereich <i>Ingo Herzog, Cornelia Vandahl, Karin Bieske, Christoph Schierz, Ales Markytan</i> <i>Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik</i>	62
Neue 3-Kammer-Methode für die Psychometrie der Farbqualität für weiße LEDs <i>Nathalie Krause, Stefan Brückner, Peter Bodrogi, Tran Quoc Khanh</i> <i>Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik</i>	72
Rate the Rating: Stufe 2 – Erweiterung der Farbwiedergabeuntersuchungen vom Lichtsimulator zum Testraum <i>Katharina Jungnitsch, Christoph Schierz</i> <i>Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik</i>	79
Das Prinzip der Halbkugelprojektion als neuartiger Ansatz in der Lichtforschung? <i>Felix Börner</i> <i>Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik</i>	88

Describing the Luminance Adaptation of the Human Eye for Inhomogeneous Scenes via Spherical Mirror Projection and the Luminance of Subjective Black <i>Felix Börner, Christoph Schierz</i> <i>Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik</i>	96
Das Prinzip der Kugelspiegelprojektion als Ansatz zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte <i>Felix Börner, Christoph Schierz</i> <i>Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik</i>	103
Versuchsdesign zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte homogener und definiert strukturierter Leuchtdichtfelder unter photopischen Bedingungen <i>Felix Börner, Christoph Schierz</i> <i>Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik</i>	109
Einfluss der spektralen Zusammensetzung einer Lichtquelle auf die Blendung unter mesopischen Bedingungen <i>Mathias Niedling, Daniel Kierdorf, Stephan Völker</i> <i>Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik</i>	115
Influence of a Glare Sources Spectrum on Discomfort and Disability Glare under Mesopic Conditions <i>Mathias Niedling, Daniel Kierdorf, Stephan Völker</i> <i>Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik</i>	119
Spectral power distribution and glare <i>Mathias Niedling, Stephan Völker</i> <i>Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik</i>	129
Erhöhte Blendung durch LED-Straßenleuchten – Mythos oder Realität? <i>Mathias Niedling, Stephan Völker, Martine Knoop</i> <i>Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik</i>	136
Untersuchung zur Erweiterung des UGR-Blendungsbewertungsverfahrens für strukturierte LED-Leuchten <i>Carsten Funke, Christoph Schierz</i> <i>Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik</i>	138
Lichtfarbenunterschiede auf leuchtenden Flächen <i>Karin Bieske, Sarah Homberg</i> <i>Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik</i>	143
Kombination unterschiedlicher Lichtfarben im Raum: farbige Schatten <i>Karin Bieske, Tobias Fiebig</i> <i>Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik</i>	151
Steuerkonzepte für dynamische Beleuchtungssysteme: Variation des Beleuchtungsniveaus <i>Karin Bieske, Andreas Dommaschk</i> <i>Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik</i>	159

Lichtfarbenpräferenz unter realen Bedingungen 167
Karin Bieske, Susanne Spira
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

Bestimmung eines Reflexionsnormals für Kontrastwiedergabe-Messungen 175
Carsten Funke, Michael Deter, Christoph Hupe, Robert Skoczowsky,
Christoph Schierz
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

02. Nichtvisuelle Kriterien

Neukonzipierter Lichtsimulator im Fachgebiet Lichttechnik an der Technischen 183
Universität Berlin
Raphael Kirsch, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

Lighting Quality Versus Energy Efficiency 188
Raphael Kirsch, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

A Holistic Approach to Energy Efficiency and Lighting Quality in Office Spaces 197
Raphael Kirsch, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

Solid State Lighting in Offices: Impact on Lighting Quality and Room Appearance 205
Raphael Kirsch, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

Melatonin-suppression mit Weißlicht-LED – Erste Ergebnisse 214
H. Piazena², L. Franke¹, B. Thomsen¹, I. Kamenzky¹, R. Uebelhack¹, S. Völker²
¹Charité Berlin, AG Medizinische Photobiologie
²Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

03. Systembewertung

Analyse des thermischen Degradationsverhaltens von LED Systemen 224
Manfred Scholdt, Klaus Trampert, Cornelius Neumann
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut

Aufbau einer Langzeitmessung von LED Systemen 232
Manfred Scholdt, Christoph Beyer, Martin Perner, Cornelius Neumann
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut

04. LED Messtechnik

Round Robin Test: Measurement of High Power LEDs <i>Andreas Groh, Tran Quoc Khanh</i> <i>Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik</i>	238
LED-Systems: Colour Shifts and Colour Presentation <i>Franziska Herrmann, Klaus Trampert, Cornelius Neumann</i> <i>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut</i>	243
Gonio-Spectrometric Measurements of LED Luminaires <i>Silvia Marx, Karsten Köth, Stephan Völker</i> <i>Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik</i>	250
Spektroradiometrisches Verfahren zur Messung der Lichtstärkeverteilung von LED-Leuchten <i>Silvia Bensel, Stephan Völker</i> <i>Technisch Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik</i>	252
Spatial Colour Distribution of White LED Luminaires <i>Silvia Bensel, Stephan Völker</i> <i>Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik</i>	257
Angular Dependent Spectral Power Distribution of LED Luminaires <i>Silvia Bensel, Stephan Völker</i> <i>Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik</i>	263
Lichtstärkeverteilungen getrennt emittierender Bereiche <i>Silvia Bensel, Stephan Völker</i> <i>Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik</i>	269

Neue Spektralwertfunktionen zur Erfassung visueller Farbgleichheit bei LED-Spektren

Saskia Polster, Karin Bieske

Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

Tagung Lux Junior Dörfeld, 2013

1 Einleitung

Mit der LED (Light Emitting Diode) hat sich ein neues Leuchtmittel in der Innenraumbeleuchtung etabliert. Die standardisierten Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 und 1964 können bei bestimmten Spektralzusammensetzungen zu fehlerhaften Bewertungen von LED-Spektren führen. Teils werden gleich wahrgenommenen Spektren auf unterschiedliche Farbörter abgebildet. Teils werden Spektren mit denselben messtechnisch ermittelten Farbkoordinaten visuell unterschiedlich wahrgenommen. Damit ergeben sich massive Probleme bei der Ansteuerung von LED-Beleuchtungssystemen, die für homogene Flächenbeleuchtungen verwendet werden.

Bedingt durch den Produktionsprozess zur Herstellung von LEDs werden in einem Beleuchtungssystem immer LED-Lichtquellen mit leicht unterschiedlichen Spektralverteilungen verwendet. Wenn diese aber messtechnisch nicht korrekt erfasst werden, ergeben sich Inhomogenitäten innerhalb der beleuchteten Flächen. Bei der Verwendung von LEDs einer einzigen Lichtfarbe kommt es zu Problemen bei der richtigen Selektion der miteinander zu verwendenden Lichtquellen. Bei Beleuchtungssystemen, die innerhalb eines definierten Gamuts eine freie Farbwahl ermöglichen, besteht das Problem darin, dass die einzelnen Lichtquellen nicht korrekt charakterisiert werden können. Damit kommt es zu Schwierigkeiten bei der Ansteuerung eines gemeinsamen Farborts.

2 Ziel der Untersuchungen

Die hier vorgestellten Untersuchungen zur Erfassung visueller Farbgleichheit bei LED-Spektren hatten zum einen das Ziel das Ausmaß der Fehlbewertungen von LED-Spektren durch die Normspektralwertfunktionen festzustellen. Zum anderen sollten Spektralwertfunktionen ermittelt werden, mit denen visuell gleich wahrgenommene Spektren auf dieselben Farbkoordinaten abgebildet werden.

3 Datenbasis visuell gleich wahrgenommener Spektren

Zunächst wurde eine Datenbasis visuell gleich wahrgenommener Spektren erstellt. Zu diesem Zweck wurde ein Testsetup aufgebaut in dem die Farbwahrnehmung bei unterschiedlichen LED-Spektren in verschiedenen Beobachterfeldgrößen untersucht werden konnte. In diesem Versuchsaufbau wurden Side-by-Side Abgleichversuche durchgeführt.

3.1 Versuchsbedingungen

Die Untersuchungen fanden alle unter photopischen Adaptationsbedingungen statt. Die Umgebungsleuchtdichte betrug durchschnittlich 70 cd/m^2 während die Leuchtdichte auf dem Test- und Referenzfeld bei ca. 132 cd/m^2 lag. Unterschiedliche Kombinationen aus Referenz- und Testlichtspektren wurden untersucht. Dabei wurden die Abgleiche jeweils bei drei Farbtemperaturen (3500 K, 5000 K und 6500 K) durchgeführt. Die Umgebungsbeleuchtung wurde an die gerade untersuchte Lichtfarbe angepasst.

In Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass die Unterschiede in der visuellen Wahrnehmung zwischen einem 2° - und einem 10° -Beobachter bei einigen LED-Lichtquellen stark zum Tragen kommen. Daher wurden alle Untersuchungen jeweils in einem 2° - („K“), 5° - („M“) und 10° -Beobachterfeld („G“) durchgeführt. Abbildung 1 zeigt den Versuchsaufbau für die Abgleichuntersuchungen. Auf der rechten Seite ist die Drehscheibe dargestellt, die einen einfachen Wechsel der verwendeten Beobachterfeldgröße erlaubt. Insgesamt nahmen zwanzig Probanden an den Untersuchungen teil. Die Hälfte der Probanden war weiblich und das durchschnittliche Alter der Probandengruppe lag bei 30 ± 6 Jahren.

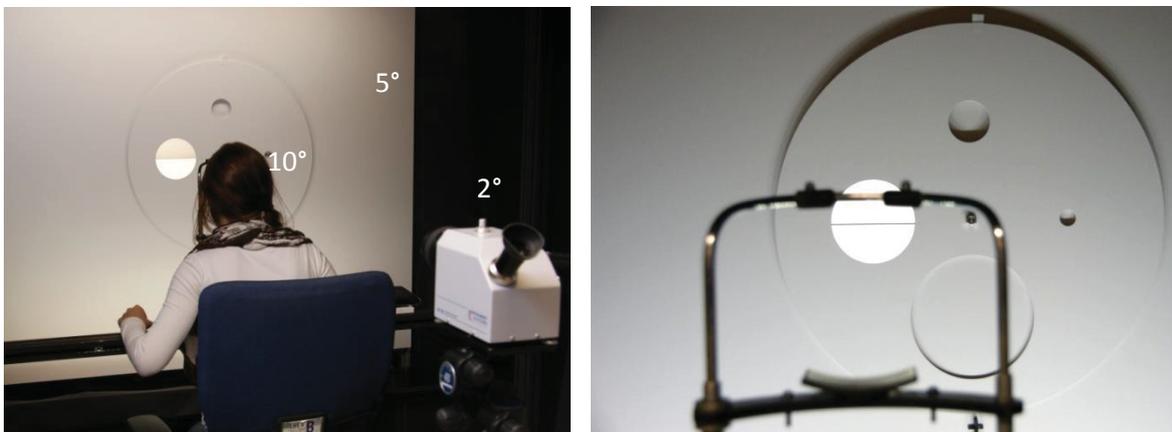


Abbildung 1: Abgleichstand mit zweigeteiltem Beobachterfeld und änderbarem Ausschnitt für Anpassung der Beobachterfeldgröße

3.2 Versuchsablauf

Die Probanden machten Abgleichversuche bei denen durch eine gezielte Ansteuerung der Testlichtquelle visuelle Gleichheit zwischen Testlichtfeld und Referenzlichtfeld hergestellt wurde. Zu Beginn jedes Abgleichs war der Farbort der Testlichtquelle messtechnisch, mit Hilfe der Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931, an die Referenzlichtquelle angeglichen. Der Proband steuerte die Farbe des Testfeldes in zwei Dimensionen auf der Achse Grün-Rot und der Achse Blau-Gelb mit Hilfe von Richtungstasten an. Zudem konnte die Testperson die Helligkeit des Testfeldes wenn nötig anpassen. Wurde die Farbtemperatur zwischen den Abgleichtests umgeschaltet, adaptierte der Proband solange auf die neue Situation bis er die Umgebung wieder als weiß wahrnahm; mindestens aber zwei Minuten.

Vor jedem Versuchsdurchlauf wurden die drei Einstellungen des Referenzlichtfeldes messtechnisch überprüft. Die vom Probanden eingestellte Testfläche wurde mit einem Spektralradiometer (CAS140-CT der Firma Instrument Systems) nach jedem Abgleich vermessen. Die Ergebnisse der Abgleichversuche wurden dann in die Datenbasis aufgenommen.

3.3 Untersuchte Spektralzusammensetzungen

Insgesamt wurden in den Abgleichuntersuchungen sieben unterschiedliche Spektralzusammensetzungen der Test- und Referenzlichtquellen untersucht. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die in den einzelnen Versuchsszenarien verwendeten Referenz- und Testlichtquellen. In Tabelle 2 wird die Zusammensetzung der einzelnen Lichtquellen genauer beschrieben.

Den Ausgangspunkt für die Untersuchungen bildeten zwei weiße LED-Typen (T1 und T2) vom Produkttyp Rebel des Herstellers Lumileds aus benachbarten ISO-Bins mit unterschiedlichen Spektralverteilungen. Diese unterscheiden sich trotz nahezu gleicher Farbörter deutlich in der visuellen Wahrnehmung. Da das Licht des LED-Typs T1 deutlich rötlich wirkt, wird die RGBW-Kombination, die diesen LED-Typen beinhaltet, im weiteren Verlauf als Testlichtquelle-Rot (TLR) bezeichnet. Der LED-Typ T2 wird dagegen deutlich grünlich wahrgenommen. Daher wird die RGBW-Lichtquelle mit diesem LED-Typ im Folgenden als Testlichtquelle-Grün (TLG) bezeichnet. Abbildung 2 zeigt die Spektren der LED-Typen T1 und T2 im Vergleich.

Auch bei der Verwendung dieser LED-Typen mit RGBW-Mischalgorithmen ergeben sich trotz messtechnischer Übereinstimmung der Farbörter deutliche visuelle Unterschiede. Versuchsszenario VS1 beschreibt den Vergleich des TLR-RGBW-Mischspektrums mit dem TLG-RGBW-Mischspektrum. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Diskrepanz zwischen visuellem Eindruck und messtechnischer Metamerie zwischen TLR und TLG auf den spektralen Unterschieden im Bereich zwischen 480 nm und 500 nm zurückzuführen ist. Daher wurde in Versuchsszenario VS3 das RGBW-Mischspektrum der TLR mit der Spektralverteilung einer cyanfarbenen LED aufgefüllt und wiederum dem TLG-RGBW-Mischspektrum gegenübergestellt. Versuchsszenario VS2 beschreibt den Vergleich der RGB-Mischspektren von TLR und TLG. Die Spektralverteilungen der jeweiligen roten und blauen LEDs sind nahezu identisch. Der Peak der grünen LED der TLR ist um 10 nm hin zu höheren Wellenlängen verschoben.

Tabelle 3 listet die Peakwellenlängen und die Halbwertsbreiten der einzelnen LED-Komponenten auf. In Versuchsszenario VS4 respektive Versuchsszenario VS5 werden die RGBW-Mischspektren von TLR bzw. TLG als Testspektrum auf eine 8-LED-Vollspektrum-Referenzlichtquelle abgeglichen. Die Versuchsszenarien VS6 und VS7 wurden eingeführt, um mit maximal verschiedenen Spektralzusammensetzungen von Test- und Referenzspektrum Worst-Case Szenarien zu generieren. Diese sind in der Realität nur mit geringer Wahrscheinlichkeit anzutreffen. Sie sollen aber eine Abschätzung ermöglichen, welche Fehler bei der Abbildung visuell gleicher Spektren auf Farbörter im schlimmsten Fall auftreten können. In VS6 wird ein möglichst lückenloses Spektrum (8-LED-Vollspektrum-Referenzlichtquelle) mit einem reinen Peakspektrum (RGB-Mischung von TLR) verglichen. Versuchsszenario VS7 stellt ein Worst-Case-Szenario dar, in dem zwei Peakspektren miteinander verglichen werden, wobei die Peaks der Spektren genau versetzt liegen.

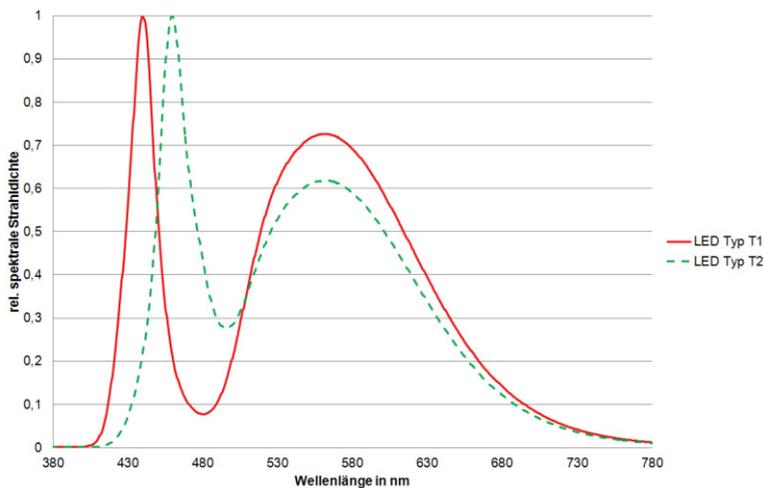


Abbildung 2: Relative Spektralverteilung der weißen LEDs T1 und T2 der Testlichtquellen TLR und TLG

Tabelle 1: Zusammenstellung der in den Versuchsszenarien VS1 bis VS9 verwendeten Referenz- und Testlichtquellen

Versuchsszenario	Referenzlichtquelle	Testlichtquelle
VS1	TLR-RGBW	TLG-RGBW
VS2	TLR-RGB	TLG-RGB
VS3	TLR-RGBW+C	TLG-RGBW
VS4	8-LED-Vollspektrum	TLR-RGBW
VS5	8-LED-Vollspektrum	TLG-RGBW
VS6	8-LED-Vollspektrum	TLR-RGB
VS7	ACB-Mix	TLR-RGB
VS8	TLR-Cyan-Mix-RGBW	TLG-RGBW
VS9	RCBW-Mix	TLR-RGBW

Tabelle 2: Zusammensetzung der verwendeten Referenz- und Testlichtquellen

Bezeichnung	Erläuterung
TLR	Mischung aus LED Typ T1 und roter, grüner und blauer LED
TLG	Mischung aus LED Typ T2 und roter, grüner und blauer LED
TLR-RGBW+C	RGBW-Mischung der TLR mit konstantem Mischanteil einer cyanfarbenen LED
8-LED-Vollspektrum	Mischspektrum ohne Lücken oder ausgeprägte Peaks im Spektrum
ACB-Mix	Mischung aus amber-, cyanfarbener und blauer LED
TLR-Cyan-Mix-RGBW	Mischung aus LED Typ T1 und roter, cyanfarbener und blauer LED
RCBW-Mix	Mischung aus roter, cyanfarbener, blauer und warmweißer LED der 8-LED-Lichtquelle

Tabelle 3: Peakwellenlängen λ_{Peak} und Halbwertsbreiten $\lambda_{h1=h2}$ der einzelnen LED-Komponenten

Bezeichnung	rote LED		grüne LED		blaue LED		Blaukomponente der weißen LED	
	λ_{Pea}	$\lambda_{h1=h2}$	λ_{Peak}	$\lambda_{h1=h2}$	λ_{Peak}	$\lambda_{h1=h2}$	λ_{Peak}	$\lambda_{h1=h2}$
TLR	643	18	535	36	449	23	440	22
TLG	640	17	525	32	447	18	460	28
ACB-Mix	596	15	497	27	467	20	-	-

4 Farbabstände zwischen visuell gleich wahrgenommenen Spektren

Die Datenbasis enthält innerhalb eines Datensatzes jeweils zwei Spektren, die von einem Probanden als visuell gleich wahrgenommen werden. Da zwei visuell gleich wahrgenommene Spektren innerhalb eines korrekten Farbraums auf denselben Farbort abgebildet werden sollten, stellt der Farbabstand zwischen den Farbörtern der beiden Spektren den Farbraumfehler dar, der innerhalb des verwendeten Systems gemacht wird. Je kleiner der Farbraumfehler ausfällt, desto besser wird die Farbwahrnehmung der Probandengruppe durch die verwendeten Spektralwertfunktionen modelliert. Die hier untersuchten Farbdifferenzen stellen jeweils die Farbdifferenz zwischen dem Mittelwert der Abgleichergebnisse aller Probanden und der Referenzlichtquelle dar.

4.1 Test der anerkannten Spektralwertfunktionen

Mit Hilfe der Datenbasis aus den Abgleichuntersuchungen wurden alle anerkannten Spektralwertfunktionen auf ihre Fähigkeit hin untersucht, visuell gleich wahrgenommene Spektren auf denselben Farbort abzubilden. Dabei wurden für den Test der Spektralwertfunktionen jeweils die Abgleichergebnisse aus den entsprechenden Beobachterfeldgrößen verwendet. Das bedeutet, nachdem die Spektralwertfunktionen der CIE von 1931 für einen 2°-Standardbeobachter ermittelt wurden, wurden diese auch mit Hilfe der Abgleichergebnisse aus dem 2°-Beobachterfeld untersucht. Die Farbdifferenz $\Delta u'v'_{K\text{-Referenz}}$ bezeichnet die Farbdifferenz zwischen dem, im kleinen 2°-Beobachterfeld abgeglichenen Testspektrum und dem Referenzspektrum. Die Farbdifferenz $\Delta u'v'_{G\text{-Referenz}}$ bezeichnet dagegen die Farbdifferenz zwischen dem Abgleichergebnis aus dem 10°-Beobachterfeld und dem dazugehörigen Referenzspektrum. Die Abgleichuntersuchungen aus dem 5°-Beobachterfeld sollen zeigen, ob sich die Farbortverschiebung zwischen den 2°- und 10°-Abgleichergebnissen linear verhält oder einen anderen Verlauf in der $u'v'$ -Farbtafel annimmt.

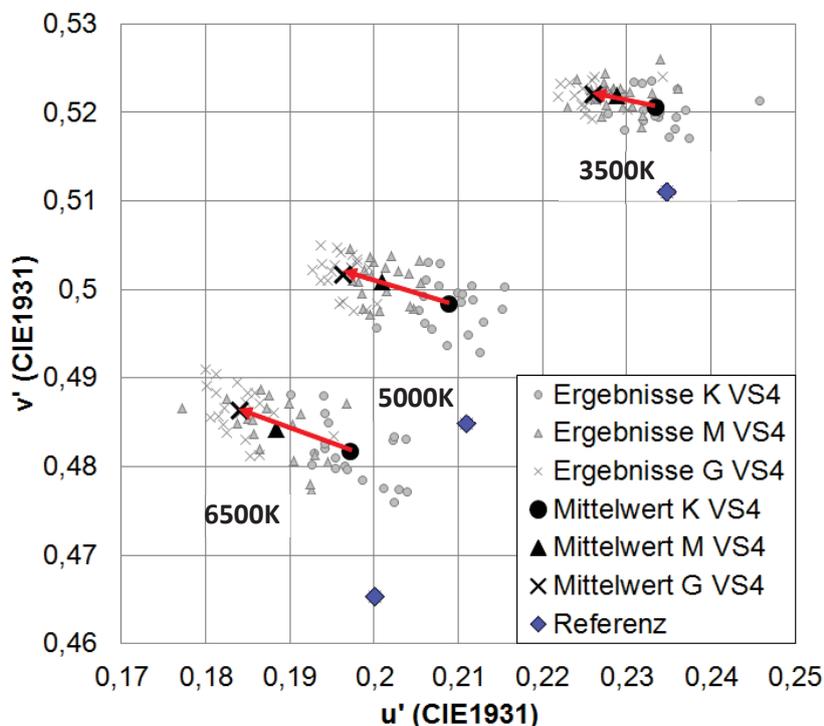


Abbildung 3: Abgleichergebnisse unter Verwendung des 2°- ("K"), 5°- ("M") und 10°-Beobachterfeldes ("G") für Versuchsszenario VS4

Abbildung 3 zeigt exemplarisch anhand von Versuchsszenario VS4, dass die Abgleiche aus dem 5°-Beobachterfeld („M“) jeweils auf der Verbindungsgeraden zwischen den Abgleichergebnissen aus dem 2°- („K“) und dem 10°-Beobachterfeld („G“) liegen. Dieses lineare Verhalten lässt sich für alle Versuchsszenarien bestätigen. Zunächst wurden die Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K\text{-Referenz}}$ (CIE1931) ermittelt, die sich unter Verwendung der Spektralwertfunktionen der CIE von 1931 ergeben. Für den Großteil der untersuchten Versuchsszenarien ergaben sich deutliche Farbdifferenzen zwischen den visuell gleich wahrgenommenen Spektren. Abbildung 4 zeigt die Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K\text{-Referenz}}$ (CIE1931) für die Versuchsszenarien VS1 bis VS7 bei den Farbtemperaturen 3500 K, 5000 K und 6500 K. Diese erreichen Werte von bis zu $\Delta u'v'_{K\text{-Referenz}}$ (CIE1931) = 0,0165. Die Farbraumfehler liegen über einem Wert von $\Delta u'v'_{K\text{-Referenz}}$ (CIE1931) = 0,008 für fünf der sieben untersuchten Versuchsszenarien. Um die Wahrnehmungsschwelle abschätzen zu können, wurde die Intraobserverstreuung für einige der Versuchsszenarien ermittelt. Diese liegt in einem Wertebereich von ca. $\Delta u'v' = 0,002$. Die Farbraumfehler liegen demnach für die meisten Versuchsszenarien deutlich über der Wahrnehmungsschwelle.

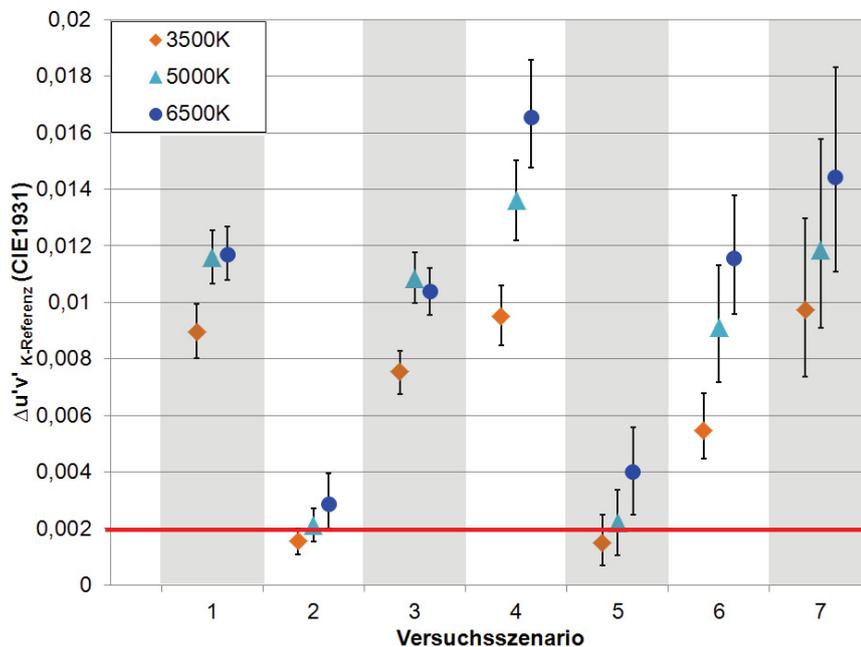


Abbildung 4: Farbraumfehler unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931

Im folgenden Schritt wurden die Normspektralwertfunktionen von 1964 und die Spektralwertfunktionen CIE2006-2°/10° getestet. Die Spektralwertfunktionen CIE2006-2°/10° basieren auf den Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE Empfehlung CIE170-1:2006 [1] für ein 2°- und ein 10°-Beobachterfeld. Die Diagramme in Abbildung 5 links zeigen die Farbdifferenzen, die sich unter Verwendung der unterschiedlichen Spektralwertfunktionen für die Abgleichergebnisse aus dem 2°-Beobachterfeld ergeben. Die Diagramme rechts zeigen die Farbraumfehler $\Delta u'v'_{G\text{-Referenz}}$ für die Abgleiche aus dem 10°-Beobachterfeld. Mit Hilfe der Spektralwertfunktionen CIE2006-2° können die Farbraumfehler der Abgleichergebnisse aus dem 2°-Beobachterfeld auf Werte unter $\Delta u'v'_{K\text{-Referenz}}$ (CIE2006-2°) = 0,006 reduziert werden. Die Werte liegen für den Großteil der Abgleichergebnisse aber immer noch über der Wahrnehmungsschwelle.

Die Farbraumfehler erreichen unter Verwendung der Spektralwertfunktionen der CIE von 1964 für einen 10°-Standardbeobachter maximal Werte von $\Delta u'v'_{G\text{-Referenz}}$ (CIE1964) = 0,008.

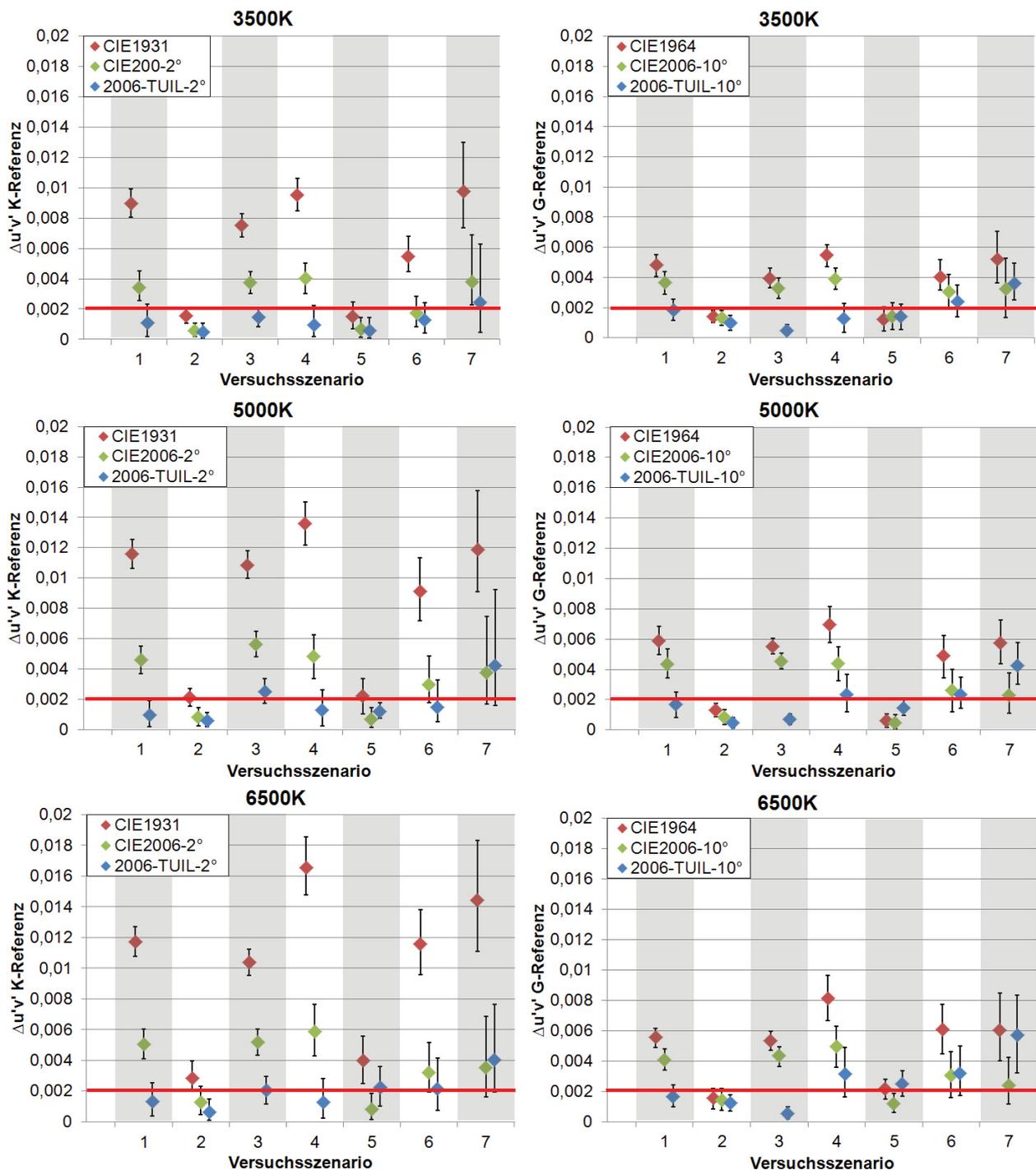


Abbildung 5: Mittelwerte der Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K/G\text{-Referenz}}$ mit 95%-Konfidenzintervallen unter Verwendung der unterschiedlichen Spektralwertfunktionen.

links: Farbraumfehler $\Delta u'v'_{K\text{-Referenz}}$ für die Farbwahrnehmung im 2° -Beobachterfeld

rechts: Farbraumfehler $\Delta u'v'_{G\text{-Referenz}}$ für die Farbwahrnehmung im 10° -Beobachterfeld

Damit modellieren die Normspektralwertfunktionen von 1964 die Farbwahrnehmung im 10° -Beobachterfeld deutlich besser, als die Normspektralwertfunktionen von 1931 die Farbwahrnehmung im 2° -Beobachterfeld abbilden. Allerdings liegen auch hier die Farbraumfehler deutlich über der Wahrnehmungsschwelle. Daher wurden auch für die Modellierung der Farbwahrnehmung im 10° -Beobachterfeld die Spektralwertfunktionen basierend auf den Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE-Empfehlung CIE170:1-2006 für einen 10° -Beobachter untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass zwar für einige Versuchsszenarien eine Verringerung der Farbraumfehler erreicht werden kann. Aber die Farbraumfehler $\Delta u'v'_{G\text{-Referenz}}$

Referenz (CIE2006-10°) liegen für die Versuchsszenarien VS1, VS3 und VS4 weiterhin über der Wahrnehmungsschwelle mit Werten bis zu 0,005.

4.2 Neue Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° für einen 2°- und einen 10°-Beobachter

Nachdem sich bei allen anerkannten Spektralwertfunktionen Farbdifferenzen zwischen den visuell gleich wahrgenommenen Spektren ergaben, wurden zwei neue Sätze Spektralwertfunktionen entwickelt. Diese wurden empirisch mit Hilfe der zuvor erstellten Datenbasis ermittelt und basieren auf den Sehzapfen-Grundfunktionen der CIE Empfehlung von 2006. Lediglich die S-Zapfen-Empfindlichkeitsfunktion wurde um 3 nm hin zu niedrigeren Wellenlängen verschoben. Mit den Gleichungen (1) und (2) können aus den modifizierten $l(\lambda)$ -, $m(\lambda)$ - und $s(\lambda)$ -Funktionen die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° und 2006-TUIL-10° (Abbildung 6) ermittelt werden.

$$\begin{bmatrix} X_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \\ Y_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \\ Z_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,93556 & -1,39194 & 0,35649 \\ 0,68990 & 0,34832 & 0 \\ 0 & 0 & 1,92567 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} l_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \\ m_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \\ s_{2006-TUIL-2^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \\ Y_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \\ Z_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,91920 & -1,32333 & 0,43000 \\ 0,69284 & 0,34968 & 0 \\ 0 & 0 & 2,13728 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} l_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \\ m_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \\ s_{2006-TUIL-10^\circ}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (2)$$

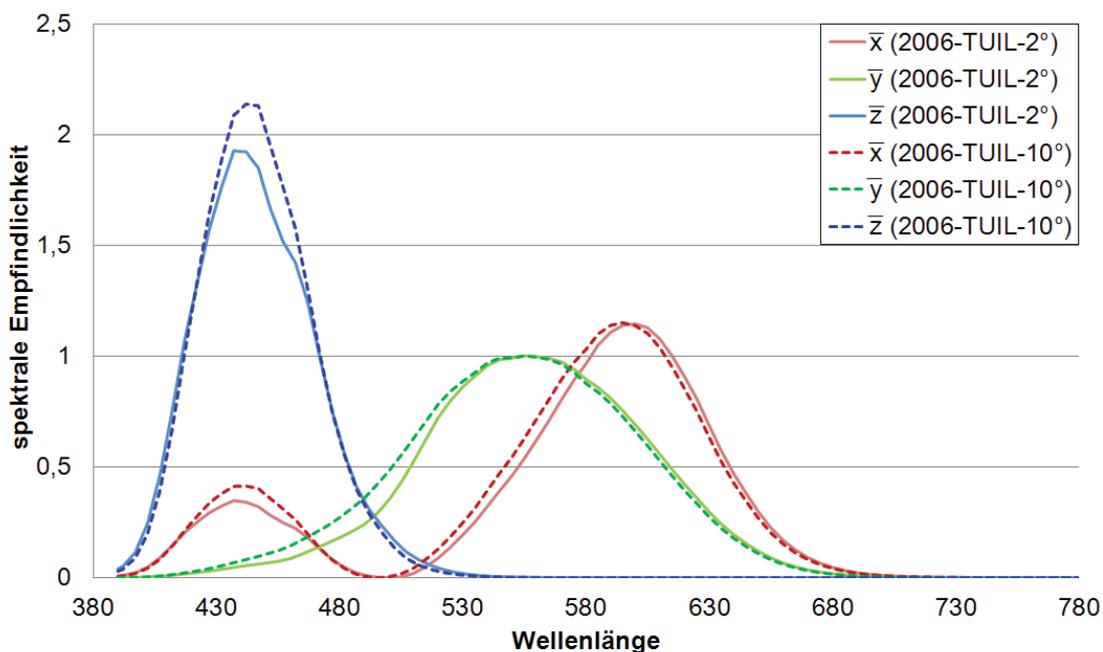


Abbildung 6: Spektrale Empfindlichkeitsfunktionen 2006-TUIL-2° und 2006-TUIL-10° für einen dreißig-jährigen Standardbeobachter

Die resultierenden Farbraumfehler, die unter Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen ermittelt wurden, sind in Abbildung 5 im Vergleich zu den Farbraumfehlern unter Verwendung der anerkannten Spektralwertfunktionen aufgetragen. Mit Hilfe der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° können die Farbraumfehler auf eine mittlere Farbdifferenz von $\Delta u'v'_{K/G\text{-Referenz}} = 0,002$ reduziert werden und liegen damit für beinahe alle untersuchten Versuchsszenarien im Bereich der Wahrnehmungsschwelle. Die neuen Spektralwertfunktionen eignen sich demnach gut für die hier untersuchten Spektralzusammensetzungen, um visuell gleich wahrgenommene Spektren auf denselben Farbort abzubilden.

5 Validierung der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° mittels Farbdifferenzbewertungen

Die Relevanz der neuen Spektralwertfunktionen für die korrekte Modellierung des Farbsehens wurde mit Hilfe von Farbdifferenzbewertungen validiert. Dabei bewerteten die Probanden die Farbdifferenz zwischen zwei Testfeldern auf einer psychometrischen Rangskala mit Werten von 0 bis 8. Die Skala umfasst eine Abstufung von 'nicht wahrnehmbar' (0), 'gerade wahrnehmbar' (2), 'gering' (4), 'deutlich' (6) bis 'sehr groß' (8). Die Spektren der Testfelder wurden mit Hilfe der unterschiedlichen Spektralwertfunktionen auf denselben Farbort eingestellt. Die Untersuchungen wurden mit neun unterschiedlichen Versuchsszenarien an acht verschiedenen Farbörtern mit allen sechs Spektralwertfunktionen durchgeführt. Dabei wurden die Spektralwertfunktionen CIE1931, CIE2006-2° und 2006-TUIL-2° im 2°-Beobachterfeld getestet, während die Spektralwertfunktionen CIE1964, CIE2006-10° und 2006-TUIL-10° in einem 10°-Beobachterfeld zum Einsatz kamen.

5.1 Wahrnehmbarkeit der Verringerung der Farbraumfehler

Zunächst wurde mit denselben Versuchsszenarien VS1 bis VS7, an den gleichen Farbörtern und unter denselben Versuchsbedingungen wie bei den Abgleichversuchen überprüft, ob die rechnerisch signifikanten Verringerungen der Farbraumfehler tatsächlich zu einer signifikanten Verringerung der wahrgenommenen Farbdifferenzen führen. 19 der 20 Probanden aus den Abgleichuntersuchungen nahmen an den Tests teil.

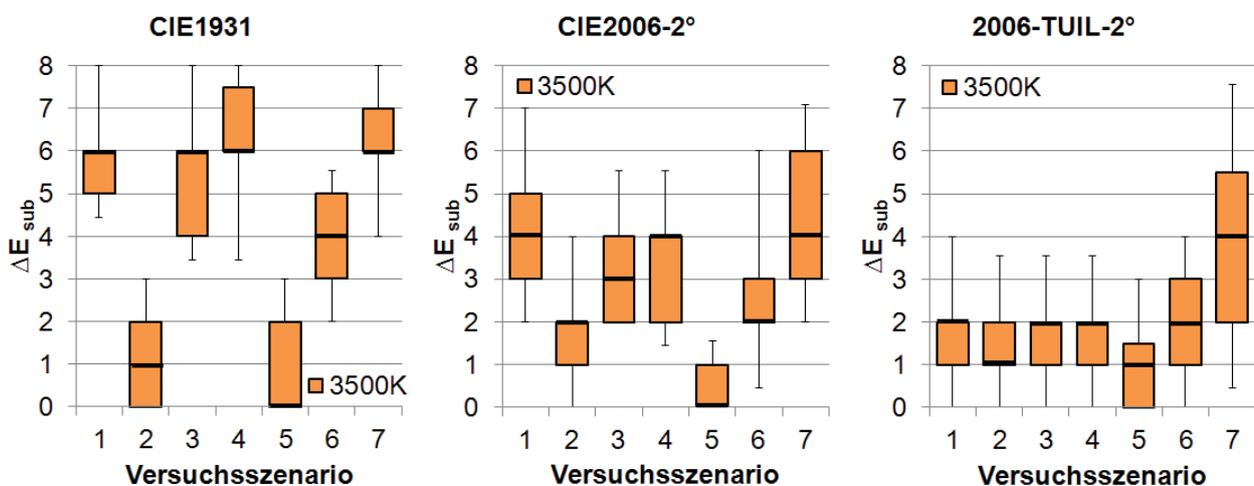
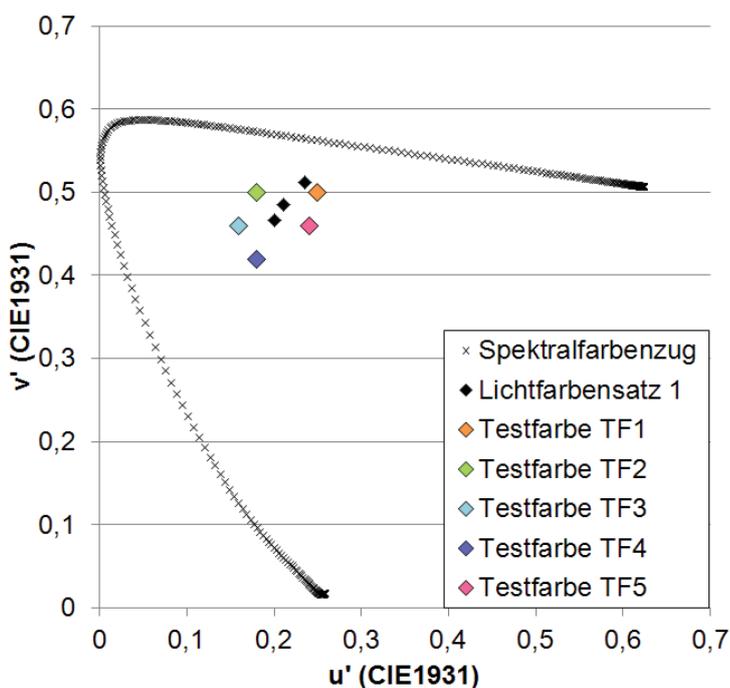


Abbildung 7: Box-Whisker-Plots der Farbdifferenzbewertungen der 19 Testpersonen für die Untersuchungen im 2°-Beobachterfeld bei 3500 K

Das Ergebnis dieser Untersuchungen zeigte, dass die Mediane der wahrgenommenen Farbdifferenzen unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° auf Werte im Bereich der Wahrnehmungsschwelle ($\Delta E_{\text{sub}} = 0..2$) reduziert werden konnten. Unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen wurden die Farbdifferenzen dagegen im Mittel als 'klein' bis 'deutlich' ($\Delta E_{\text{sub}} = 4..6$) bewertet. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Box-Whisker-Plots der Farbdifferenzbewertungen der 19 Testpersonen für die Untersuchungen im 2°-Beobachterfeld bei 3500 K. Die visuell wahrgenommenen Farbdifferenzen konnten unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° signifikant verringert werden (Signifikanzniveau: $\alpha = 0,025$). Damit wurde gezeigt, dass metamere Spektren, die mit den neuen Spektralwertfunktionen ermittelt werden, bei den Probanden tatsächlich denselben Farbeindruck hervorrufen.

5.2 Validierung der neuen Spektralwertfunktionen an anderen Farbörtern

Die neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° wurden empirisch auf Basis der Daten aus den Abgleichergebnissen ermittelt. Mit den zuvor beschriebenen Farbdifferenzbewertungen wurde lediglich die Wahrnehmbarkeit der erzielten Reduzierung der Farbdifferenzen untersucht. Daher wurde in einem weiteren Versuch getestet, ob die neuen Spektralwertfunktionen auch bei anderen Farbörtern unter Verwendung anderer Spektralzusammensetzungen ihre Gültigkeit beibehalten.



Mit drei Versuchsszenarien VS1, VS8 und VS9 (vgl. Tabelle 1) wurden an fünf Farbörtern für gesättigte Lichtfarben Farbdifferenzbewertungen durchgeführt. Die untersuchten Farbörter sind in Abbildung 8 dargestellt. Dabei wurden die beiden Testfelder mit Hilfe der Spektralwertfunktionen der CIE und 2006-TUIL-2°/10° aneinander angepasst. Die Versuchsbedingungen wurden wiederum so gewählt, dass die Leuchtdichte der Umgebungsbeleuchtung 70 cd/m² und auf den Testflächen ca. 132 cd/m² betrug.

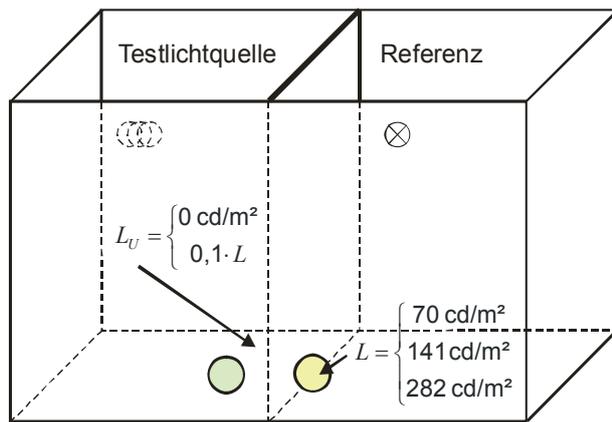
Abbildung 8: Farbörter der Untersuchungen zur Validierung der neuen Spektralwertfunktionen an Farbörtern außerhalb des Planckschen Kurvenzugs

Die Untersuchungen ergaben, dass auch für gesättigte Lichtfarben unter Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° die geringeren Farbdifferenzen wahrgenommen wurden. Die wahrgenommenen Farbdifferenzen unter Verwendung der Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° lagen im Bereich der Wahrnehmungsschwelle ($\Delta E_{\text{sub}} = 0..2$). Für einen Großteil der Versuchsszenarien konnte auch hier eine signifikante Verringerung der wahrgenommenen Farbdifferenzen durch die Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen verzeichnet werden. Damit konnte die Relevanz der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° für die Modellierung der Farbwahrnehmung von gesättigten Lichtfarben nachgewiesen werden.

5.3 Validierung mit früheren Untersuchungen

In früheren Untersuchungen an der TU Ilmenau wurden Probandenversuche mit verschiedenen Lichtquellen bei verschiedenen Lichtfarben (CCT) und Beleuchtungsniveaus (L) mit einem Lichtsimulator für ein 2°-Gesichtsfeld durchgeführt und der Einfluss von Umgebungshelligkeit (L_U) auf den Abgleich identischer Lichtfarben untersucht [3].

Dafür wurden zwei nebeneinanderliegende Boxen im Inneren mit unterschiedlichen Lichtquellen beleuchtet und durch zwei Öffnungen mit einem Beobachtungswinkel von etwa 2° durch Probanden betrachtet (siehe Abbildung).



Versuchssituation	Testlichtquelle	Referenz	CCT
V1	RGB-LEDII	RGB-LEDII	5400K
V2	RGB-LEDII	HGL+F	5400K
V3	RGB-LEDI	HGL+F	5400K
V4	RGB-LEDI	HGL	2800K

Legende:

RGB-LED I (634 nm, 520 nm, 460 nm)

RGB-LED II (624 nm, 500 nm, 460 nm)

HGL+F Halogenglühlampe mit Tageslichtfilter

Abbildung 9: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus links und Überblick über die Versuchsparameter rechts [3]

Untersucht wurden die relativen Spektralverteilungen der verwendeten Test- und Referenzlichtquellen für die einzelnen Versuchssituationen gemäß Abbildung

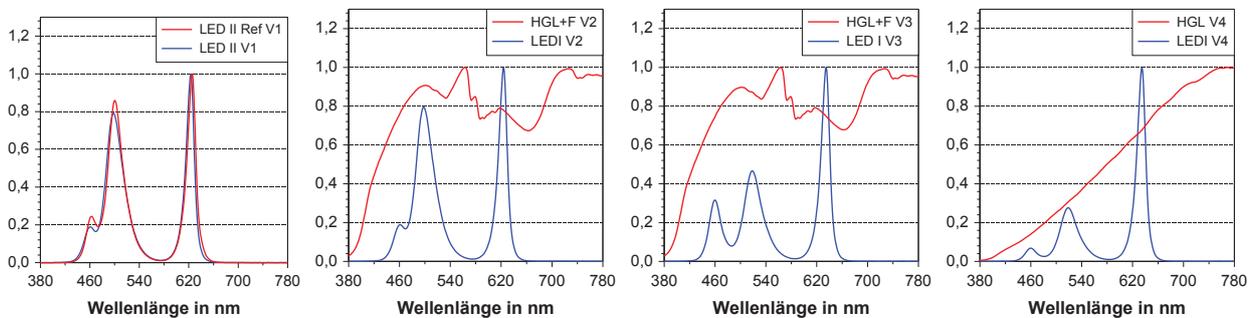


Abbildung 10: Relative Spektralverteilungen der verwendeten Test- und Referenzlichtquellen für die Versuchssituationen V1 bis V4 [3]

Die Probanden hatten die Aufgabe, die Testlichtquelle subjektiv hinsichtlich Lichtfarbe und Helligkeit an die Referenzbeleuchtung anzupassen. Jede Versuchssituation wurde von den Probanden dreimal abgeglichen. An der Untersuchung nahmen 15 normalfarbsichtige Probanden (davon 7 Frauen) im Alter zwischen 17 und 30 Jahren ($23,7 \pm 2,5$ Jahre) teil.

Sowohl die messtechnisch identische Lichtfarben der Ausgangssituation, als auch die von den Probanden als identisch eingestellte Lichtfarben wurden mit dem Spektralradiometer CS-2000 von Minolta vermessen. Für diese Daten wurden die Spektralwertfunktionen CIE1931, CIE2006-2° und 2006-TUIL-2° getestet. Die Ergebnisse für das Beleuchtungsniveau $L = 141 \text{ cd/m}^2$ sind in den Diagrammen in Abbildung dargestellt.

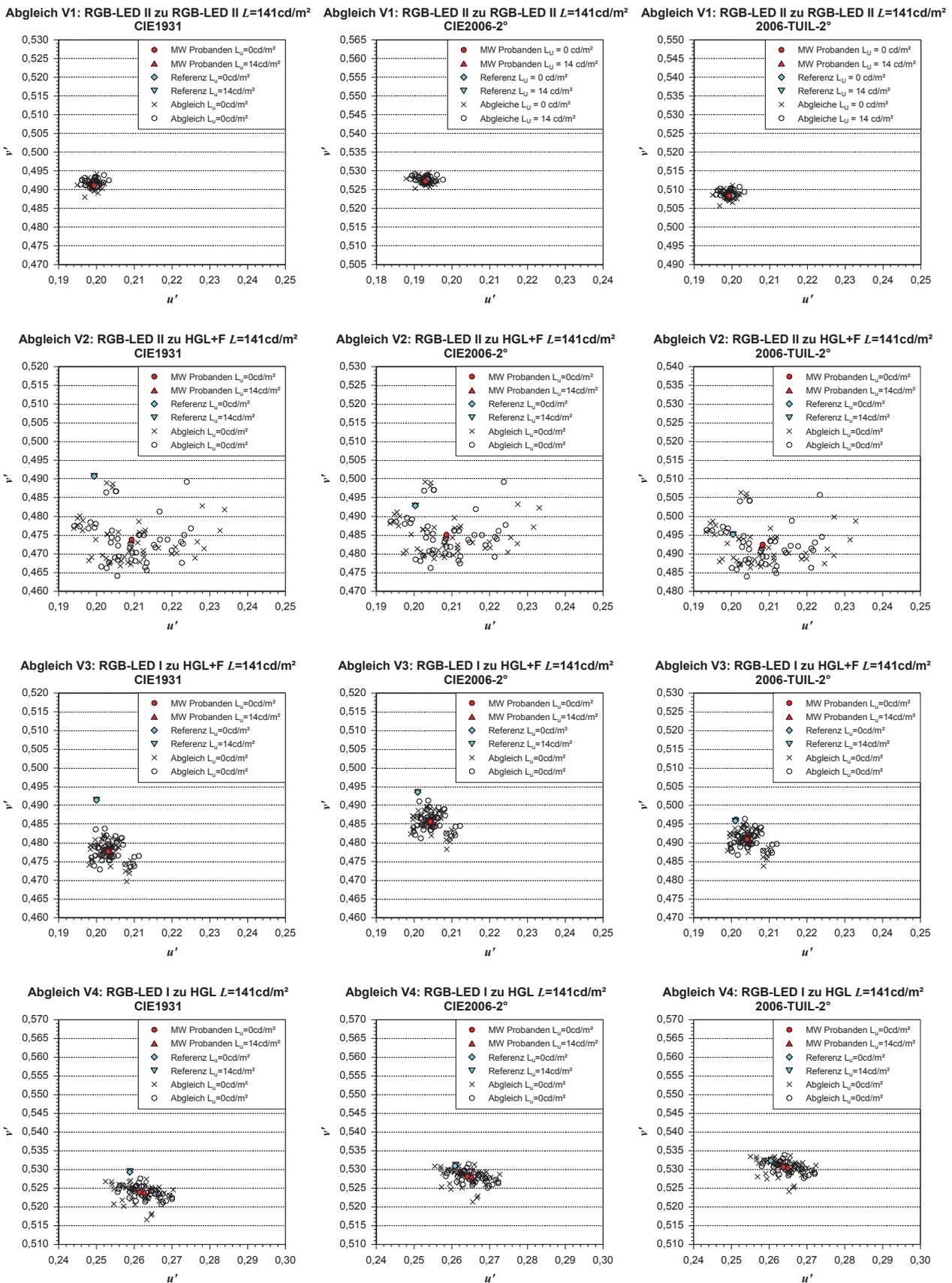


Abbildung 11: Ergebnisse der subjektiven Gleichheit mit verschiedenen Spektralwertfunktionen

Für den Abgleich identischer Spektralverteilungen (V1) zeigen sich keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Spektralwertfunktionen. In der Versuchsreihe V4 werden bei der Bewertung der Ergebnisse mit der Spektralwertfunktionen CIE2006-2° und 2006-TUILL-

2° vergleichbare Ergebnisse erreicht, die etwas geringer ausfallen als bei der Anwendung der Normspektralwertfunktion CIE1931. Deutlicher sind die Verbesserungen beim Abgleich mit Spektralverteilungen, die deutliche Unterschiede aufweisen (V2 und V3). Hier kann durch die Anwendung der Spektralwertfunktionen CIE2006-2° und 2006-TUIL-2° im Vergleich zur Normspektralwertfunktion CIE1931 der Farbraumfehler deutlich verringert werden, wobei mit der neuen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° die besten Ergebnisse erzielt werden. In Tabelle 4 sind die Mittelwerte der Farbraumfehler über alle Versuchssituationen zusammengefasst.

Tabelle 4: Mittelwerte der Farbraumfehler $\Delta u'v'$ (Farbabstand zwischen Referenz und Mittelwert aus den Abgleichen von 15 Probanden) für alle Versuchssituationen bei Anwendung verschiedener Spektralwertfunktionen

Versuchssituation		V1	V2	V3	V4
L = 70 cd/m ²	L _U = 0 cd/m ²	0,0009	0,0211	0,0163	0,0065
L = 70 cd/m ²	L _U = 7 cd/m ²	0,0008	0,0205	0,0147	0,0071
L = 141 cd/m ²	L _U = 0 cd/m ²	0,0007	0,0196	0,0141	0,0060
L = 141 cd/m ²	L _U = 14 cd/m ²	0,0009	0,0197	0,0141	0,0068
L = 282 cd/m ²	L _U = 0 cd/m ²	0,0008	0,0173	0,0115	0,0051
L = 282 cd/m ²	L _U = 28 cd/m ²	0,0006	0,0190	0,0134	0,0062
Versuchssituation		V1	V2	V3	V4
L = 70 cd/m ²	L _U = 0 cd/m ²	0,0004	0,0122	0,0105	0,0047
L = 70 cd/m ²	L _U = 7 cd/m ²	0,0005	0,0119	0,0092	0,0055
L = 141 cd/m ²	L _U = 0 cd/m ²	0,0006	0,0113	0,0086	0,0043
L = 141 cd/m ²	L _U = 14 cd/m ²	0,0004	0,0114	0,0086	0,0053
L = 282 cd/m ²	L _U = 0 cd/m ²	0,0007	0,0093	0,0064	0,0038
L = 282 cd/m ²	L _U = 28 cd/m ²	0,0004	0,0107	0,0080	0,0050
Versuchssituation		V1	V2	V3	V4
L = 70 cd/m ²	L _U = 0 cd/m ²	0,0004	0,0082	0,0076	0,0040
L = 70 cd/m ²	L _U = 7 cd/m ²	0,0006	0,0083	0,0065	0,0049
L = 141 cd/m ²	L _U = 0 cd/m ²	0,0008	0,0083	0,0058	0,0037
L = 141 cd/m ²	L _U = 14 cd/m ²	0,0008	0,0083	0,0060	0,0048
L = 282 cd/m ²	L _U = 0 cd/m ²	0,0010	0,0071	0,0040	0,0035
L = 282 cd/m ²	L _U = 28 cd/m ²	0,0007	0,0078	0,0053	0,0046

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden neue Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/10° vorgestellt, die eine korrekte Modellierung der Farbwahrnehmung der untersuchten Probandengruppe erlauben. Diese sind für die korrekte Bewertung der farbmtrischen Eigenschaften von LED-Lichtquellen geeignet und ermöglichen damit eine korrekte Charakterisierung von LED-Lichtquellen und damit auch die korrekte Ansteuerung von LED-Beleuchtungssystemen.

Wichtig wäre es diese neuen Spektralwertfunktionen mit einer größeren Probandenanzahl und in realen Beleuchtungssituationen weiter zu verifizieren. Zu beachten ist, dass alle Spektralwertfunktionen immer nur für eine definierte Beobachterfeldgröße gelten. Da bei der homogenen Flächenbeleuchtung meistens eine Fläche unter verschiedenen Beobachterwinkeln betrachtet wird, muss neben der Verwendung der korrekten Spektralwertfunktionen darauf geachtet werden den Einfluss der Beobachterfeldgröße zu minimieren. Dies kann erreicht werden, indem man die miteinander verwendeten Spektren speziell selektiert. Zu diesem Zweck kann der „Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit“ [2] angewandt werden, der von einer der Autorinnen auf der CIE-Tagung in Paris 2013 vorgestellt wurde. Weitere kritische Faktoren die untersucht werden sollten, sind die Einflüsse großer Interbeobachterstreuungen und der Einfluss des Alters auf das Farbsehen. Hier muss untersucht werden, ob die in der CIE-Empfehlung CIE170:1-2006 modellierten Alterseinflüsse ausreichen. Diese könnten einfach in neuen Spektralwertfunktionen mit eingerechnet werden.

7 Literatur

- [1] TC1-36, CIE170-1:2006: Fundamental Chromaticity Diagram with Psychological Axes - Part 1, Commission Internationale de l'Eclairage, 2006
- [2] Polster, S., Schierz, C.: Towards a Field Size Independent Metamerism, Proceedings of CIE Centenary Conference „Towards a New Century of Light“, 2013, Paris, S.456-464
- [3] Hofmann, F.; Bieske, K., Schierz, C.: Subjektive Bewertung von Lichtfarbunterschieden für den 2°-Normalbeobachter bei messtechnisch identischer Beleuchtung, Tagungs-CD Tagung „Licht 2010“, 2010, Wien

Towards a Field Size Independent Metamerism

Saskia Polster, Christoph Schierz
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

Proceedings of the CIE Centenary Conference Paris 2013, S. 456-464

Abstract

The influence of the field size on the perception of light colours is a well-known fact. With the use of small packed LED light sources for the illumination of large surface areas this topic advances to be ever more important in lighting applications. The majority of the lighting industry still solely relies on colour measurement equipment using the 2° standard CIE observer. Although almost all practical lighting applications illuminate large surfaces the influence of the field size on colour perception is mainly neglected. This paper gives a definition of a “metamerism index for field size independence” as an indicator for the colour difference that occurs between two metameric spectra due to a change in field size from 2° to 10° view angle. Also a method for calculating this colour shift will be introduced. The results of a study evaluating the “metamerism index for field size independence” are presented. The study was performed with 18 observers using seven different test settings of spectral power distributions at three colour temperatures.

Keywords: Colour perception, Colour matching functions, field size, Metamerism, view angle

1 Introduction

One of the outstanding characteristics of LED light sources is their compact size, which allows the integration of light sources in confined spaces. Areas that have formerly been lit by one lamp are now lit by a large number of small light sources. There are two ways of incorporating LEDs in order to light large areas. One way is to use only white LEDs of a defined colour. In that case the LEDs have to be selected so that they emit exactly the same light colour in order to give a homogenous impression of the lighted area. The other way is to use sets of LEDs that form a colour gamut in which all colours can be mixed by controlling the LED output of every single LED with a mixing algorithm. As the spectra of LED light sources always vary to a certain extent it is important to have a precise way to describe their colour properties. Up to now most lighting industry companies use the CIE1931 2° standard observer to characterize the colour of LEDs no matter what the field size of the lighting application is. Using a large number of single light sources with differing spectral power distributions the question arises which characteristics the different light sources need to conform to in order to let the surface appear homogenous in terms of colour from any point of view.

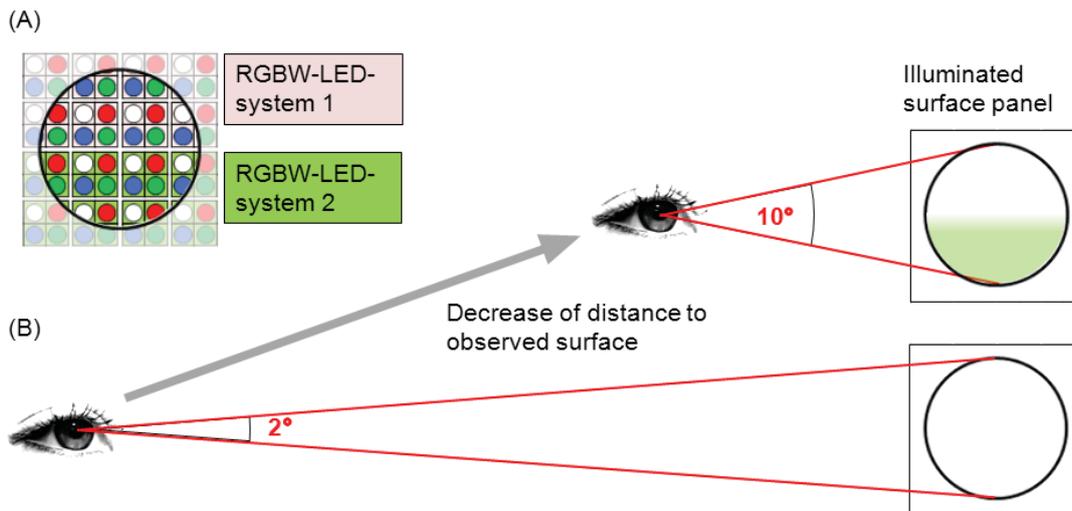


Figure 1: (A) Illustration of LED-structure behind lit surface panel (upper part and lower part are lit by two different LED-combinations) (B) Schematic illustration of appearing colour difference due to a change in field size by a mere decrease of the distance between observer and illuminated surface area

Spectra of the same colour impression having different spectral power distributions are defined as metamere spectra (Wyszecki 2000). However this definition is restricted to colour stimuli of a defined observer. When implementing a large illuminated area the goal has to be to create a homogenous colour impression from whatever distance observed. That means the same cluster of LEDs with possibly different spectral power distributions has to give a uniform colour appearance under any given field size. Figure 1 illustrates the correlation between the colour appearance of two adjacent LED-Systems and the observer field size. Considering the homogenous colour appearance of large surfaces the mere definition of metamere spectra is not sufficient. An index is required allowing the user to estimate the risk of colour shifts due to a change in observer field size. In the following this index, referred to as “metamerism index for field size independence”, will be introduced. Provided that there are colour spaces in which metamere spectra are mapped to the same colour coordinates for a given observer field size, the calculation of the colour shift due to a change in the observer field size can be realised. With this it will be possible to test any sets of spectral power distributions for their compatibility for a combined utilization in illumination applications.

2 Colour matching functions

In order to calculate the visual colour shift due to a change in the observer field size it is necessary to work with colour matching functions that meet the definition of metameres; i.e. giving the same tristimulus values for those stimuli that match in colour for a defined observer (Wyszecki 2000). In the technical report CIE170-1:2006 (CIE 2006) the technical committee TC1-36 published ‘estimates of cone fundamentals for the normal observer, ranging in viewing angle from 1° to 10°’ (CIE 2006). As long as no other reliable set of colour matching functions is established for the relevant population these are the colour matching functions to be applied.

For the following experiment the colour vision of the subjects was analysed in a preliminary study. The results of that study will be presented in another paper. A set of colour matching functions derived from the cone fundamentals from CIE170-1:2006 were assessed to best fit the set of 18 subjects both for an observer field size of 2° and 10°. The colour matching

functions were adjusted by shifting the blue cone fundamental 3 nm to shorter wavelengths and then deriving colour matching functions from those cone fundamentals. These colour matching functions are referred to in the following paper as CMF-TUIL-2° and CMF-TUIL-10°. The examined field size effect has been restricted to observer field sizes between a 2° observer field and a 10° observer field. The restriction to a 2° observer field is due to the fact that the 2° colour matching functions are most common in use. The limitation on a 10° observer field is due to the maximum field size of the given set of cone fundamentals by the CIE170-1:2006. Furthermore results of preliminary studies showed that the colour shift for observer field sizes over 10° decreases strongly.

The calculation model is applicable for any given set of 2°- and 10°-colour matching functions.

3 Metamerism index for field size independence

Closely based on the calculation model for the special metamerism index (CIE 1989), the index presented in this paper is supposed to give an indication on how much influence a change in the observer field size has on the colour perception. In contrast to the special metamerism index for a change in observer the index presented here is calculated using an adaptation of the $u'v'$ -colour space from 1976. Not to use newer colour space models like CIELAB or CIECAM02 is due to the fact that for light colours a reference white cannot be defined. There are two ways to calculate the introduced “metamerism index for field size independence”. First there is the straight forward approach to calculate a matching pair of metameric spectra in the 2° field for a certain colour coordinate and then to calculate the colour difference between those spectra using the 10° CMFs. The other way to determine the index is to take the difference spectra between a pair of metameric spectra for a 2° field size and make use of a weighing function for colour shifts in the u' - and v' -coordinate. Either way the resulting colour difference $\Delta u'v'$ can be interpreted as an index for the compatibility of two spectra to keep their metameric appearance independent from the observer field size. The higher the index the more problems will occur in a combined utilisation of the analysed spectra. The most useful application will be to calculate the “metamerism index for field size independence” for two compared RGBW-LED-systems. Hence the calculation methods will be described with the help of two RGBW-systems as input data.

3.1 Direct calculation

Figure 2 gives a schematic illustration of the calculation steps for the determination of the “metamerism index for field size independence”. Using the direct approach of calculation the first task is to determine the RGBW-composite-spectra $S_{1\text{mix}}(\lambda)$ and $S_{2\text{mix}}(\lambda)$ for both RGBW-systems for a given point of interest in the $u'v'$ -colour space based on the CMF-TUIL-2°. The portions of the red, green, blue and white LED needed to compose the correct composition spectrum have to be calculated. The composite-spectra $S_{1\text{mix}}(\lambda)$ and $S_{2\text{mix}}(\lambda)$ are then per definition metameric for a 2° observer field and will therefore be mapped to the same colour coordinate in the $u'v'$ -colour space based on the CMF-TUIL-2°. Then the colour coordinates of both composite-spectra are calculated using the CMF-TUIL-10° colour matching functions and the colour difference is determined. This colour difference is directly proportional to the colour shift due to a change in the observer field size for the given set of RGBW-composite-spectra and is referred to as “metamerism index for field size independence”.

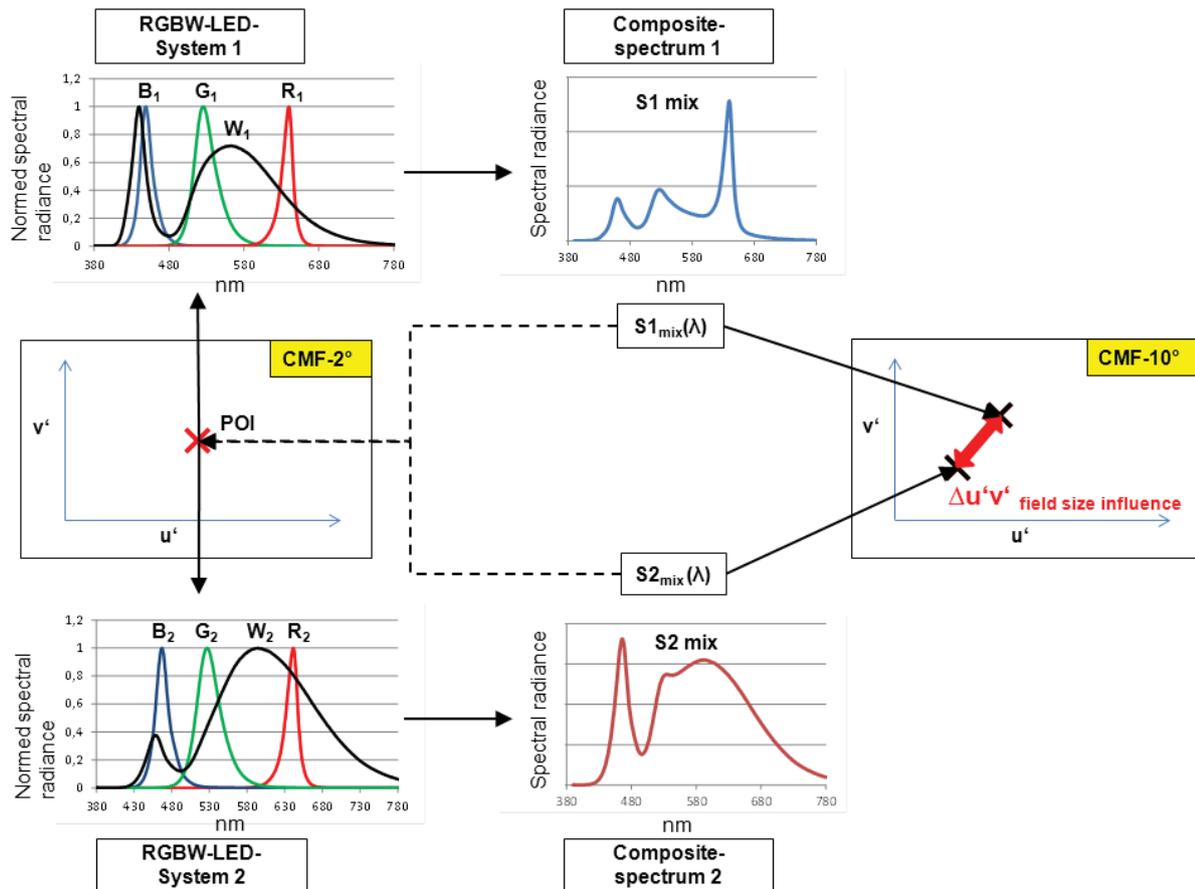


Figure 2: First a point of interest is defined for which the field size influence is to be determined. Then in both RGBW-systems the adequate proportions of RGBW-values are estimated for the resulting composite spectra $S1_{mix}(\lambda)$ and $S2_{mix}(\lambda)$ to be mapped to the POI colour coordinate. Then the $u'v'$ colour coordinates of the composite spectra $S1_{mix}(\lambda)$ and $S2_{mix}(\lambda)$ are calculated using the CMF-TUIL-10° colour matching functions. The resulting colour difference $\Delta u'v'_{2^\circ-10^\circ \text{ calc}}$ can be interpreted as the new “metamerism index for field size independence”.

3.2 Calculation with deviation-spectrum

Another possibility to calculate the colour shift due to the field size influence on colour vision is to establish functions for the spectral sensitivity of the u' - and v' -shift on spectral differences between the compared spectra. The advantage of this calculation method is the possibility to visualise which spectral wavelengths are most sensible to differences in the compared spectra, as illustrated in figure 3. It emphasises the fact that it is utmost important to always include the whole spectrum into ones considerations. There are no such things as negligible wavelength ranges that do not contribute to the shift in colour perception due to the observer field size.

The determination of two corresponding composite spectra in the $u'v'$ -colour space based on the CMF-TUIL-2° is analogue to the direct calculation described above. The difference however lies in the calculation of the colour difference between the two composite spectra observed in a 10° observer field. The spectral sensitivities of the u' - and the v' -shift to spectral differences between the comparative spectra for a specific colour coordinate can be calculated as a function of the $X_{TUIL-10^\circ}$, $Y_{TUIL-10^\circ}$, $Z_{TUIL-10^\circ}$ values of the reference spectrum using equations (1) and (2):

$$\Delta u'_{sens}(\lambda) = \frac{1}{(X_{TUIL-10^\circ} + 15Y_{TUIL-10^\circ} + 3Z_{TUIL-10^\circ})^2} [(60Y_{TUIL-10^\circ} + 12Z_{TUIL-10^\circ}) * \bar{x}_{TUIL-10^\circ}(\lambda) + (-60X_{TUIL-10^\circ}) * \bar{y}_{TUIL-10^\circ}(\lambda) + (-12X_{TUIL-10^\circ}) * \bar{z}_{TUIL-10^\circ}(\lambda)] \quad (1)$$

$$\Delta v'_{sens}(\lambda) = \frac{1}{(X_{TUIL-10^\circ} + 15Y_{TUIL-10^\circ} + 3Z_{TUIL-10^\circ})^2} [(-9Y_{TUIL-10^\circ}) * \bar{x}_{TUIL-10^\circ}(\lambda) + (9X_{TUIL-10^\circ} + 27Z_{TUIL-10^\circ}) * \bar{y}_{TUIL-10^\circ}(\lambda) + (-27Y_{TUIL-10^\circ}) * \bar{z}_{TUIL-10^\circ}(\lambda)] \quad (2)$$

where

$\Delta u'_{sens}(\lambda)$	is the spectral sensitivity of the u'-shift to spectral differences between the comparative spectra dependent;
$\Delta v'_{sens}(\lambda)$	is the spectral sensitivity of the v'-shift to spectral differences between the comparative spectra dependent;
$X_{TUIL-10^\circ}, Y_{TUIL-10^\circ}, Z_{TUIL-10^\circ}$	are the tristimuli values of the reference composite spectrum calculated with the CMF-TUIL-10° colour matching functions
$\bar{x}_{TUIL-10^\circ}, \bar{y}_{TUIL-10^\circ}, \bar{z}_{TUIL-10^\circ}$	are the CMF-TUIL-10° colour matching functions derived from adjusted cone fundamentals;
λ	is the wavelength;

The colour difference due to a change in field size from a view angle of 2° to 10°, $\Delta u'v'_{2^\circ-10^\circ calc}$, can then be calculated with equation(5):

$$\Delta u' = \int \Delta u'_{sens}(\lambda) * [S1_{mix}(\lambda) - S2_{mix}(\lambda)] d\lambda \quad (3)$$

$$\Delta v' = \int \Delta v'_{sens}(\lambda) * [S1_{mix}(\lambda) - S2_{mix}(\lambda)] d\lambda \quad (4)$$

$$\Delta u'v'_{2^\circ-10^\circ calc} = \sqrt{\Delta u'^2 + \Delta v'^2} \quad (5)$$

where

$S1_{mix}(\lambda)$ and $S2_{mix}(\lambda)$ are the comparative spectra to be analysed for their compatibility;

The illumination level has so far not been included in the observations as the main interest lay in the arising colour shift.

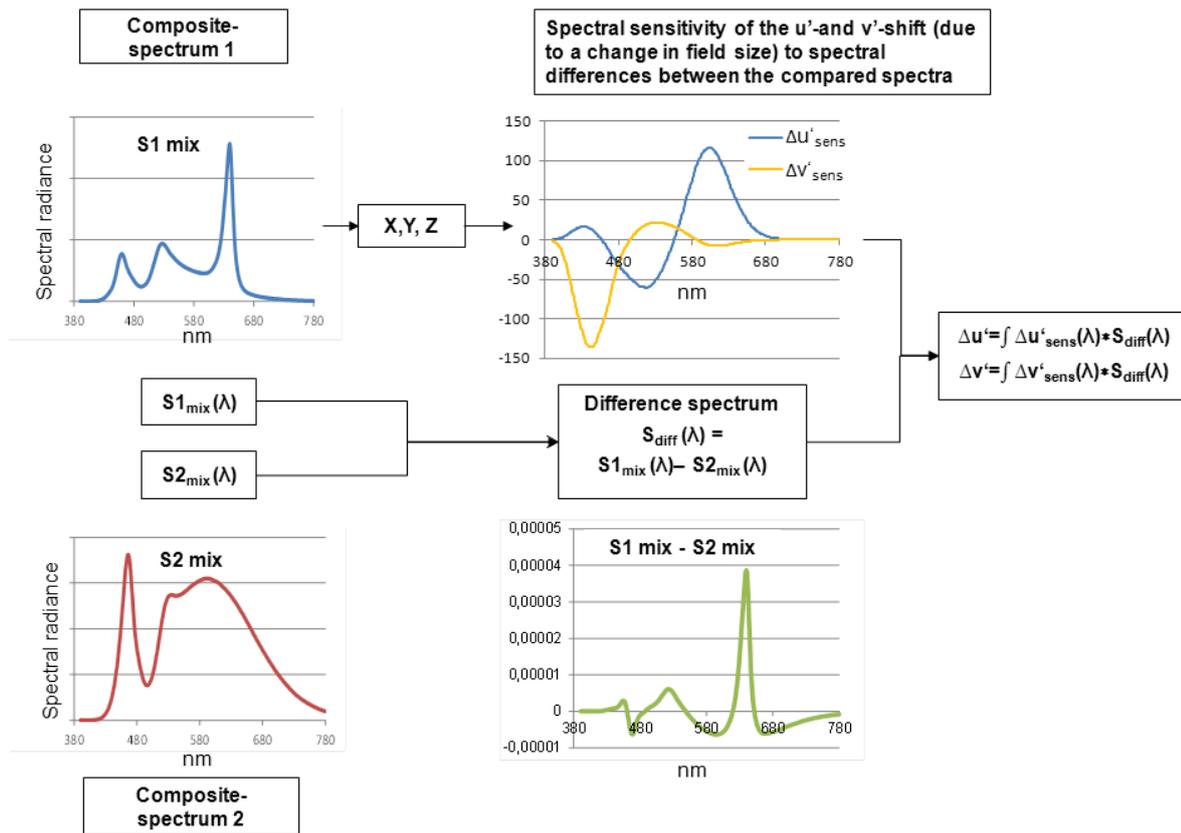


Figure 3: Calculation steps for the determination of the metamerism index for field size independence by use of spectral sensitivity functions for the sensitivity of the u'v'-shift to spectral differences between the compared spectra.

4 Experimental evaluation of perceived colour shift



Figure 4: Photographs of the test setup with horizontally divided test field

An experiment was conducted to evaluate the degree of accuracy of the above introduced “metamerism index for field size independence”. In the experiment 18 subjects, 9 male and 9 female subjects aged 23 to 45, were to evaluate the colour differences between two backlit test fields. Both test fields were adjusted to have the same luminance level calculated with the luminance efficiency function derived from the cone fundamentals from CIE170-1:2006 for a 10° observer. Figure 4 shows photographs of the test setup and the horizontally divided

test field. The compositions of both the spectrum in test field 1 and the spectrum in test field 2 were adjusted for the resulting spectral power distributions to have the same colour coordinates in the $u'v'$ -colour-space based on the CMF-TUIL-2° colour matching functions. The subjects observed and assessed the divided test field under a view angle of 10°. Therefore the evaluated colour difference should correspond to the colour shift due to a change in the observer field size from 2° to 10°.

The subjects evaluated seven different sets of spectral power distributions at three different colour coordinates on the Planckian locus with colour temperatures of 3500K, 5000K and 6500K. The spectral power distributions ranged from RGBW-spectra to RGB-spectra as well as a completely filled mix spectrum composed of eight LEDs. Table 1 gives an overview of the compared spectra in the seven test settings. Care was taken to include a vast range of spectral differences between the different test light sources in the test. The surround was adapted to have the same colour temperature as the test stimuli. Before the subjects started to evaluate the seven colour differences of the same colour temperature they adapted to the surround for 5 minutes. In the examination the subjects were asked to close their eyes during the transition from one test setting to the next and wait a minimum of 5 seconds before giving their judgement of the colour difference. The evaluation of the perceived colour difference between test field 1 and test field 2 was based on a scale, ranging from 0 (not noticeable) to 2 (just noticeable) to 4 (small) to 6 (considerable) to 8 (large). The subjects were also allowed to use integer values in between the labelled values. Before the subjects started the evaluation they were allowed to successively look at all seven colour differences in order to get an impression of the dynamic range of the presented colour differences

Table 1: Overview of the test settings comparing different spectral power distributions

	Referenzlichtquelle	Testlichtquelle
Test setting 1	TL1_RGBW	TL2_RGBW
Test setting 2	TL1_RGB	TL2_RGB
Test setting 3	TL1_RGBW+Cyan	TL2_RGBW
Test setting 4	TL3_8LED	TL1_RGBW
Test setting 5	TL3_8LED	TL2_RGBW
Test setting 6	TL3_8LED	TL1_RGB
Test setting 7	TL3_ACB	TL1_RGB

Table 2: LED-combinations used for the different test light sources

	description	λ_{peak}			
		white (blue component)	red/amber	green/cyan	blue
TL1	Cool white LED and red, green, blue components	440nm	643nm	535nm	449nm
TL2	Cool white LED and red, green, blue components	460nm	640nm	525nm	447nm
TL3_8LED	mix spectrum of 8 LEDs with minimised dips and peaks				
TL3_ACB	amber, cyan and blue components	-	596nm	497nm	467nm
		half-power bandwidth			
TL1	White LED and red, green, blue components	-	18nm	36nm	23nm
TL2	White LED and red, green, blue components	-	17nm	32nm	18nm
TL3_8LED	mix spectrum of 8 LEDs with minimised dips and peaks				
TL3_ACB	amber, cyan and blue components	-	15nm	27nm	20nm

5 Results

For all 21 combinations of three colour temperatures and seven test settings the median of the 18 judgements by the subjects was determined. The results of the experiment are shown in Figure 6. The diagrams on the left show the Box-Plots for all test settings at three colour temperatures 3500K, 5000K and 6500K with minimum and maximum values displayed as whiskers. Focussing on the values of the median it can be noted that the spectral power distributions of the compared spectra definitely take influence on the colour shift due to a change in observer field size. For several test settings the colour differences were perceived to be larger than 4 ('small') on the scale. Those spectra would therefore be incompatible for a shared utilisation in the illumination of large surface areas.

According to expectations the largest colour differences were perceived using test setting 7, comparing two 3-LED-combinations with a maximum offset between their peak wavelengths. In contrast to expectations the comparison of test setting 4 and test setting 6 reveals that larger differences in the spectral power distributions do not always lead to larger colour differences due to a change in observer field size. Both settings use the same mix spectrum of 8 LEDs with minimised dips and peaks for test field 1. In test setting 4 an RGBW-spectrum is presented in test field 2 whereas in test setting 6 an RGB-spectrum lights test field 2. The corresponding spectra for a colour temperature of 5000K are displayed in figure 5. However the test results show that the perceived colour difference for test setting 6 is smaller than that for test setting 4 at all three colour temperatures. It becomes apparent that

not necessarily those spectra with apparently severe deviations in their spectral power distributions have to be most critical in a combined usage.

In Figure 6 the diagrams on the right show the results of the calculation of the colour difference due to a change in observer field size from 2° to 10° view angle. The hypothesis that the calculated values correspond to the results from the experiment can be verified by calculating the correlation coefficient of both matrices from table 3. As the subjective evaluation of the perceived colour differences can only be interpreted as a rank scale the Spearman coefficient was used to calculate the correlation between calculated colour shift and test results. The spearman coefficient was calculated for each of the three colour temperatures and is $r_s=0.92$ for 3500K, $r_s=0.89$ for 5000K and $r_s=0.98$ for 6500K (table 4). Therefore a high correlation between the new “metamerism index for field size independence” and the visual perception of colour differences due to a change in observer field size can be proven.

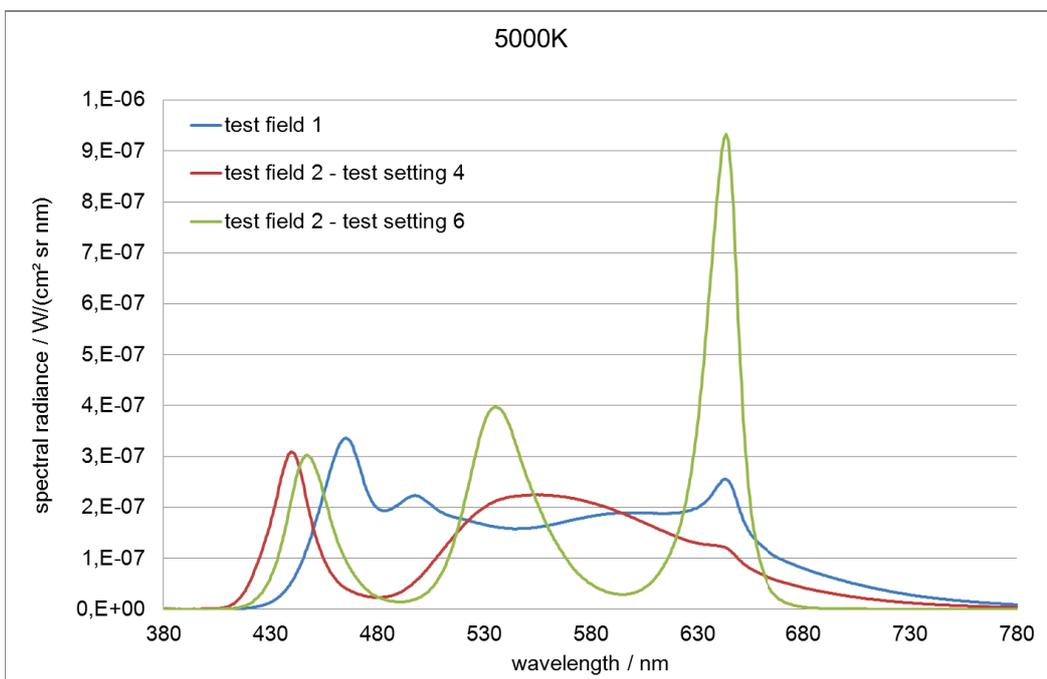


Figure 5: spectral power distributions of the matched spectra for test setting 4 and test setting 6 at 5000K

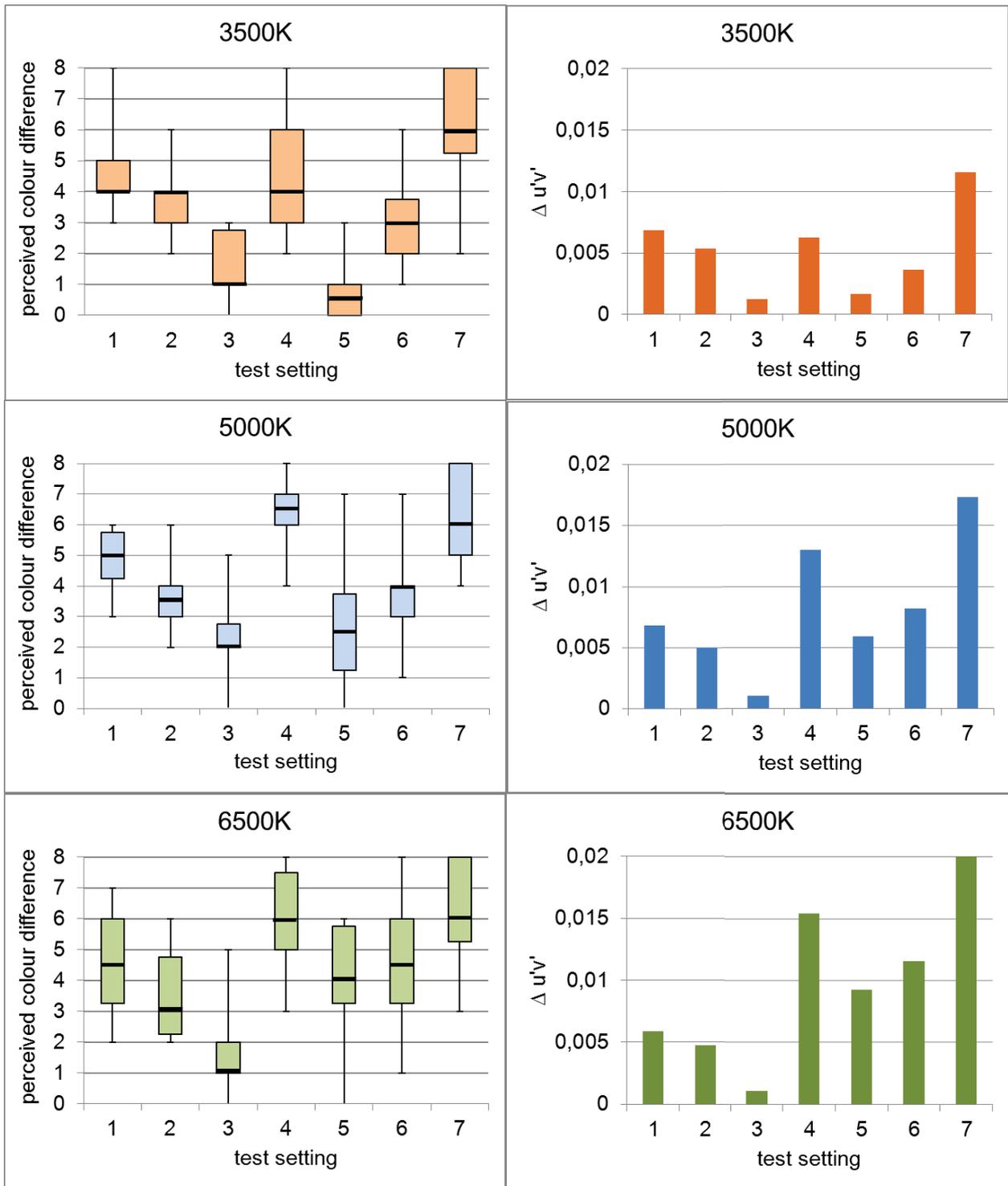


Figure 6: (left) Box-plots of the results of the experimental evaluation of the perceived colour shift due to a change in observer field size from 2° to 10°. Boxes indicate 25% and 75% quartiles whereas the whiskers display the minimum and maximum. (right) Calculated colour differences (eq. (5)) due to a change in observer field size to be interpreted as “metamerism index for field size independence”

Table 3: Tabulated calculated colour differences and perceived colour differences for test settings 1 to 7 at colour temperatures of 3500K, 5000K and 6500K

	$\Delta u'v'$ 2°-10° calc			Median of test results		
	3500K	5000K	6500K	3500K	5000K	6500K
Test setting 1	0,0068	0,0068	0,0059	4	5	4,5
Test setting 2	0,0054	0,0050	0,0048	4	3,5	3
Test setting 3	0,0012	0,0010	0,0011	1	2	1
Test setting 4	0,0062	0,0130	0,0154	4	6,5	6
Test setting 5	0,0017	0,0060	0,0092	0,5	2,5	4
Test setting 6	0,0036	0,0082	0,0116	3	4	4,5
Test setting 7	0,0116	0,0173	0,0203	6	6	6

Table 4: Tabulated Spearman coefficient r_s for the correlation between calculated colour shift and test results

CCT	r_s
3500K	0.92
5000K	0.89
6500K	0.98

6 Conclusion

It was shown that the observer field size has significant influence on the colour perception of two adjacent test lights. Therefore it has to be stressed that the definition of metamere spectra is strictly limited to the given observer field size. Although this is implicit in the definition of metamere spectra it is widely ignored in industrial applications. The colour difference arising from a change in the observer field size heavily depends on the spectral power distributions of the compared test lights. So far there has not been a standardised method to calculate the sensitivity of two compared spectra to a change in observer field size. A new “metamerism index for field size independence” was presented describing the capacity of two spectra to give the same colour appearance independent of the observer field size. Two ways of calculating this index were presented. They can be applied to any given set of colour matching functions for differing field sizes in order to calculate the visual shift indicated by the change from one observer field size to the other.

The new index was evaluated in an experimental test setup with 18 subjects. It was proven that the results of the experiment strongly correlated with the calculated values of the “metamerism index for field size independence” with correlation coefficients higher than $r_s=0.89$.

7 References

WYSZECKI, G.; STILES, W.S. 2000: Color Science Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae. John Wiley & Sons, Inc.

CIE 1989. CIE 80:1989. Technical Report: Special metamerism index: Observer metamerism

CIE 2006. CIE 170-1:2006. Technical Report: Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 1

Einfluss der Beobachtungsfeldgröße auf Farb- abgleichversuche mit LED-Lichtquellen

Saskia Polster, Christoph Schierz
Technisch Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

Tagung LICHT 2012, Berlin, Tagungsband S. 461-468

1 Problemstellung

Grundlage für jede psychooptische Untersuchung, bei der Farbabgleiche vorgenommen werden, ist die Festlegung der Beobachtungsbedingungen und damit eines definierten Beobachterfeldes. Bisherige Untersuchungen beschränkten sich in der Regel auf Farbabgleichversuche bei einer bestimmten Beobachterfeldgröße. Aufgrund der unterschiedlichen verwendeten Spektren in den verschiedenen Untersuchungen konnten bisher kaum konkret die Auswirkungen der Beobachterfeldgröße verglichen werden.

Um zu ermitteln, wie stark die Wahl des Beobachterfeldes die Ergebnisse einer Untersuchung zu Metamerie-Effekten bei LED-Lichtquellen beeinflusst, wurden dieselben Referenz- und Testspektren mit unterschiedlichen Beobachterfeldgrößen untersucht.

2 Ziel

Es ist bekannt, dass der Farbeindruck einer farbigen Fläche abhängig von der Größe des betrachteten Beobachtungsfeldes ist. Ziel dieser Untersuchung ist es herauszufinden, bei welchen spektralen Zusammensetzungen zweier zu vergleichender LED-Spektren der Einfluss der Beobachterfeldgröße besonders stark zum Tragen kommt. Zudem soll ermittelt werden, wie gut in den bestehenden CIE-Farbräumen visuell gleich wahrgenommene LED-Lichtfarben unterschiedlicher Spektren auf einen Farbort abgebildet werden. Darüber hinaus soll festgestellt werden in welcher Größenordnung sich der Einfluss der Beobachterfeldgröße im Vergleich zur Farbortverschiebung durch schlechte Modellierung von LED-Spektren in den untersuchten Farbräumen veranschlagt. Mit schlechter Modellierung ist hier gemeint, dass in einem Farbraum visuell gleich wahrgenommene Spektren auf unterschiedliche Farbörter abgebildet werden, während Spektren mit gleichem berechneten Farbort unterschiedliche Farbeindrücke liefern.

3 Stand der Wissenschaft

Die CIE veröffentlichte 2006 in der CIE Schrift 170-1:2006 eine Rechenvorschrift zur Ermittlung von Sehzapfen-Grundfunktionen für ein Beobachterfeld zwischen 2° und 10°. Aus diesen lassen sich Spektralwertfunktionen für alle Sehfelder zwischen 2° und 10° berechnen. Diese wurden bisher noch nicht ausreichend in allen Feldgrößen und unter der Verwendung von LED-Lichtquellen getestet. Bisherige Untersuchungen [1], [2] zeigen, dass auch unter der Verwendung dieser neuen Grundfunktionen visuell abgegliche LED- und breitbandige Lichtquellen mit definitionsgemäß metameren Spektren nicht auf denselben Farbart abgebildet werden. Die meisten bisherigen Untersuchungen wurden im 2°-Feld durchgeführt.

4 Forschungshypothesen

Es wird vermutet, dass der Einfluss der Beobachterfeldgröße beim Vergleich von zwei LED-Licht-Feldern abhängig von deren spektraler Zusammensetzung unterschiedlich stark hervortritt. Des Weiteren wird die Hypothese untersucht, dass dieser Effekt im Extremfall bei der Beleuchtung mit LED Lichtquellen stark unterschiedlicher Spektren so deutlich hervortreten kann, dass es zu einem Invertierungseffekt kommt. Dies bedeutet, dass bei einer Änderung der Beobachterfeldgröße der Farbeindruck wechselt, sodass in einer Feldgröße die Testfläche grünlich wirkt während in einer anderen Feldgröße das Referenzfeld grünlich wahrgenommen wird.

5 Versuch

In Laboruntersuchungen wurden Abgleichtests in einem speziell für diese Zwecke angefertigten Abgleichstand durchgeführt. 13 Probanden nahmen an jeweils 7 Versuchsdurchläufen teil. In jedem der Versuchsdurchläufe wurden spektral unterschiedlich zusammengesetzte Referenz- und Testspektren dargeboten. Die unterschiedlichen Versuchssituationen sind Tabelle 1 zu entnehmen. Innerhalb eines Versuchsdurchlaufs nahm der Proband insgesamt 9 Abgleiche vor. Es wurde jeweils bei 3500K, 5000K und 6500K in einem 2°, 5°- und 10°-Beobachterfeld abgeglichen. Alle teilnehmenden Probanden wurden vor den Versuchen negativ auf Farbfehlsichtigkeit geprüft. Die Probandengruppe bestand aus 7 männlichen und 6 weiblichen Probanden im Alter von 23 bis 45 Jahren.

5.1 Versuchsaufbau

Im Versuch wurde dem Probanden ein zweigeteiltes Beobachtungsfeld dargeboten. In einer Hälfte die Referenzlichtquelle, in der anderen die vom Probanden einzustellende Testlichtquelle. Die Felder waren jeweils homogen hinterleuchtet. Der maximale Farbunterschied innerhalb einer Bewertungsfläche betrug $\Delta E_{uv} < 0,001$. Die Leuchtdichte der Bewertungsflächen lag bei 145 cd/m². Referenzfeld und Testfeld konnten vertauscht werden um systematische Bewertungsfehler durch die Position des Test- und Referenzfeldes auszuschließen. Die helle Umgebungsfläche füllte das Gesichtsfeld komplett aus und wurde mit RGBW gemischtem LED-Licht der dem Versuchsdurchlauf entsprechenden Farbtemperatur ausgeleuchtet. Die Leuchtdichte der Umgebungsfläche betrug 70 cd/m² womit alle Versuche unter photopischen Sehbedingungen erfolgten.

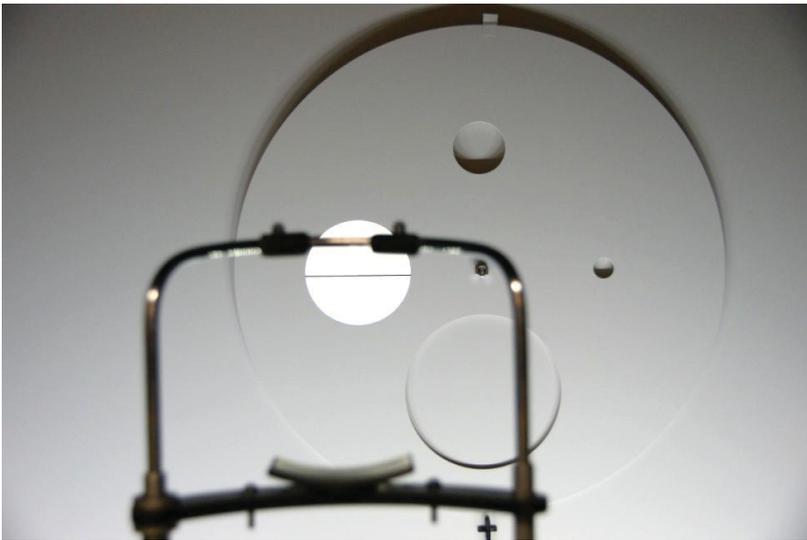


Abbildung 1: Abgleichstand mit zweigeteiltem Bewertungsfeld und änderbaren Beobachterfeldausschnitten

5.2 Versuchsablauf

Die Probanden machten Abgleichversuche bei denen durch gezielte Steuerung der Testlichtquelle visuelle Gleichheit zwischen Testlichtfeld und Referenzlichtfeld hergestellt wurde. Ausgangssituation für jeden Abgleich war jeweils der messtechnisch an die Referenzlichtquelle angeglichenen Farbort im CIE-Farbraum von 1976. Der Proband bewegte sich in zwei Dimensionen auf der Achse grün-rot und der Achse blau-gelb mit Hilfe von Richtungstasten. Realisiert wurde die Ansteuerung über einen Mischalgorithmus im CIE 1976 $u'v'$ -Farbraum basierend auf den 2° -Spektralwertfunktionen von 1931. Zudem konnte die Testperson die Helligkeit des Testfeldes wenn nötig visuell anpassen. Der Proband wurde angewiesen den visuell gleich empfundenen Farbort in jeder Richtung einmal zu verlassen bis er eine visuelle Differenz wahrnahm und dann wieder zum gewünschten Farbort zurückzukehren.

Nachdem der Proband das Testfeld im 5° -Beobachterfeld auf die Referenz angeglichen hatte, beschrieb er verbal den Farbeindruck von Referenz- und Testfeld im 2° - und im 10° -Beobachterfeld.

Vor jedem Versuchsdurchlauf wurden die drei Einstellungen des Referenzlichtfeldes messtechnisch überprüft. Nach jedem Abgleich wurde die vom Probanden eingestellte Testfläche spektral mit einer TOP100-311 Optik (2 mm Messfeld) an einem CAS140CT Array-Spektrometer (Instrument Systems GmbH, München) vermessen.

5.3 Untersuchte Spektren

Untersucht wurden zwei leuchtstoffkonvertierte kaltweiße LEDs desselben Typs, welche in Mischung mit RGB-LEDs bei farbmess-technischem Abgleich stark unterschiedliche Farbeindrücke lieferten. Da aufgrund der Verschiebung des Blaueaks ein jeweils leicht rötlicher und leicht grünlicher Farbeindruck der LED-Lichtfarbe entsteht, werden die beiden Testlichtfarben im folgenden T_{Lr} und T_{Lg} genannt. Um nicht nur einen direkten Vergleich der Spektren zueinander zu haben (vgl. V1 Tab. 1), sondern auch zu einer „Referenzlichtquelle“ wurde mit einer 8LED-Lichtquelle ein möglichst kontinuierliches Spektrum geschaffen, mit welchem die spektralen Verteilungen des Planck'schen Strahlers, bzw. des Tageslichts bei 3500K, 5000K und 6500K im Bereich zwischen 450nm und 650nm nachgebildet wurden (vgl. V4/V5/V6 Tab. 1).

Tabelle 1: Überblick über Versuchssituationen V1-V7 und Versuchsparameter

Versuchssituation	Referenzlichtquelle	Testlichtquelle
V1	TLr RGBW	TLg RGBW
V2	TLr RGB	TLg RGB
V3	TLr RGBW + Cyan	TLg RGBW
V4	SW voll	TLg RGBW
V5	SW voll	TLr RGBW
V6	SW voll	TLr RGB
V7	SW ACB	TLr RGB

	2°	5°	10°
3500 K	9 Abgleiche je Versuchssituation		
5000 K			
6500 K			

Legende:

SW voll LED Vollspektrum

SW ACB RGB-Mischung ((R: $\lambda_{Peak}=595nm$, G: $\lambda_{Peak}=497nm$, B: $\lambda_{Peak}=467nm$)

TLr RGBW RGBW- Mischung mit leuchtstoffkonvertierter weißer LED ($\lambda_{Peak\ blau}=440nm$)

TLr RGBW+C RGBW- Mischung(siehe TLr RGBW) mit konstanter Cyan-Beimischung

TLg RGBW RGBW- Mischung mit leuchtstoffkonvertierter weißer LED ($\lambda_{Peak\ blau}=460nm$)

TLr RGB RGB Mischung (R: $\lambda_{Peak}=642nm$, G: $\lambda_{Peak}=534nm$, B: $\lambda_{Peak}=447nm$)

TLg RGB RGB Mischung (R: $\lambda_{Peak}=640nm$, G: $\lambda_{Peak}=525nm$, B: $\lambda_{Peak}=450nm$)

In Versuchssituation V3 wurde die deutliche Lücke bei 480nm im Spektrum der Referenzlichtquelle TLr RGBW durch Beimischen des Spektrums einer Cyan-LED aufgefüllt und wiederum mit der Testlichtquelle TL RGBW verglichen.

Um die Abhängigkeit des Einflusses der Beobachterfeldgröße von der Spektralszusammensetzung der verglichenen Spektren abschätzen zu können, wurden in Versuchssituation V2 zwei RGB Spektren, mit geringer Abweichung im grünen Bereich, miteinander verglichen. Außerdem wurde ein „Worst-Case“-Szenario mit möglichst unterschiedlichen Spektren generiert, indem RGB-LEDs mit einer Amber-Cyan-Blau Mischung verglichen wurden.

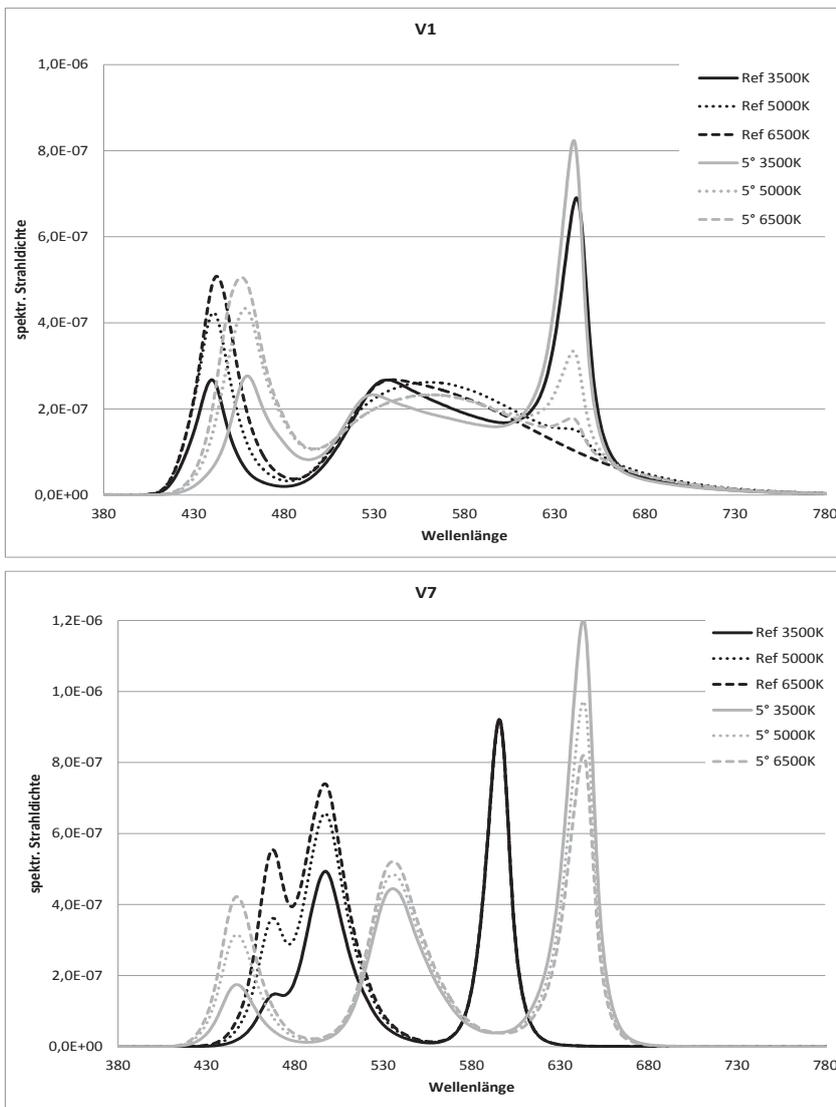


Abbildung 2: Exemplarische Darstellung der Vergleichsspektren für Versuchssituation V1 und V7 bei 3500K, 5000K und 6500K

6 Ergebnisse

Aus den Spektren der Abgleiche wurden jeweils die Farbörter im $u'v'$ -Farbraum auf Basis der CIE-1931-, CIE-1964 und CIE-2006-Spektralwertfunktionen ermittelt. Zum einen wurden die $\Delta E_{u'v'}(\text{Ref})$ -Farbabstände zwischen den Mittelwerten der Probandenabgleiche und den Referenzspektren in den unterschiedlichen Systemen bewertet. Zum anderen wurden die Farbabstände $\Delta E_{u'v'}(2^\circ-10^\circ)$ zwischen den 2° -Feld-Abgleichen und 10° -Feld-Abgleichen den visuellen Bewertungen gegenübergestellt.

Abhängig von der Versuchssituation weisen die Standardabweichungen der Ergebniscluster deutlich unterschiedliche Werte auf. Diese variieren zwischen $3\sigma = 0,002$ für Abgleiche bei Versuchssituation V2 mit Spektren geringer spektraler Unterschiede und $3\sigma = 0,01$ für Versuchssituation V7 (siehe Abb. 3). Je größer die spektralen Unterschiede der zu vergleichenden Testlichtquellen sind, desto größer werden auch die Streuung und damit die Standardabweichung der Abgleichergebnisse. Dies ist auf die deutlichere Manifestierung individueller Unterschiede der Farbwahrnehmung der einzelnen Probanden zurückzuführen.

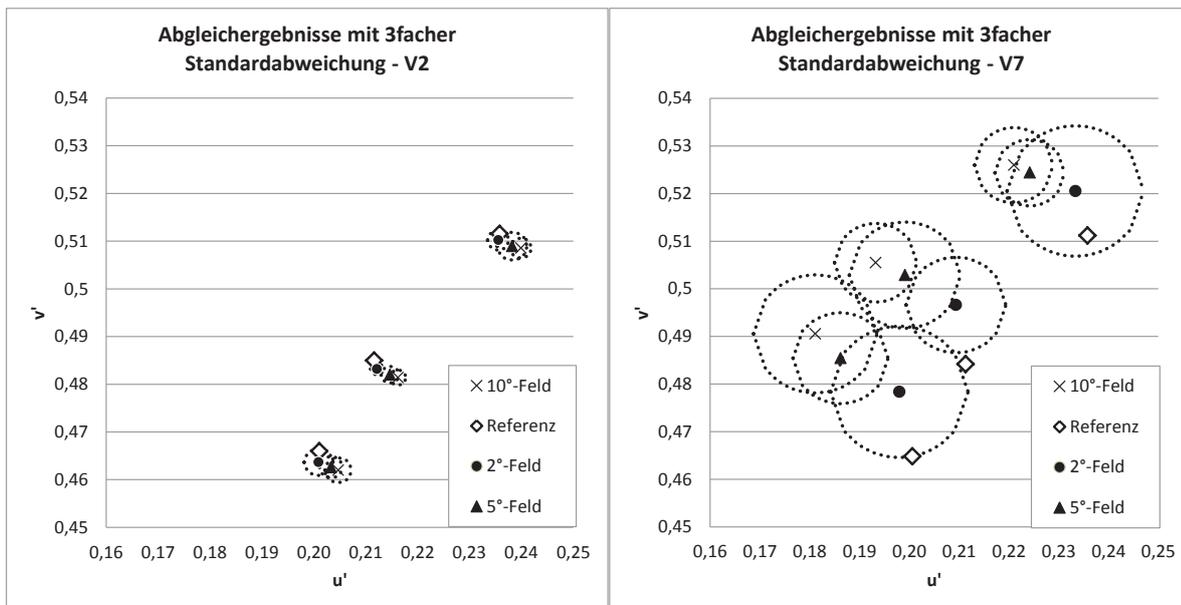


Abbildung 3: Darstellung der Abgleichergebnisse mit 3facher Standardabweichung im $u'v'$ -Farbraum (CIE-1931)

6.1 Farbabstand zur Referenz

Die unterschiedlichen Spektralwertfunktionen wurden für jeweils spezifische Beobachterfeldgrößen ermittelt. Daher wäre zu erwarten, dass die Farbabstände zwischen den abgeglichenen Test- und Referenzfeldern in den entsprechenden Systemen gleich Null werden. Beispielsweise sollten im Farbraum basierend auf den Spektralwertfunktionen von 1931 alle Abgleiche, welche unter einem 2°-Sehwinkel vorgenommen werden auf denselben Farbort wie die Referenz abgebildet werden. Abb. 4 zeigt, dass dies nur in wenigen der Versuchssituationen tatsächlich der Fall ist. Größtenteils rutschen die Ergebnisse der modellierten Beobachterfeldgröße in den Bewertungssystemen näher an die Referenz als die Ergebnisse aus den anderen Abgleichen in anderen Beobachterfeldgrößen. Aus Abb.4 wird deutlich, dass die Farbabstände zur Referenz durch die Verwendung der CIE-2006-2°-Spektralwertfunktionen im Gegensatz zu denen von 1931 um mehr als die Hälfte reduziert werden können.

Je stärker sich die verglichenen Spektren in den Versuchssituationen voneinander unterscheiden, desto größer bleibt der Farbabstand zwischen Abgleichergebnis und Referenz. So bleibt auch bei Verwendung der neuen Spektralwertfunktionen ein maximaler Farbabstand von $\Delta_{Eu'v'}(Ref)=0,01$ bestehen. Vergleicht man dies allerdings mit der Standardabweichung der Abgleichergebnisse (siehe oben), so stellt man fest, dass die Farbabstände der Abgleichergebnisse zur Referenz in derselben Größenordnung wie die 3fache Standardabweichung liegen. Die Metamerieeffekte beim Vergleich unterschiedlicher LED-Spektren werden demnach mit den CIE-2006-2°-Spektralwertfunktionen gut modelliert.

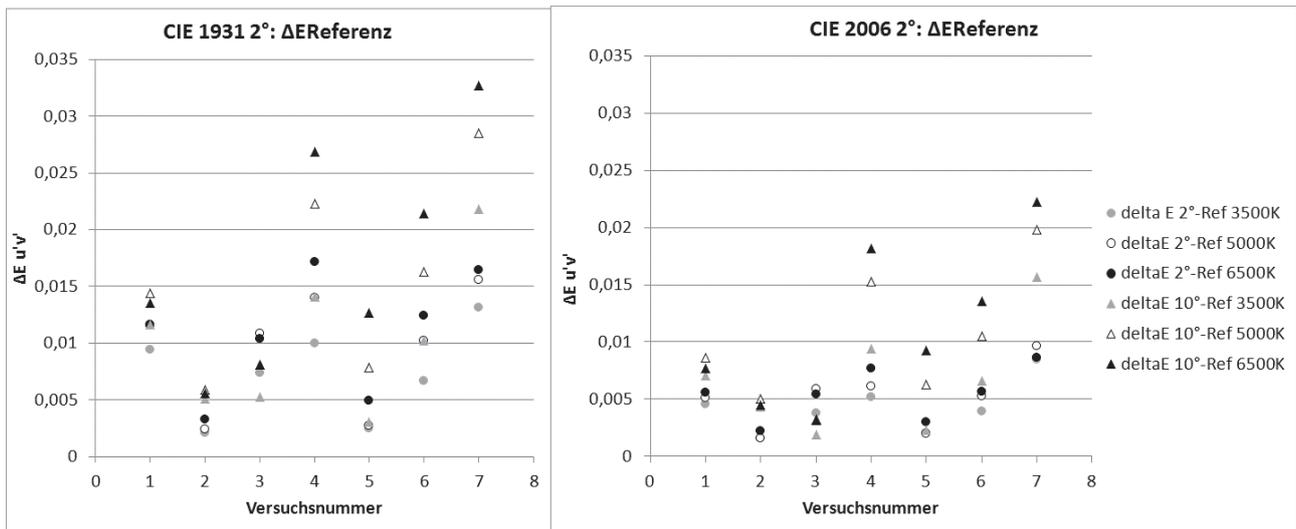


Abbildung 4: Exemplarische Ergebnisse der Auswertung der Farbabweichungen $\Delta E_{u'v'}(Ref)$ der Abgleichwerte im 2° und 10° Feld zur Referenz, basierend auf den Spektralwertfunktionen von 1931 (links) und basierend auf den Spektralwertfunktionen ermittelt auf Grundlage der Sehzapfen-Grundfunktionen aus CIE170-1:2006 für das 2° Beobachterfeld (rechts)

6.2 Farbeindruck bei Beobachterfeldwechsel und Invertierungseffekt

Die wahrgenommene Farbdifferenz beim Wechsel zwischen 2°- und 10°-Beobachterfeld wurde zum einen messtechnisch ermittelt und zum anderen visuell bewertet. Trägt man die errechneten $\Delta E_{u'v'}(2^\circ-10^\circ)$ über alle Versuche (V1-V7) auf, so korrelieren diese Funktionen für alle verwendeten Spektralwertfunktionen (CIE-1931, CIE-1964, CIE-2006) signifikant ($R=0,99$). Diese Ergebnisse passen wiederum gut zu den subjektiven visuellen Bewertungen der Probanden.

Um die Signifikanz der Farbortverschiebung zwischen Farbabgleichen im 2°-, bzw. 10°-Feld und 5°-Feld beurteilen zu können, wurden für eine Analyse dieser Verschiebung alle 5°-Abgleiche einer Versuchssituation auf den Nullpunkt verschoben und dieser Verschiebevektor auch auf die 2°- und 10°-Abgleiche angewandt (Abb. 5). Abb. 5 zeigt beispielhaft für Versuchssituation V3, V5 und V7 die Häufung der Abgleichergebnisse aller Probanden für die Farbverschiebung zwischen 2°- und 10°-Abgleich. Es lässt sich deutlich erkennen, dass sich die 2°- und 10°-Abgleiche bei V7 eindeutig voneinander trennen lassen, während die Abgleiche in V3 einen gemischten Cluster zeigen. Hier lässt sich keine eindeutige Zuordnung der Farbabweichungen erkennen. Bei V5 zeigt sich, dass bei 3500K keine Änderung der Farb Wahrnehmung durch den Wechsel des Beobachterfeldes hervorgerufen wird, während die Abgleiche in den unterschiedlichen Feldgrößen bei den höheren Farbtemperaturen eindeutig zugeordnet werden können.

Bei den visuellen Bewertungen des 2°- und 10°-Feldes nach Abgleich im 5°-Beobachterfeld beschrieben die Probanden eindeutige Farbeffekte bei allen Versuchssituationen bis auf Versuchssituation V3. Abhängig von der spektralen Zusammensetzung der Referenzspektren und Testspektren kamen unterschiedlich stark ausgeprägte Farbeindrücke zustande. Wirkte die Referenzlichtquelle im 2°-Beobachterfeld grünlich, so wirkte im 10°-Beobachterfeld die Testlichtfläche grünlich oder umgekehrt. Die Gegenfläche zur grünlichen Fläche wirkte für einige Probanden rötlich, andere Probanden beschrieben den Farbeindruck als weißlich. Allein Aufgrund der Beobachterfeldgröße wurde der Farbeindruck von Testfeld und Referenzfeld invertiert. Der stärkste Invertierungseffekt und damit auch der deutlichste Beobachterfeldgrößeneinfluss zeigte sich bei Versuchssituation V7. Abb. 6 veranschaulicht den Invertierungseffekt.

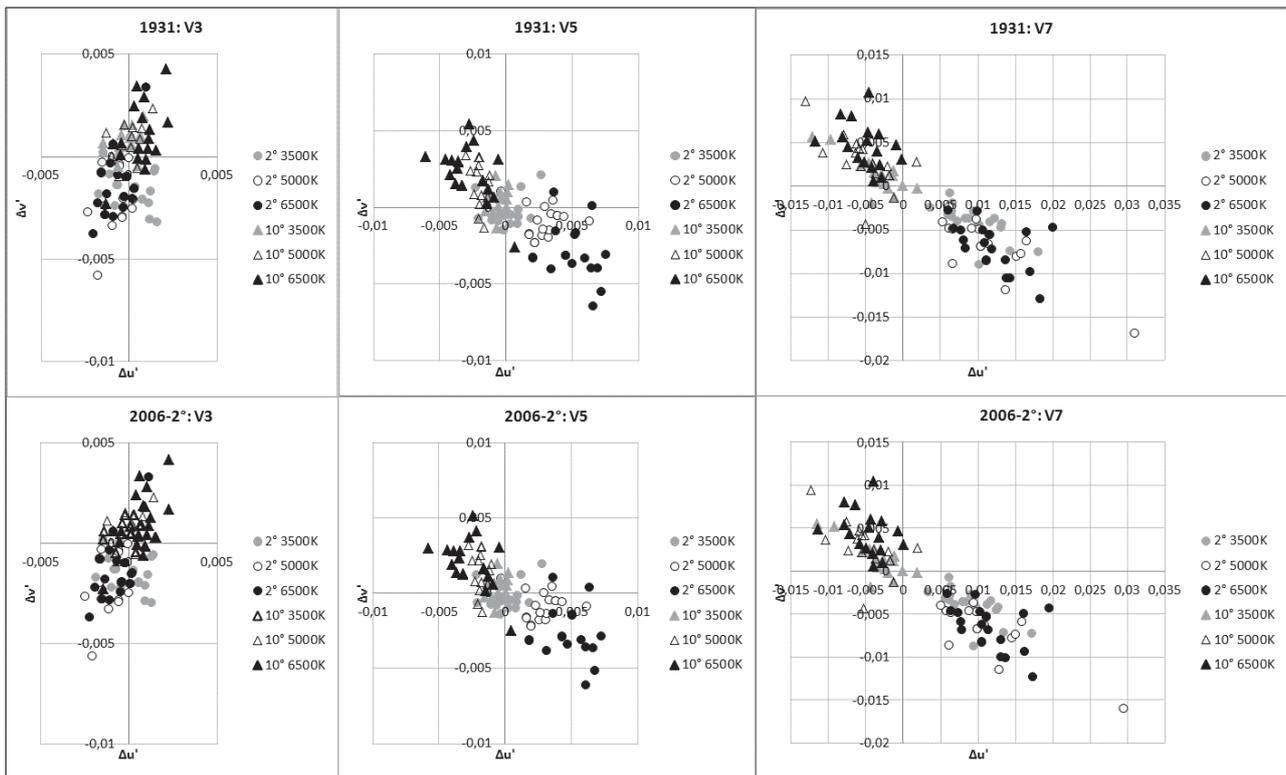


Abbildung 5: Farbortverschiebungen der 2° und 10° Abgleiche exemplarisch für Versuchssituationen V3, V5 und V7 dargestellt im $u'v'$ Diagramm nach CIE-1931 (oben) und CIE-2006-2° (unten)

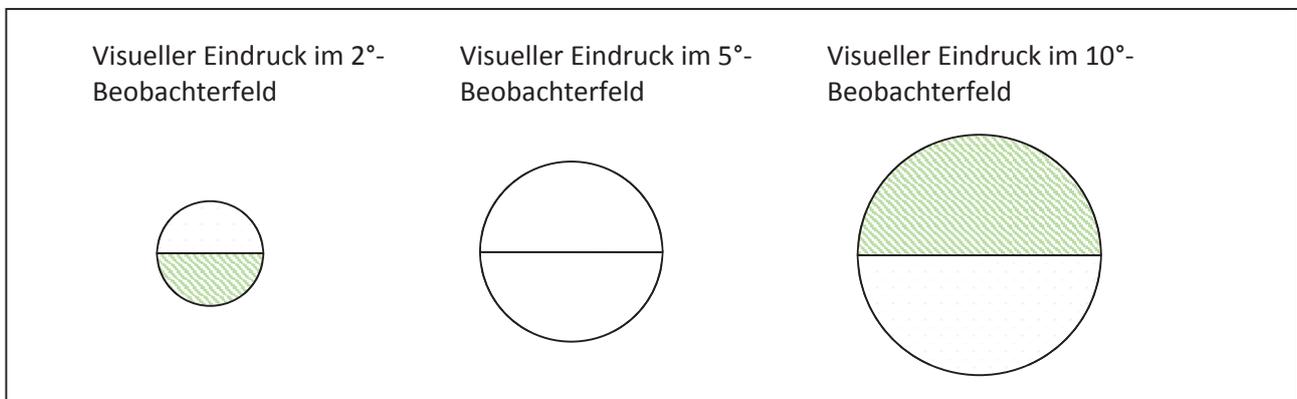


Abbildung 6: Illustration des von den Probanden beschriebenen Invertierungseffekts (Schraffur stellt grünlich wahrgenommene Fläche dar)

7 Zusammenfassung und Diskussion

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass der Beobachterfeldgrößeneinfluss in allen Farbräumen basierend auf den unterschiedlichen bestehenden Spektralwertfunktionen gut modelliert wird. Mit den, in der CIE Schrift 170-1:2006 empfohlenen Spektralwertfunktionen können Metamerieeffekte bei definierter Beobachterfeldgröße für unterschiedlichste LED-Spektren gut modelliert werden. Abhängig von der spektralen Zusammensetzung ist die Streuung der individuellen Farbwahrnehmungen teils sehr groß. Dies macht eine genaue Bestimmung von Metamerie, bei einem Vergleich stark unterschiedlicher Spektren, für einen Normbeobachter sehr schwierig.

Zudem ist eine Definition metamerer Spektren nach diesen ersten Untersuchungen, abhängig von der Zusammensetzung des Spektrums, nur für definierte Beobachterfeld-größen möglich. Aufgrund der deutlichen Verschiebungen der Farbwahrnehmung zwischen Betrachtung im 2° und im 10° Beobachterfeld muss für einige Anwendungen der LED-Beleuchtung besonderes Augenmerk auf die Spektralverteilung der verwendeten LEDs gelegt werden, um unerwünschte Farbeindrücke, zum Beispiel bei der Ausleuchtung großer homogener Flächen zu vermeiden. Hier muss die Abhängigkeit von der Beobachterfläche stärker berücksichtigt werden als bisher angenommen. Weitere Untersuchungen, welche die genauere Abhängigkeit des Beobachterfeldgrößeneinflusses von der spektralen Zusammensetzung der Vergleichsspektren zum Thema haben sollten folgen. Um dies genauer zu untersuchen und die verantwortlichen Wellenlängenbereiche exakt zu definieren, sollten weitere Testspektren mit gezielten Änderungen in kleinen Wellenlängenbereichen untersucht werden.

8 Literatur

- [1] Bieske K, Csuti P, Schanda J: Colour appearance of metameric lights and possible colorimetric description. CIE expert symposium on Visual Appearance, Paris, 2006
- [2] Csuti P, Schanda J, Petluri R, McGroddy K, Harbers G: Improved color matching functions for better visual matching of LEDsources. CIE 27th Session, Sun City/ZA, 2011

Einfluss unterschiedlicher Beleuchtungskonzepte und Lampenspektren in der Innenraumbeleuchtung

*Wjatscheslaw Pepler, Marvin Böll, Peter Bodrogi, Tran Quoc Khanh
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik*

Tagung LICHT 2012, Berlin, Tagungsband S. 92-98

1 Einleitung

Die bisherigen Kriterien der Lichtqualität reichen nicht aus, um eine zufriedenstellende Lichtplanung zu erreichen. Je nach Anwendung entstehen spezifische Anforderungen, die teils quantitativer, aber auch teils qualitativer Natur sind.

Die meisten bisherigen Studien haben sich eher mit quantitativen Güteigenschaften der Beleuchtung beschäftigt, beispielsweise Beleuchtungsstärke, Blendungsbegrenzung, Farbwiedergabe. Die aktuellen Normen und Richtlinien greifen auf diese quantitativen Güteigenschaften zurück und geben die einzuhaltenden Werte für verschiedene Anwendungen an [1]. Es zeigt sich aber immer wieder, dass die alleinige Einhaltung der normativen Vorgaben zu keiner befriedigenden Lichtplanung führt, die von den Nutzern akzeptiert wird [2].

Die Normen erfassen nicht die Wahrnehmung bzw. das Erleben der Lichtwirkung im gesamten Raum. Es wird zwar empfohlen eine ausgewogene Leuchtdichteverteilung im Raum zu schaffen, sowie das genutzte Raumvolumen (Stichworte hier sind Modelling Index, zylindrische Beleuchtungsstärken, gerichtetes Licht) zu beleuchten [1]. Die Empfehlungen dazu sind aber eher vage. Die Wahrnehmung des beleuchteten Raumes ist subjektiv und stark kontextabhängig.

Im Rahmen einer größeren, langfristigen Studie soll die Raumwahrnehmung für verschiedene Beleuchtungssituationen erfasst werden. Vorerst wird nur die Bürobeleuchtung betrachtet, in späteren Studien können auch andere Kontexte untersucht werden.

In diesem Artikel werden die ersten Befragungsergebnisse vorgestellt, die kürzlich nach der Fertigstellung des Multifunktionsraums am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt entstanden sind. Es wird untersucht, wie die im Multifunktionsraum eingesetzten Lichtquellen bezüglich ihrer Helligkeit, Farbwahrnehmung und der Akzeptanz als Bürobeleuchtung von Probanden eingeschätzt werden.

2 Testraum

Für die Versuche steht am Fachgebiet Lichttechnik ein Multifunktionsraum mit den Raummaßen 5,40 m × 4,25 m × 2,45 m zur Verfügung. Der Raum entspricht damit den Mindestanforderungen an ein Büro für zwei Mitarbeiter [3].

Im Rahmen der Sanierung wurde auch der Multifunktionsraum neu gestaltet und weiß gestrichen. Für die flexible Installation der Beleuchtung wurde eine abgehängte Rasterdecke mit 0,625 m-Raster verwendet.

In die Decke wurde eine DMX-basierte Lichtsteueranlage installiert, womit die Vorschaltgeräte für die unterschiedlichen Lichtquellen gesteuert und gedimmt werden können. Die Verbindung mit der Steueranlage wird über WLAN aufgebaut.



Abbildung 1: Multifunktionsraum am Fachgebiet Lichttechnik

Die für diese Befragung verwendete Beleuchtung umfasst 9 flächige Leuchten, die in drei Reihen mit jeweils drei Leuchten pro Reihe angeordnet sind und eine breitstrahlende, nahezu Lambert'sche Lichtverteilung haben (siehe Abbildung 2). Die einzelnen Reihen lassen sich getrennt voneinander steuern, so dass der Raum zonal beleuchtet werden kann.



Abbildung 2: Abgehängte Decke des Multifunktionsraumes mit eingeschalteter Testbeleuchtung

Jede Leuchte ist mit insgesamt fünf Lichtquellen mit verschiedenen spektralen Charakteristiken ausgestattet, um nicht nur die Wirkung der Lichtverteilung, sondern auch den Einfluss des Spektrums zu testen. Bei der Konstruktion der Leuchten wurde darauf geachtet, dass die Leuchten für jede Lichtquelle die gleiche Lichtverteilung aufweisen. Die verwendeten Lichtquellen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 1: Verwendete Lichtquellen mit jeweiligen Werten der Farbtemperatur und -wiedergabe

Bezeichnung	Farbtemperatur	Farbwiedergabe
LED 1	4000 K (3934 K)	85 (88)
LED 2	2700 K (2675 K)	85 (88)
Leuchtstofflampe 1	4000 K (4002 K)	80 (81)
Leuchtstofflampe 2	2700 K (2711 K)	80 (82)
Halogen-Glühlampe	2800 K (2776 K)	99 (99)

Die Spektren der eingesetzten Lichtquellen sind in der Abbildung 3 dargestellt. Die in der Tabelle in Klammern stehenden Werte für die Farbtemperatur und die Farbwiedergabe wurden aus den Spektren nach aktuellen Vorschriften der CIE kalkuliert.

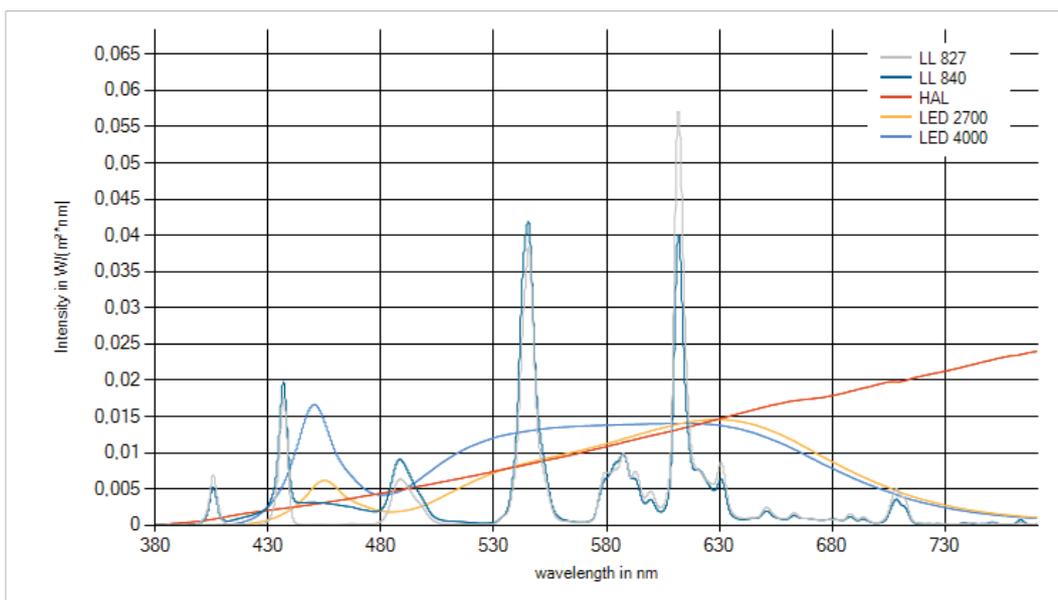


Abbildung 3: Spektren der im Raum eingesetzten Lichtquellen

3 Methodik

Den Probanden werden verschiedene Lichtszenen vorgeführt, die diese mit Hilfe von Fragebögen auf Ihre Wirkung bezüglich verschiedener Kriterien beurteilen sollen. Die Parameter, die in der hier vorgestellten Studie von Interesse sind, sind Helligkeit, Farbpräferenz und die Eignung der einzelnen, im Multifunktionsraum installierten Lichtquellen für die Bürobeleuchtung.

Die einzelnen Szenen in dieser Untersuchung unterscheiden sich einzig bezüglich der Lichtquelle. Die Leuchten wurden jeweils so eingestellt, dass die Lichtverteilung und die Beleuchtungsstärke im Raum konstant waren. Die mittlere, horizontale Beleuchtungsstärke

im gesamten Raum beträgt 800 lx bei einer Gleichmäßigkeit von ca. 0,55 für alle Lichtszenen.

Die Testpersonen mussten dabei in drei getrennten Testläufen folgende Fragestellungen bearbeiten:

- Beurteilung der Helligkeit einzelner Lichtquellen relativ zu einander
- Präferenz der Objektfarben auf dem Tisch (siehe Abbildung 1) unter den verschiedenen Lichtquellen, die Natürlichkeit und die Ausgewogenheit der gesamten, dar-gebotenen Farbpalette
- Präferenz bestimmter Lichtquellen für die Bürobeleuchtung

Um einen möglichst objektiven Vergleich zwischen den einzelnen Lichtquellen ziehen zu können, wurde der Analytische Hierarchieprozess (AHP) eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine von T. L. Saaty entwickelte Methode zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen [4].

Die einzelnen Elemente, in unserem Fall die fünf verschiedenen Lichtquellen, werden von Probanden paarweise miteinander verglichen. Über eine Evaluationsmatrix (siehe Abbildung 4) werden danach die Gewichte der einzelnen Elemente relativ zu einander berechnet. Die Summe der Gewichte beträgt dabei immer 1.

Tabelle 2: Evaluationsmatrix im Analytischen Hierarchieprozess

	LED 4000	LL 840	LED 2700	LL 827	HAL
LED 4000		2	1	0	0
LL 840	0		0	0	2
LED 2700	1	2		0	2
LL 827	2	2	2		2
HAL	2	0	0	0	
Summe	5	6	3	0	6
Gewichte	0,25	0,3	0,15	0	0,3
Position	3	1	4	5	1

Den Probanden wurden einzelne Lichtszenen nacheinander vorgeführt und die Probanden mussten die aktuelle Szene im Vergleich zu vorherigen bewerten. Die Reihenfolge der Szenen war so gewählt, dass jede Szene mit jeder anderen jeweils einmal vorkam. Das ergibt bei fünf verschiedenen Szenen insgesamt zehn Bewertungen. Die höhere Bewertung einer Lichtquelle führt zu einer 2 in der Matrix, die Gleichheit zu 1 und eine niedrigere Bewertung wird als 0 eingetragen. Die Probanden wurden gebeten, nicht auf die Leuchten zu schauen, sondern nur den Raum bzw. Objekte auf dem Tisch zu betrachten.

Für jeden Probanden werden aufgrund seines Fragebogens die Gewichte für die verschiedenen Lichtquellen für jede der drei Fragen kalkuliert. Dabei bedeutet ein höheres Gewicht für eine Lichtquelle, dass diese je nach Frage entweder heller als andere wahrgenommen wurde oder eine höhere Präferenz bezüglich der Objektfarben oder Eignung zur Bürobeleuchtung bekommen hat. Damit ergeben sich für jeden Probanden drei getrennte Ratings der Lichtquellen relativ zu einander.

Die Probanden bestanden aus den Studenten und wissenschaftlichen Mitarbeitern des Fachbereichs Architektur und des Fachgebiets für Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt, sowie einer Chemie-Studentin. Insgesamt wurden für diese Untersuchung 22

Probanden befragt. Die Altersverteilung, sowie die Verteilung nach Geschlechtern können der Abbildung 5 entnommen werden.

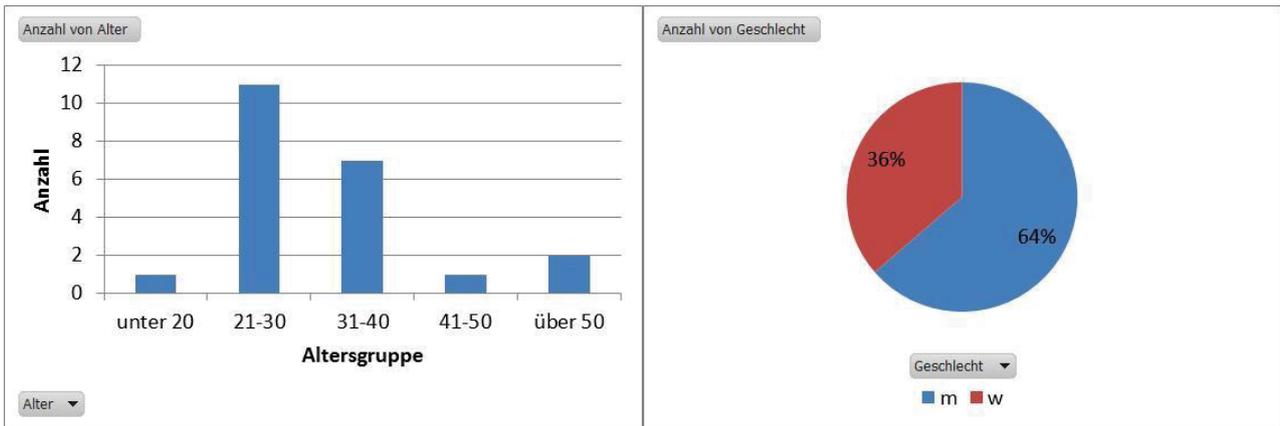


Abbildung 4: Die Verteilungen der befragten Probanden bezüglich ihres Alters (links) und des Geschlechts (rechts)

Das mittlere Alter der Probanden beträgt 31,3 Jahre bei einer Standardabweichung von 9,8 Jahren. Der Frauenanteil liegt in dieser Untersuchung bei 36 %.

Es kam zu keinen signifikanten Unterschieden in der Bewertung der Lichtsituationen zwischen den Angehörigen verschiedener Fachrichtungen. Daher werden die Ergebnisse für die Angehörigen verschiedener Fachrichtungen zusammen ausgewertet.

4 Ergebnisse

Für jede der drei Fragestellungen wurden die Gewichte der Probanden gemittelt, um die Bewertung über alle Probanden hinweg zu erhalten. Die Ergebnisse sind in den folgenden drei Abbildungen 6, 7 und 8 dargestellt. Die Fehlerindikatoren zeigen die Standardabweichung, die Ordinate das jeweilige mittlere Gewicht einer Lichtquelle relativ zu den anderen.

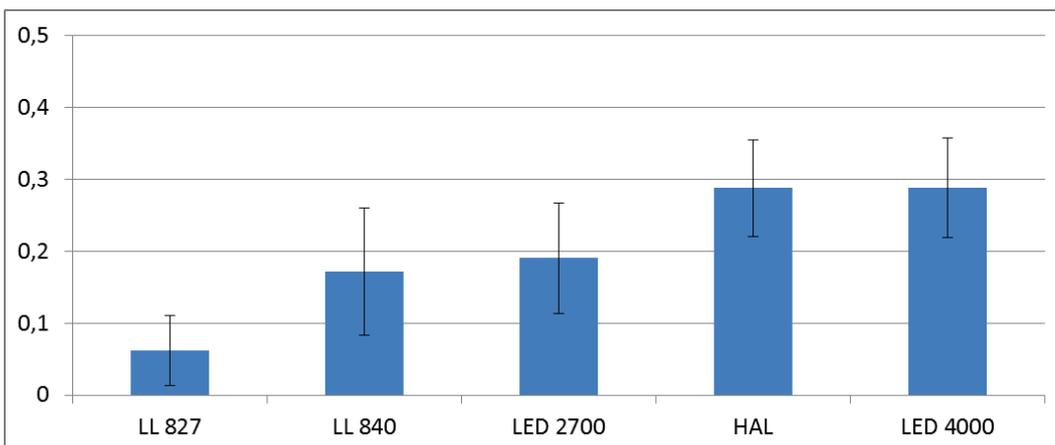


Abbildung 5: Helligkeitsbewertung der verwendeten Lichtquellen relativ zu einander

Die LEDs mit 4000 K sowie die Halogenglühlampen wurden von Probanden am hellsten wahrgenommen. Danach folgen die LED mit 2700 K sowie die Leuchtstofflampe mit 4000 K. Am dunkelsten wurde die warmweiße Leuchtstofflampe wahrgenommen. Wenn man die

LEDs (LED 4000 und LED 2700) und Leuchtstofflampen (LL 840 und LL 827) untereinander vergleicht, so erkennt man, dass die Lampen mit höherer Farbtemperatur jeweils heller als die mit niedrigerer Farbtemperatur bewertet wurden.

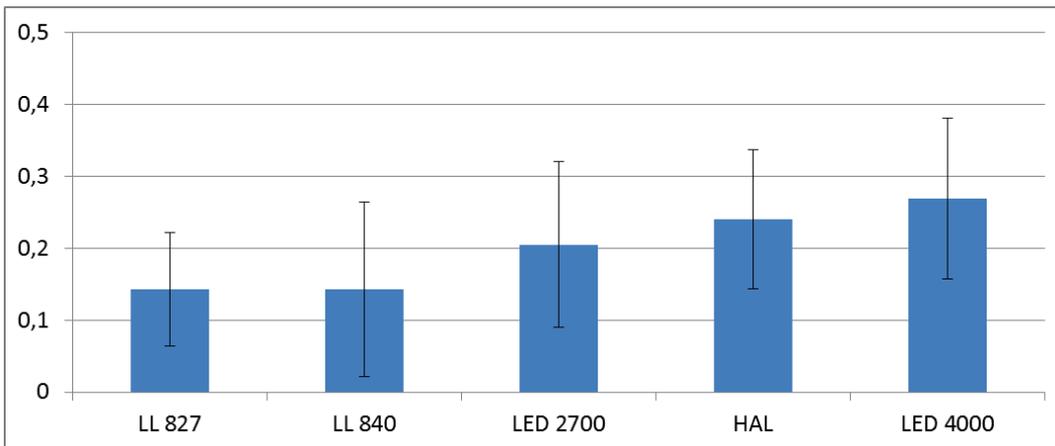


Abbildung 6: Die Farbpräferenz der farbigen Objekte unter verschiedenen Lichtquellen

Aufgrund der Fragestellung nach der persönlichen Präferenz ist die Streuung der Ergebnisse sehr groß. Trotzdem ist die Tendenz erkennbar, dass die Lichtquellen mit höherer Farbwiedergabe besser bewertet werden.

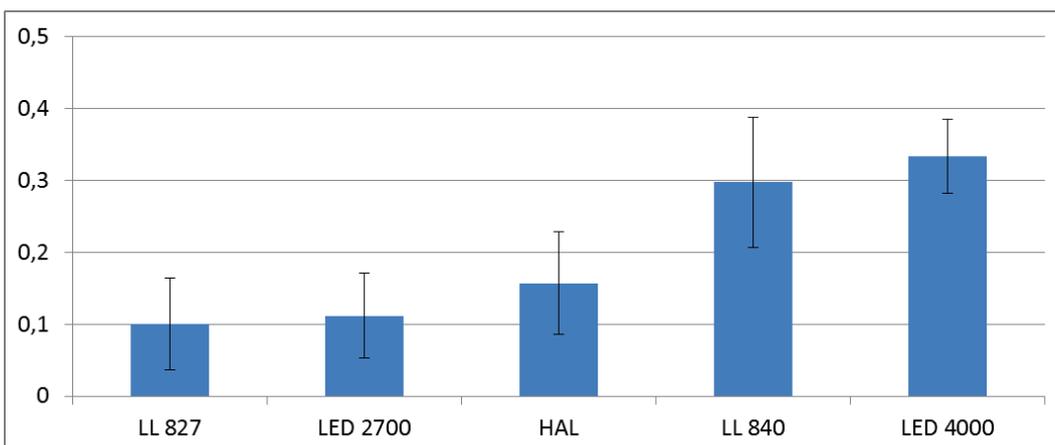


Abbildung 7: Präferenz einzelner Lichtquellen für die Bürobeleuchtung

Hier zeigt sich, dass die Lichtquellen mit höherer Farbtemperatur sehr stark gegenüber der niedrigeren Farbtemperatur bevorzugt werden. Dabei spielt der Typ der Lichtquelle keine Rolle, es werden die Leuchtstofflampe und die LED bei 4000 K nahezu gleich bewertet.

5 Diskussion

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Lichtquellen mit unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung unterschiedlich hell wahrgenommen werden. Und das obwohl die Beleuchtungsstärke im Raum konstant war. Dies weist nochmal darauf hin, dass die photometrische Bewertung mit der $V(\lambda)$ -Funktion (2° -Normalbeobachter) nur eingeschränkt die Helligkeitswahrnehmung in der Realität, in großen Räumen mit realen Objekten beschreibt.

Die Bewertung der dargebotenen Farbpalette bzw. die Farbpräferenz unter verschiedenen Lichtquellen hängt erwartungsgemäß stark mit den Farbwiedergabe-Indizes zusammen, wobei bei ähnlichem Index die kältere Lichtfarbe etwas präferiert wurde. Dies kann aber auch mit dem Kontext einer Bürobeleuchtung zusammenhängen, wie die Bewertung der nächsten Frage zeigt.

Für die Büroarbeit wurde von Probanden eindeutig die kühlere Lichtfarbe von 4000 K eindeutig gegenüber der warmweißen Beleuchtung von 2700 K oder 2800 K bevorzugt.

6 Literatur

- [1] DIN EN 12464: Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten
- [2] Dehoff, P.: Zum Stand der Innenraumbelichtung. CyberLux 2001
- [3] VBG: Bildschirm- und Büroarbeitsplätze (BGI 650). 2007
- [4] Reichardt, T.: Mehrkriterielle Entscheidungen mit dem AHP-Verfahren. Seminararbeit, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 2003

Innenraumbeleuchtung mit LED- und Leuchtstofflampen – lichtmesstechnische und visuelle Feldtests

Marvin Böll, Friederike Geßner, Wjatscheslaw Pepler, Tran Quoc Khanh
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik

Tagung LICHT 2012, Berlin, Tagungsband S. 144-151

1 Problemstellung

Ein wichtiger Bestandteil für die Qualität eines Arbeitsplatzes ist die Beleuchtung. In der DIN 5035 und in der nachfolgenden DIN 12464 wird der Stellenwert der Beleuchtungsqualität am Arbeitsplatz wie folgt beschrieben: „Nur gute Beleuchtung schafft günstige Sehbedingungen, vermindert die Ermüdung der Augen, fördert und erhält das physische und psychische Wohlbefinden und damit Lebensfreude und Lebenskraft des Menschen“.

Die DIN dient bis heute als Leitfaden für die Lichtplanung, die für Temperaturstrahler und Entladungslampen ausgelegt ist. Sie liefert aber keine Aussage über die zu verwendende spektrale Zusammensetzung des Lichtes. Dabei hat das Spektrum einen wesentlichen Einfluss auf die visuelle Wahrnehmung unserer Umwelt.

Ein weiterer Aspekt, der seit der Einführung der LED als Beleuchtungsmittel immer mehr in den Vordergrund rückt, ist die Verwendung von dynamischer Beleuchtung. Es wird argumentiert, dass durch eine dynamische Beleuchtung die Qualität der Arbeitsbedingungen gesteigert werden kann. Zum einen wird eine Beleuchtung vorgeschlagen, die den Menschen durch die Verwendung von kälterer und hellerer Beleuchtung in seinen Tiefphasen wieder aktivieren soll (siehe Abbildung 1).

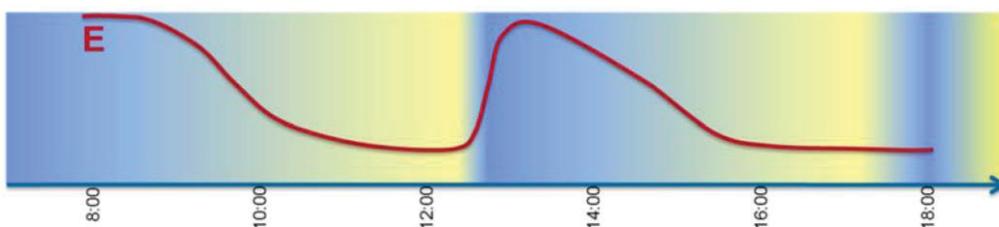


Abbildung 1: Konzept der aktivierenden Beleuchtung

Ein anderes Beleuchtungskonzept sieht eine Nachstellung des „natürlichen“ Verlaufes der Sonne vor. Die Beleuchtungsstärke und die Farbtemperatur steigen bis zum Mittag auf ein Maximum und fallen im Verlauf des Nachmittags wieder ab (siehe Abbildung 2).

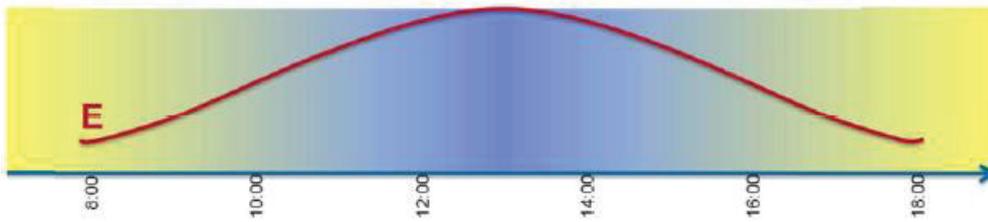


Abbildung 2: „natürliche“ Beleuchtung

Um eine entsprechende dynamische Beleuchtung auslegen zu können, ist es wichtig zu wissen, wie sich das Spektrum in unserer Büroumgebung zusammensetzt bzw. wie es sich über den Verlauf des Tages wirklich verändert.

1.1 Ziel des Beitrages

Ziel der Studie ist es, einen besseren Überblick über den Zustand der Beleuchtung an normalen Büroarbeitsplätzen zu bekommen. Hierzu müssen eine Reihe von ausgewählten Büroräumen hinsichtlich Farbtemperatur, Farbwiedergabe und der spektralen Zusammensetzung in Abhängigkeit diverser Einflussgrößen wie Wetterlage und Ausrichtung der Fenster vermessen werden. Zusätzlich soll die Verteilung der Beleuchtungsstärke in den Büroräumen aufgenommen werden.

1.2 Stand der Forschung und Forschungshypothesen

Die Zusammensetzung des Spektrums und somit unserer Wahrnehmung wird nicht nur durch das direkte Licht bestimmt, sondern auch durch das an Oberflächen reflektierte indirekte Licht, das durch Reflexionen an den Raumbegrenzungsflächen, Möbeln, Bürogegenständen und Vorhängen entsteht. Bisherige Studien zum Beleuchtungszustand von Büroarbeitsplätzen haben ihren Schwerpunkt auf der Betrachtung der Beleuchtungsstärke und der Akzeptanz bzw. des Wohlbefindens bei der Verwendung von Leuchtstofflampen [2], [3], [5]. Sehr ausführlich wurde zudem in der Vergangenheit untersucht, wie hoch die Beleuchtungsstärke sein muss, damit der Sehkomfort und somit die Arbeitsleistung nicht negativ beeinflusst werden [2].

Am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt hat eine Voruntersuchung ergeben, dass die Farbtemperatur der natürlichen Beleuchtung über den Tagesverlauf nahezu konstant bleibt [3].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden in mehreren Büros die Messgrößen Beleuchtungsstärke, Farbtemperatur sowie das Spektrum aufgenommen. Schwerpunkt der Arbeit ist die empirische Betrachtung der Thematik „spektrale Zusammensetzung“ in Büroräumen sowie deren Verhalten im Verlauf des Tages bei den von den Büroangestellten bevorzugten Lichtverhältnissen.

2 Messungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden insgesamt 39 Büroräume an verschiedenen Tagen und Uhrzeiten vermessen. Die Büros befinden sich in unterschiedlichen Gebäuden und sind für zwei bis vier Personen ausgelegt. Tabelle 1 zeigt die Orientierung der Fenster der verschiedenen Räume.

Tabelle 1: Fensterausrichtung der vermessenen Büroräume

Norden	NO	Osten	SO	Süden	SW	Westen	NW
3	2	10	4	4	4	10	1

In den meisten Büros sind die Fenster nach Osten und Westen ausgerichtet (jeweils 10 Büros). Es wurde nur ein Büro mit nordwestlicher Fensterausrichtung vermessen. Die Anzahl der Büros mit Fenstern in die übrigen Himmelsrichtungen liegt zwischen zwei bis vier.

Die Messwerte wurden in den Monaten Januar, Februar, April und Mai aufgenommen. Der Großteil der Büros (35) ist mit Langfeldleuchten vom Typ T5 und Farbkeennung 840 ausgestattet. Die restlichen vier Räume sind mit T5 Leuchten mit einer Farbkeennung 958 ausgestattet. Die Beleuchtungsstärke und die Farbtemperatur wurden an sechs selbst definierten Messpunkten mit einem Farbmessgerät HCT-99 der Firma Gigahertz-Optik aufgenommen (siehe Abbildung 3).

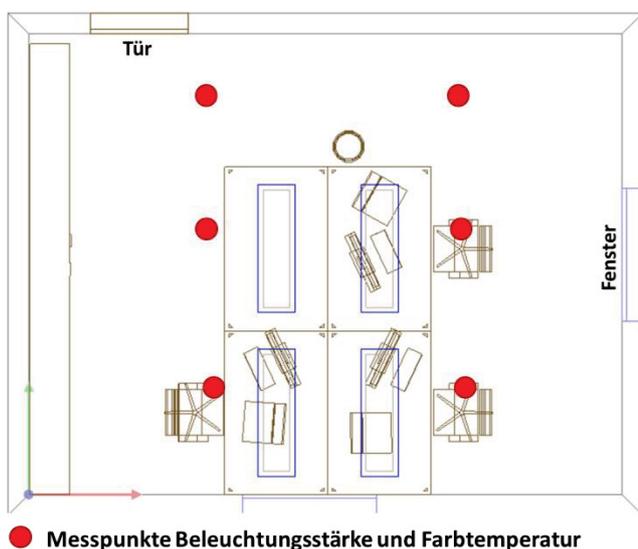


Abbildung 3: Beispiel für die Verteilung der Messpunkte im Raum

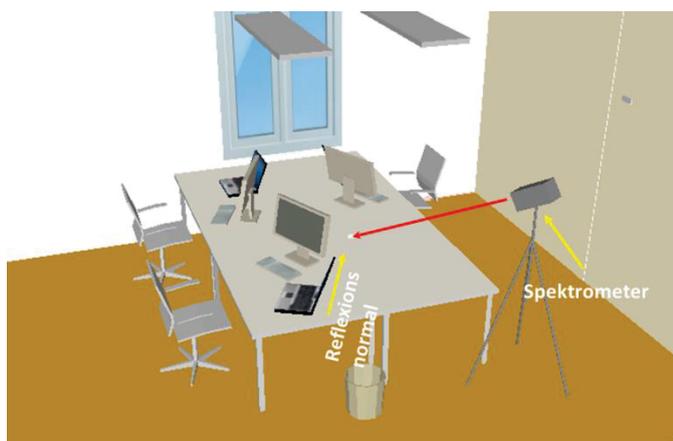


Abbildung 4: Beispiel für den Messpunkt für das Spektrum

Das Spektrum wurde einmalig in der Mitte des Raumes mit Hilfe eines weißen aselectiven und diffusen Reflexionsnormals und eines spektralen Strahllichtmessgeräts vom Typ CS-1000 der Firma Konica Minolta vermessen (siehe Abbildung 4).

3 Ergebnisse

3.1 Beleuchtung

Im Folgenden wird zwischen eingeschalteter und ausgeschalteter Beleuchtung unterschieden. Einige Büroräume wurden mehrmals vermessen. In Tabelle 2 sind die mittlere Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur aufgelistet. In den Monaten Januar und Februar wurden insgesamt 20 Messungen durchgeführt. In 17 Fällen war das Licht eingeschaltet. Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass der mittlere Beleuchtungsstärkewert an Büroarbeitsplätzen mit eingeschaltetem Licht mehr als doppelt so hoch ist wie an Arbeitsplätzen mit ausgeschaltetem Licht.

Tabelle 2: Beleuchtungsstärke für die Monate Januar und Februar

	Mittlere Beleuchtungsstärke [lx]
Messwerte bei ausgeschalteter Beleuchtung (Januar – Februar)	383
Messwerte bei eingeschalteter Beleuchtung (Januar – Februar)	899

Abbildung 5 zeigt die prozentuale Verteilung der jeweiligen Beleuchtungssituationen.

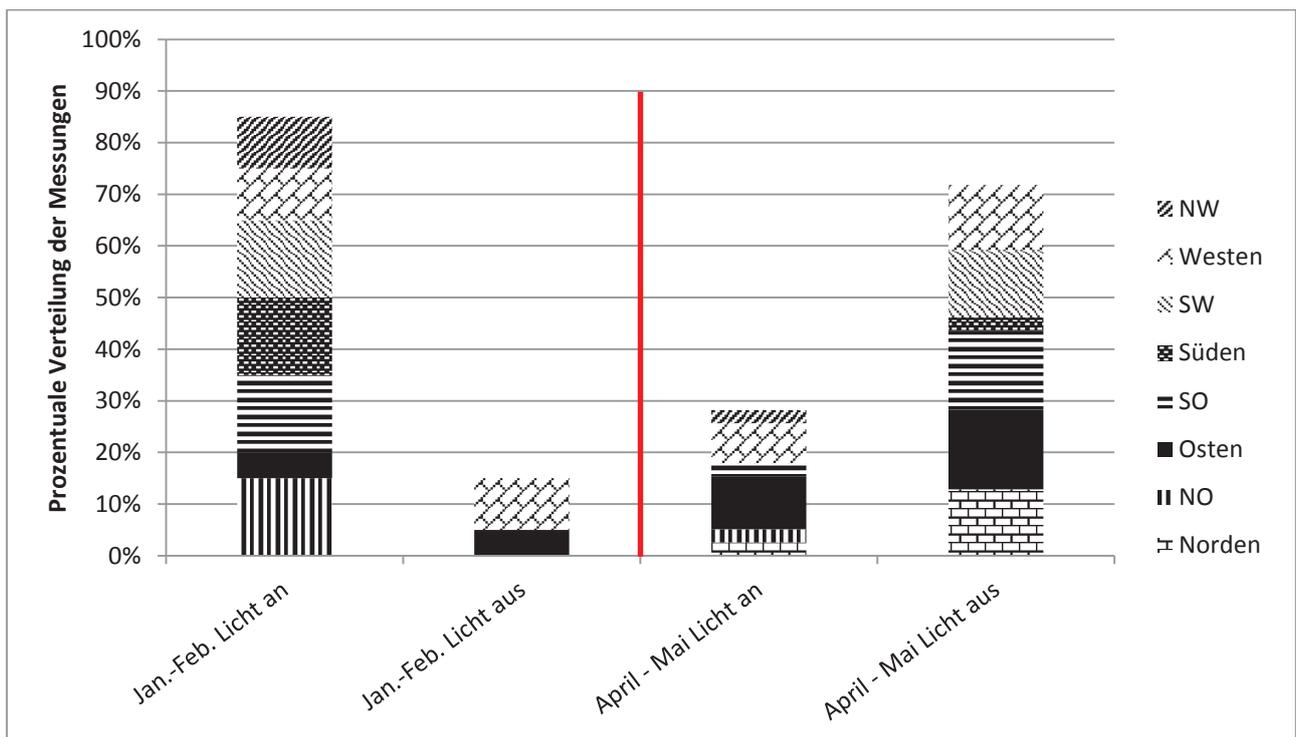


Abbildung 5: Prozentuale Verteilung der aufgenommenen Beleuchtungssituationen

Aus Abbildung 5 ist erkennbar, dass in den Wintermonaten 85 % der Büroangestellten mit eingeschaltetem Licht gearbeitet haben, während es im Frühling 28 % waren. Es kann davon ausgegangen werden, dass bevorzugt mit ausgeschaltetem Licht gearbeitet wurde, wenn die Lichtverhältnisse am Arbeitsplatz ausreichend waren.

3.2 Farbtemperatur

Abbildung 6 zeigt die über die Monate Januar bis Mai aufgenommenen mittleren Farbtemperaturen. Es ist ersichtlich, dass die mittlere Farbtemperatur für Büroarbeitsplätze ohne künstliche Beleuchtung bei etwa 5500 K liegt. Die Werte für Räume mit künstlicher Beleuchtung schwanken zwischen 4600 K und 5000 K. Es ist anzunehmen, dass die Schwankungen durch die Ausrichtung und Größe der Fenster und Türen zustande kommen. Weitere Einflussgrößen sind Oberflächenreflexionen sowie die Wetterlage. Die höhere Unregelmäßigkeit bei der künstlichen Beleuchtung kommt unter anderem auch daher, dass Leuchtmittel mit unterschiedlicher Farbkennung verwendet wurden (Farbkennung 840 und 958). Des Weiteren sind produktionsbedingte Schwankungen in der Farbtemperatur sowie die unterschiedlichen Abnutzungsgrade der Leuchtmittel und der Leuchtenoptiken nicht auszuschließen.

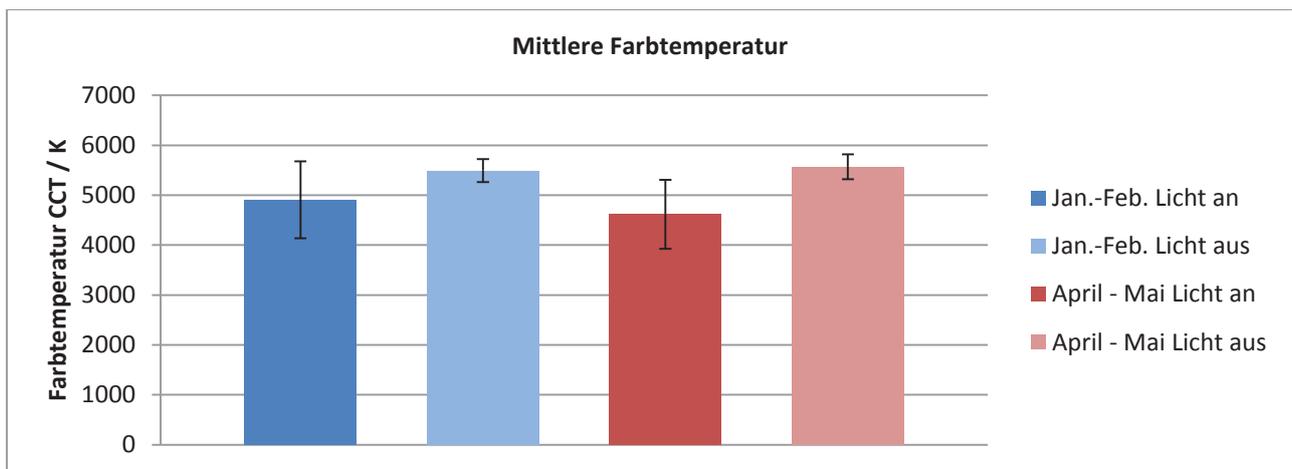


Abbildung 6: Farbtemperatur für die Monate Januar, Februar, April und Mai

3.3 Farbwiedergabe

In Abbildung 7 sind die gemittelten Farbwiedergabewerte R_a an den acht bekannten CIE-Farben mit moderater Sättigung sowie der gemittelte R_9 -Wert (gesättigtes Rot) für die Monate April und Mai dargestellt.

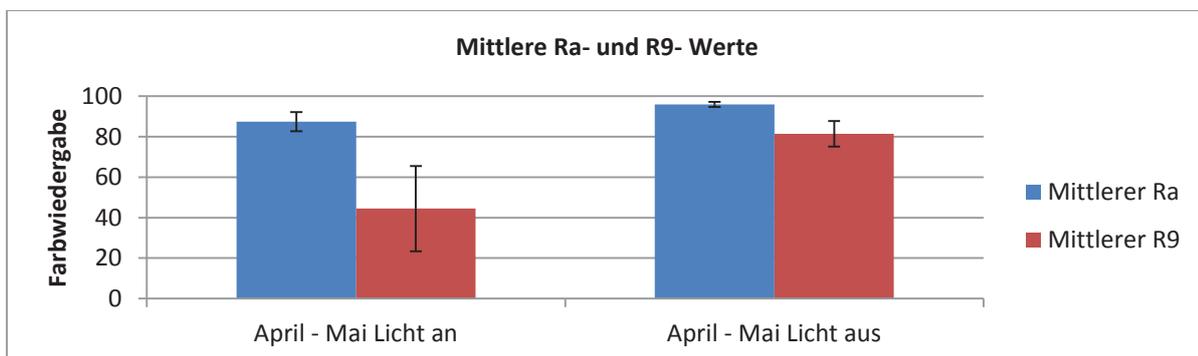


Abbildung 7: Farbwiedergabe für die Monate April und Mai

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die Farbwiedergabe mit eingeschaltetem Licht geringer ist als bei ausgeschaltetem Licht. Besonders groß sind die Unterschiede bei den R_9 -Werten. Generell sind die Farbwiedergabewerte an Büroarbeitsplätzen mit künstlicher Beleuchtung geringer als mit natürlichem Licht. Wie bei der Farbtemperatur kann man

annehmen, dass die auftretenden Unregelmäßigkeiten durch die Fensterausrichtung sowie durch Oberflächenreflexionen und Anteil der Sonnenstrahlung zustande kommen.

3.4 Spektren

Im Folgenden wird auf die Beleuchtungssituation einiger „typischer“ Büroräume genauer eingegangen. Aufgrund der Vielfalt der Einflussgrößen sollen hier nur vier Räume betrachtet werden. (Tabelle 3).

Tabelle 3: Messbedingung der ausgewählten Büroräumlichkeiten

Raum	Datum	Uhrzeit	Ausrichtung Fenster	Wetterlage	Farbwiedergabe R_a	Farbtemperatur CCT in K	Licht an/aus
Raum 19	26.04.12	15:15	Westen	Sonnig	81	3939	Licht an
Raum 22	11.05.12	15:00	Osten	Sonnig	95	6127	Licht aus
Raum 24	26.04.12	10:30	Südosten	Bewölkt	96	5864	Licht aus
Raum 38	10.05.12	10:40	Osten	Sonnig	90	4922	Licht an

Die Spektren dieser Räume sind in den Abbildung 8 bis Abbildung 11 dargestellt. An den Büroarbeitsplätzen waren zum Zeitpunkt der Messung T5-Longfeldleuchten mit einer Farbkennung 840 installiert. Aus dem Spektrum in Abbildung 8 kann man erkennen, dass im Raum 19 zum Zeitpunkt der Messung das Spektrum der künstlichen Beleuchtung dominiert. Die allgemeine Farbwiedergabe ist mit einem Wert von 81 vergleichsweise niedrig, aber noch normkonform. In Raum 38 hat das Tageslicht einen starken Einfluss auf das im Raum vorherrschende Spektrum. Das lückenhafte Spektrum der T5- Leuchte wird hier durch das Sonnenlicht ergänzt, wodurch sich der Farbwiedergabewert auf 90 erhöht. Die Räume 22 und 24 wurden bei unterschiedlichen Wetterlagen vermessen. Die Farbtemperatur morgens mit einem Wert von 5864 K etwas geringer als nachmittags (6127 K). Die allgemeine Farbwiedergabe ist mit einem Wert von über 95 in beiden Räumen sehr hoch. Zur Verdeutlichung der Auswirkungen des Spektrums auf die Farbwahrnehmung sind in Abbildung 12 die vierzehn Farbwiedergabeindizes der vier Räume dargestellt. Die Abbildung 13 zeigt die vierzehn CIE-Testfarben.

Die Grafik zeigt, dass in Raum 19 vor allem die gesättigten Farben schlechter bewertet werden. Besonders das gesättigte Rot (R9-Farbe), die gelbe Farbe R10, die blaue Farbe R12 sowie die moderat gesättigte grün-gelbe Farbe R3 haben im Vergleich zu den anderen Räumen einen relativ niedrigen Wert.

Bisher hat man öfter in der lichttechnischen Literatur die Bedeutung vom Tageslicht bezüglich des gesundheitstechnischen Aspekts hervorgehoben. Der hohe Anteil an Tageslicht bringt auch mitunter die wesentlich bessere Farbwiedergabe und andere Farbqualitätsverbesserungen (Farbpräferenz, chromatische Helligkeit, Farbharmonie, Farbgamut). Die positive Seite des Tageslichts bezüglich der Raumwirkung, Objektbrillanz, Wahrnehmung von Raumtiefen, Identifikation der Textur der Bürogegenstände (z. B. Sofaleder, Holztextur) und somit die psychologischen Aspekte des Tageslichts über die oben genannten Farbqualitätsaspekte werden deshalb einen Fokus-punkt der Lichtforschungsgruppe der TU Darmstadt in den nächsten Jahren bilden.

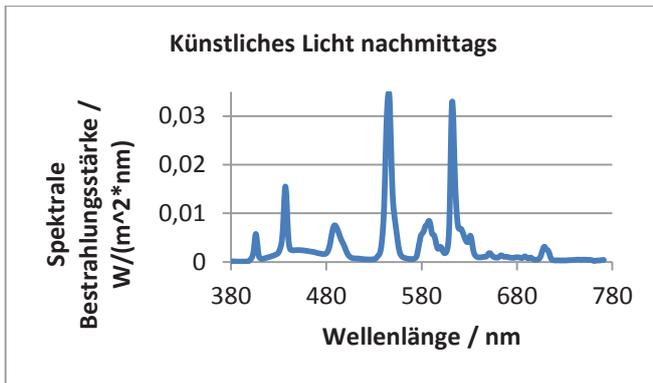


Abbildung 8: Spektrum Raum 19

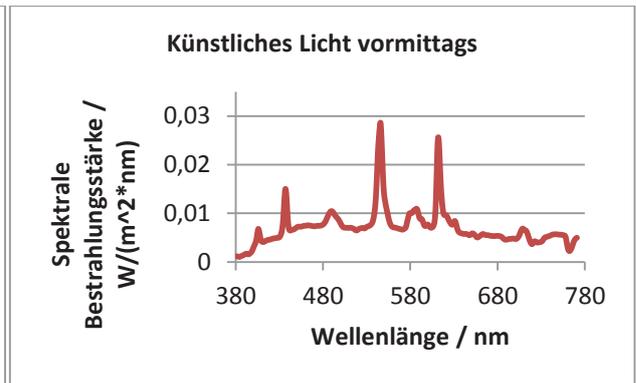


Abbildung 9: Spektrum Raum 38

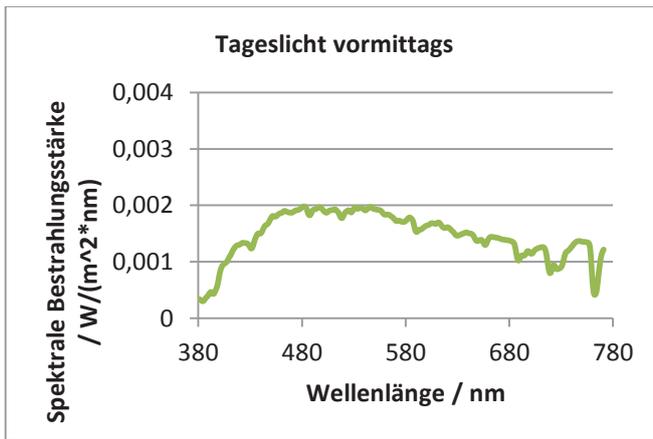


Abbildung 10: Spektrum Raum 24

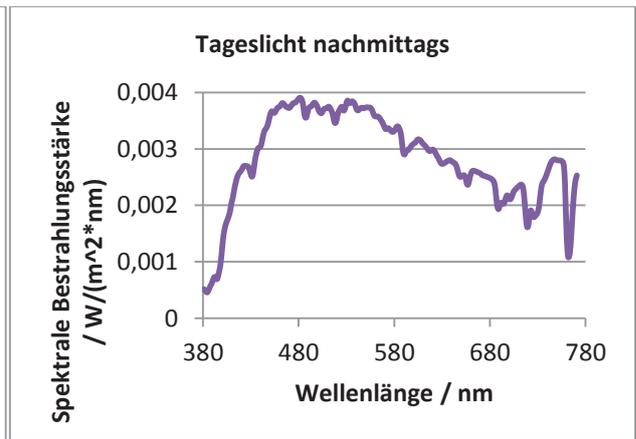


Abbildung 11: Spektrum Raum 22

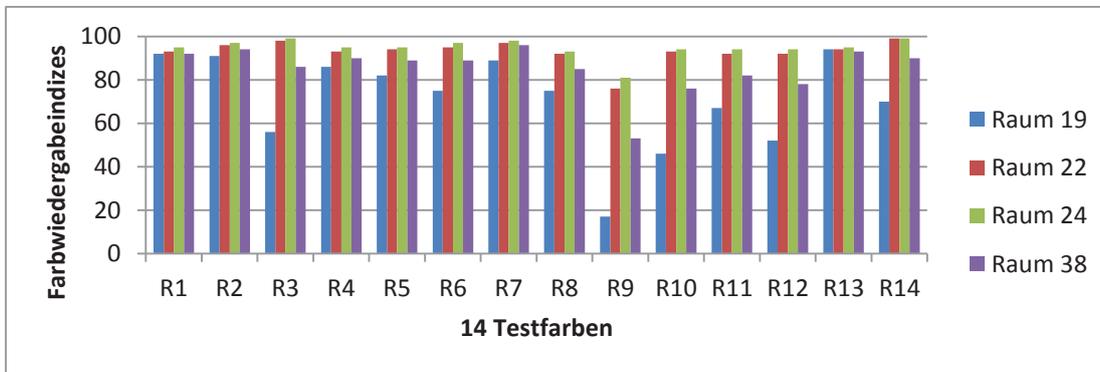


Abbildung 12: Farbwiedergabeindizes der vermessenen Räume



Abbildung 13: CIE-Testfarben TCS01-TCS14 zur Bestimmung der Farbwiedergabeindizes [6]

4 Zusammenfassung

Einflussparameter wie Wetterlage, Tages- und Jahreszeit, sowie die individuellen Vorlieben der Büroangestellten machen es schwer, allgemeingültige Aussagen zu treffen. Generell konnte folgendes beobachtet werden:

In den Monaten Januar und Februar wurde in 85 % der Fälle mit eingeschaltetem Licht gearbeitet, da die natürlichen Lichtverhältnisse für die entsprechende Bürotätigkeit nicht ausgereicht haben. In den vermessenen Räumen war die mittlere Beleuchtungsstärke bei eingeschaltetem Licht mit einem Wert von 899 lx mehr als doppelt so hoch wie mit ausgeschaltetem Licht (383 lx).

In den Monaten April und Mai war in einen großen Teil der Fälle das Tageslicht für die Büroangestellten ausreichend. Die künstliche Beleuchtung war nur in 28% der Fälle eingeschaltet.

Unabhängig von der Jahreszeit liegt die mittlere Farbtemperatur für Büroarbeitsplätze ohne künstliche Beleuchtung bei etwa 5500 K. In Büroräumen mit künstlicher Beleuchtung schwankt die Farbtemperatur zwischen 4600 K und 5000 K je nach Leuchtmittel und Sonnenlichtanteil. Generell sind die Farbwiedergabeindizes an Büroarbeitsplätzen mit künstlicher Beleuchtung geringer als mit natürlichem Licht.

5 Literatur

- [1] DIN EN 12464-1: Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen
- [2] Çakir, A.: Forschungsbericht Licht und Gesundheit – Eine Untersuchung zum Stand der Beleuchtungstechnik in deutschen Büros, Studie Ergonomic 2010
- [3] Pepler, W.: Messungen der natürlichen Beleuchtung im Freien und im Büro. Tagung Licht und Gesundheit, TU Berlin, März 2012
- [4] Moosmann, C.: Untersuchungen zum visuellen Komfort am Arbeitsplatz. Studie, Karlsruhe
- [5] Moosmann, C.: Nutzerbewertung von Tageslicht am Büroarbeitsplatz Studie, Karlsruhe, 2011
- [6] Ohno Y.: Color Quality Scale (Excel Spread Sheet), NIST

Untersuchung an LED-Leuchten im Bürobereich

*Ingo Herzog, Cornelia Vandahl, Karin Bieske, Christoph Schierz, Ales Markytan
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik*

Tagung LICHT 2012, Berlin, Tagungsband S. 84-91

1 Einleitung

Leuchten mit LEDs kommen in der Allgemeinbeleuchtung immer mehr zu Einsatz. Die in den gültigen Normen und Regelwerken definierten und festgelegten Gütemerkmale werden auch für diese neuen Systeme angewendet. Dabei ist nicht gesichert, dass die für klassische Leuchten entwickelten Systeme auf die neuen Systeme übertragbar sind.

Ziel der Studie war ein Vergleich der Beleuchtungsqualität zwischen LED-Leuchten und herkömmlichen Bürobeleuchtungen, wobei insbesondere folgende Gütemerkmale betrachtet wurden: Beleuchtungsstärke, Lichtverteilung, Blendung, Reflexblendung und Schleierreflexion am Bildschirm.

Die Untersuchung der Gültigkeit der klassischen Gütemerkmale für die LED-Beleuchtung steht derzeit ganz am Anfang. Eine Vielzahl von Untersuchungen hat gezeigt, dass die Bewertung der Farbwiedergabe von LEDs nach dem derzeitigen System Probleme machen kann und man zu einer neuen Bewertung kommen muss. Für die Bewertung der Blendung ist das auch zu erwarten, bisher aber nicht untersucht. Weiterhin bieten LED-Leuchten neue technische Möglichkeiten der Lichtgestaltung, wie z. B. die Farbveränderlichkeit. Dafür existieren bisher noch keine Gütemerkmale.

Forschungshypothesen:

1. LED-Leuchten sind hinsichtlich Blendung, Reflexblendung und Schattigkeit kritischer als klassische Leuchten, vor allem dann, wenn ein direkter Blick in die LEDs möglich ist.
2. LED-Leuchten mit diffusen oder lichtlenkenden Abschluss-Scheiben unterscheiden sich hinsichtlich Lichtverteilung und Blendung nicht von klassischen Leuchten.
3. Das gewünschte Helligkeitsniveau wird aufgrund des abweichenden Spektrums anders bewertet.

2 Versuchsaufbau

In einem Testraum (6,6 m x 4,2 m, Höhe 2,8 m) wurden 5 LED-Leuchten-Systeme und 2 Rasterleuchten-Systeme mit Leuchtstofflampen installiert. Je drei Leuchten eines Systems

beleuchteten dabei eine Raumzone. Die Beleuchtungsstärke betrug in der Nutzebene 500 lx im ganzen Raum und wurde durch Dimmen (PWM) der Leuchten eingestellt. Außerhalb der zu bewertenden Zone wurde das Beleuchtungsniveau durch zusätzliche blendfreie Leuchten auf 300 lx eingestellt, damit immer der ganze Raum beleuchtet wurde. Die Farbtemperatur betrug bei allen Leuchten etwa 4000 K (Ausnahme: Leuchte L2: 3500 K). Abbildung 1 zeigt alle untersuchten Leuchten, die in Tabelle 1 beschrieben sind.

Im Raum befanden sich zwei Arbeitsplätze, ein Schreib-Arbeitsplatz und ein Bildschirm-arbeitsplatz (Abbildung 2). An diesem führte der Proband entsprechende Tätigkeiten durch.

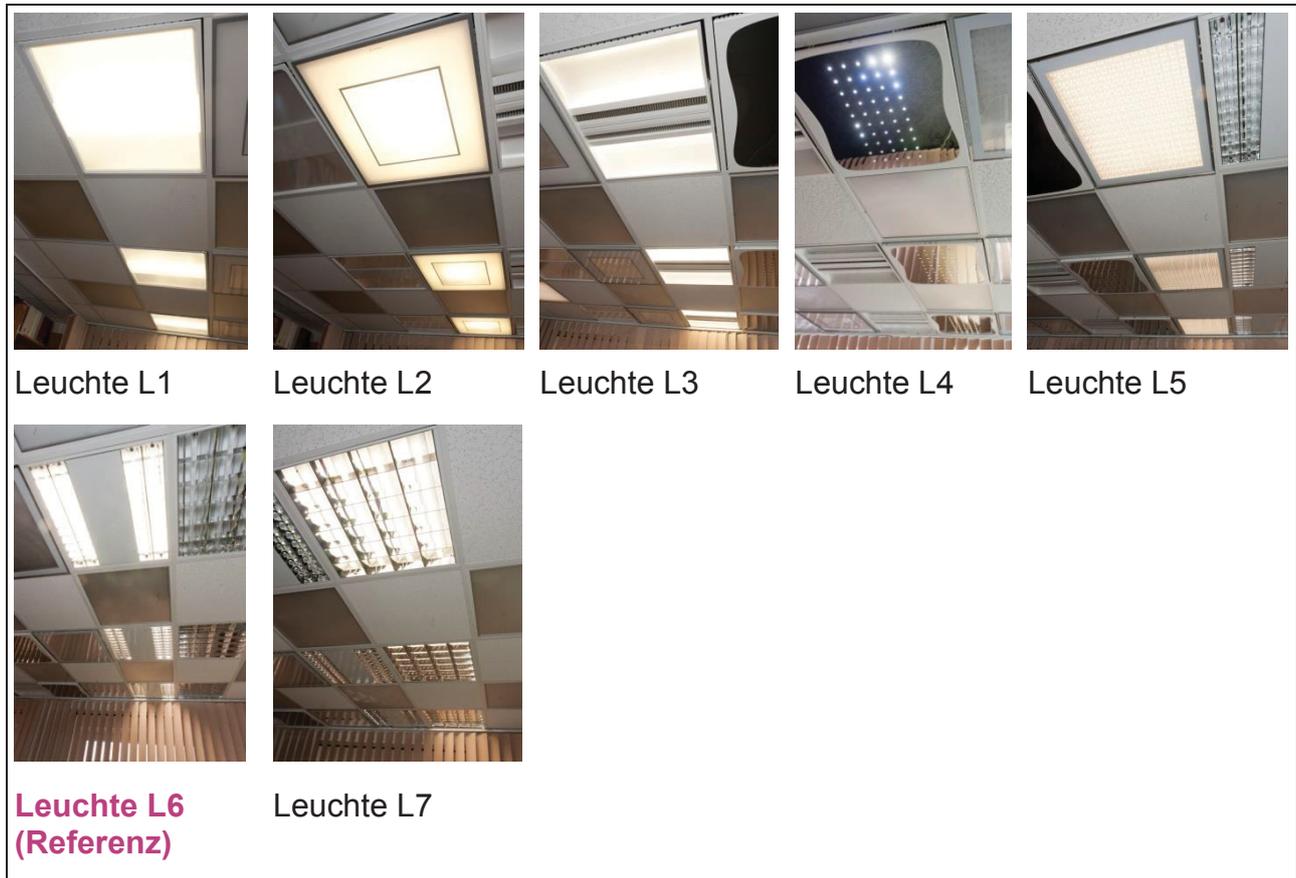


Abbildung 1: untersuchte Leuchten

Tabelle 1: Übersicht über die untersuchten Leuchten

L1	direkt strahlende Leuchte mit LED, teilweise Abstrahlung über diffusen Reflektor, teilweise über Prismenstruktur
L2	direkt strahlende Leuchte mit LED, Prismenabdeckung
L3	direkt strahlende Leuchte mit LED, Abstrahlung über diffusen Reflektor
L4	direkt strahlende Leuchte mit LED, Abstrahlung einzelner LEDs über Linsenoptik
L5	direkt strahlende Leuchte mit LED, Prismenabdeckung
L6 (Referenz):	Spiegelraster-Leuchte mit T5-Leuchtstofflampen
L7	Spiegelrasterleuchte mit T8-Leuchtstofflampen

3 Untersuchungsmethode

25 Testpersonen führten Büroarbeiten am Schreibtisch und am Bildschirm aus und bewerteten mittels Fragebögen (Abbildung 3) die Situationen jeweils einzeln. Am Schluss der Befragung gaben sie an, welches System sie favorisieren würden. Weiterhin wurde ermittelt, welches Beleuchtungsniveau von den Testpersonen als angenehm empfunden wurde.



Die Bewertung erfolgte anhand einer Gegensatzskala (Abbildung 3), die teilweise eine neutrale Mitte hat (hier beispielsweise die 1. Frage). Für die Auswertung wurden den Urteilen Zahlenwerte zugeordnet (im Beispiel grau hinterlegt). Im Gegensatz zum hier angegebenen Beispiel, waren die negativen Pole der Skala nicht immer rechts.

Abbildung 2: Schreibeplatz im Testraum. Im Hintergrund ist der Bildschirm-Arbeitsplatz zu sehen.

Die dargebotene Lichtsituation ... (bitte schauen Sie dabei auf die Arbeitsfläche)		
ist zu hell	oooooooooooooooooooo	ist zu dunkel
	↑ genau richtig	
Bewertungsskala	+3 0 -3	
hat eine angenehme Lichtfarbe	oooooooooooooooooooo	hat eine unangenehme Lichtfarbe
Reflexionen stören mich nicht	oooooooooooooooooooo	Reflexionen stören mich stark
Bitte schauen Sie sich nun die Leuchten an der Decke an!		
Die Leuchten ...		
gefallen mir sehr gut	oooooooooooooooooooo	gefallen mir gar nicht
haben ein ansprechendes Design	oooooooooooooooooooo	Design ist nicht ansprechend
schaffen eine angenehme Atmosphäre	oooooooooooooooooooo	schaffen eine unangenehme Atmosphäre
blendet mich nicht	oooooooooooooooooooo	blendet mich stark
erzeugen keine Nachbilder	oooooooooooooooooooo	erzeugen viele Nachbilder
Die Schatten ...		
sind weich	oooooooooooooooooooo	sind hart
stören mich nicht	oooooooooooooooooooo	stören mich stark
Bewertungsskala:	0 6	

Abbildung 3: Auszug aus dem Fragebogen, grau: für den Probanden nicht sichtbare Bewertungsskala

4 Ergebnisse

4.1 Übersicht

In der Auswertung erfolgten die Erstellung einer Rangfolge hinsichtlich der Bewertung jedes Gütemerkmals und eine Korrelationsbetrachtung zwischen Befragungsergebnissen und Messwerten. So kann auf die Gültigkeit der betrachteten Gütemerkmale geschlossen werden

Für alle Bewertungen wurden die Rangfolgen für alle Leuchten bestimmt. Dazu wurde der FRIEDMANN-Rangtest in Kombination mit einem Paarvergleich verwendet.

Die statistisch signifikanten Rangfolgen sind in Abbildung 3 dargestellt. Angegeben ist jeweils der Mittelwert der Bewertungen über alle Probanden. Die Fragen und Skalierungen entsprechen denen in Abbildung 4.

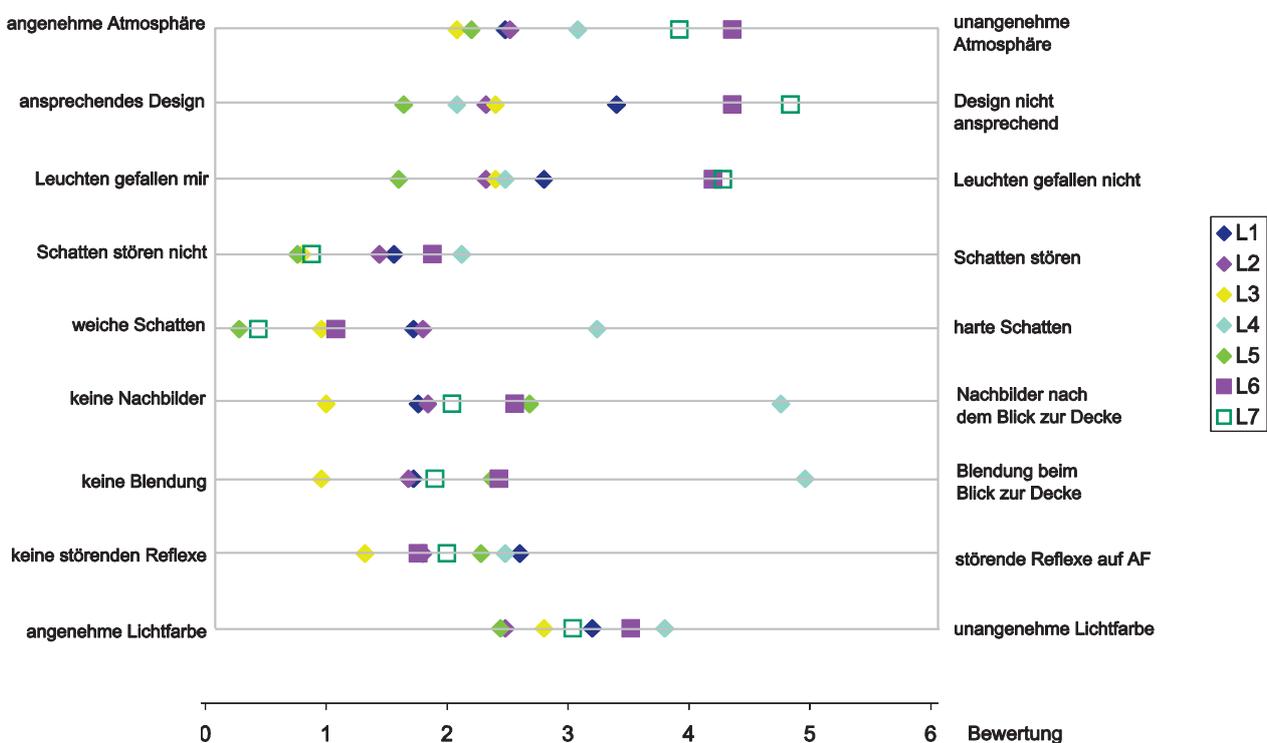


Abbildung 4: Rangfolge der Bewertung, dargestellt ist jeweils der Mittelwert der Bewertung

Die Leuchten unterscheiden sich hinsichtlich der Gütemerkmale Lichtfarbe, störender Reflexe auf der Arbeitsfläche, Blendung beim direkten Blick in die Leuchte und Schattenbildung. Auch hinsichtlich Design der Leuchten und allgemeine Angaben zur Lichtatmosphäre sind Unterschiede erkennbar. Für alle anderen Bewertungen gibt es keine statistisch signifikante Rangfolge. Hier ist kein Unterschied in der Bewertung der Leuchten nachweisbar.

4.2 Helligkeitsniveau

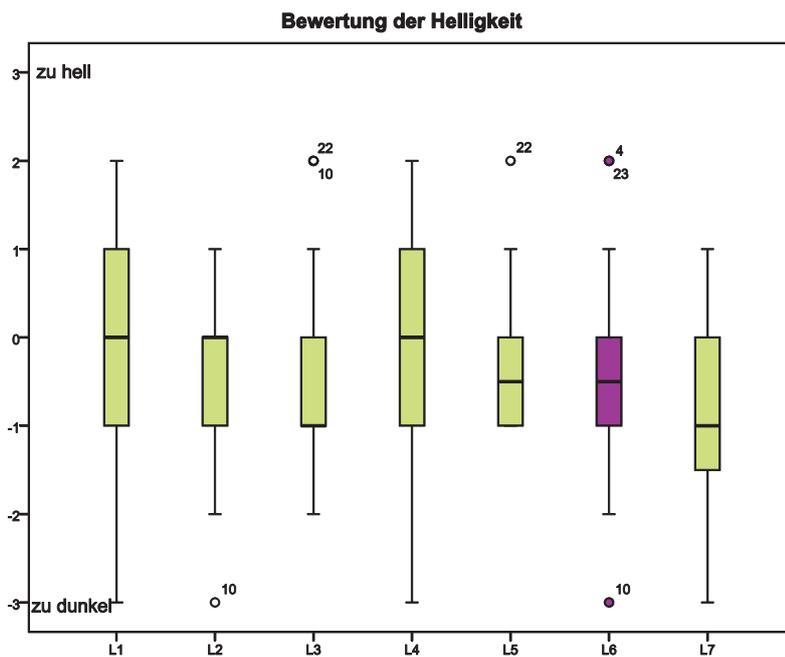


Abbildung 5: Median und Boxplot der Bewertung der Helligkeit

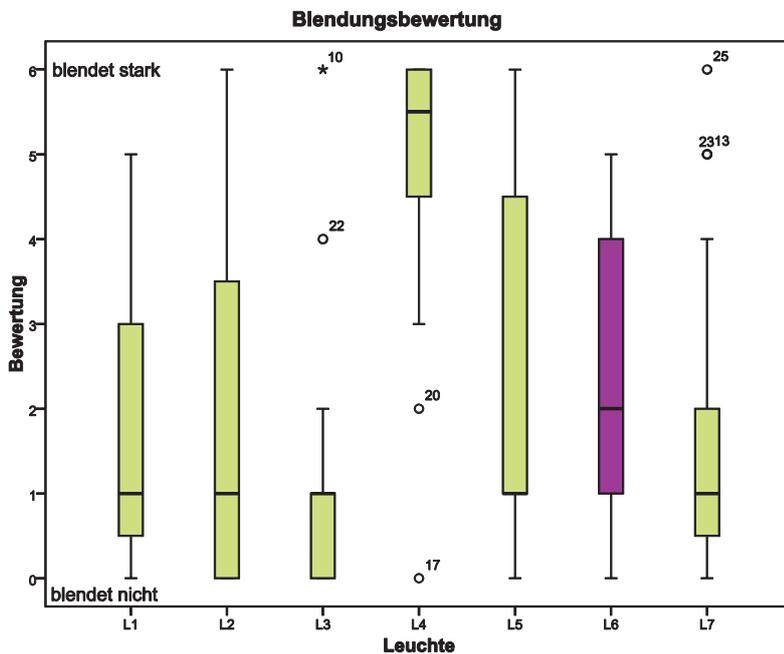


Abbildung 6: Median und Boxplot der Blendungsbewertung beim direkten Blick in die Leuchte

Leuchte L5 die Blendung als „deutlich“ bzw. „stark“ bewertet (Abbildung 6). Die Blendungsbewertung der Leuchte L4 unterscheidet sich signifikant von der der Referenzleuchte L6. Hier wirkt sich aus, dass über die Optik direkt in die LED gesehen werden kann. Für diese Konstellation würde sich rechnerisch ein UGR-Wert von etwa 50 ergeben.

Für alle untersuchten Leuchten wurde das Beleuchtungsniveau zunächst mit 500 lx vorgegeben. Diese Situationen wurden von den Probanden auch in etwa gleich hell bewertet. Es ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Leuchten. Die Bewertung liegt im Bereich „hell genug“ bis „etwas zu dunkel“ (Abbildung 4).

Im weiteren Verlauf wurde den Testpersonen angeboten, die Beleuchtungsstärke zu erhöhen. Bei allen Leuchten entschieden sich dabei 72 bis 80 % der Testpersonen für eine Erhöhung auf 750 lx bzw. 1000 lx. Letztere Einstellung war nicht bei allen Leuchten möglich, da die meisten LED-Leuchten einen geringeren Lichtstrom als die Referenzleuchte hatten.

4.3 Blendungsbewertung

Bei für Schreib- und Bildschirmarbeit typischen Blickrichtungen ist bei allen Leuchten die Blendung als eher gering eingeschätzt worden. Es ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Leuchten nachweisbar. Die UGR-Werte (Herstellerangabe) der Leuchten lagen alle im Bereich 16 bis 22.

Beim direkten Blick in die Leuchte wird bei den Leuchten L4 und der Hälfte der Testpersonen auch bei

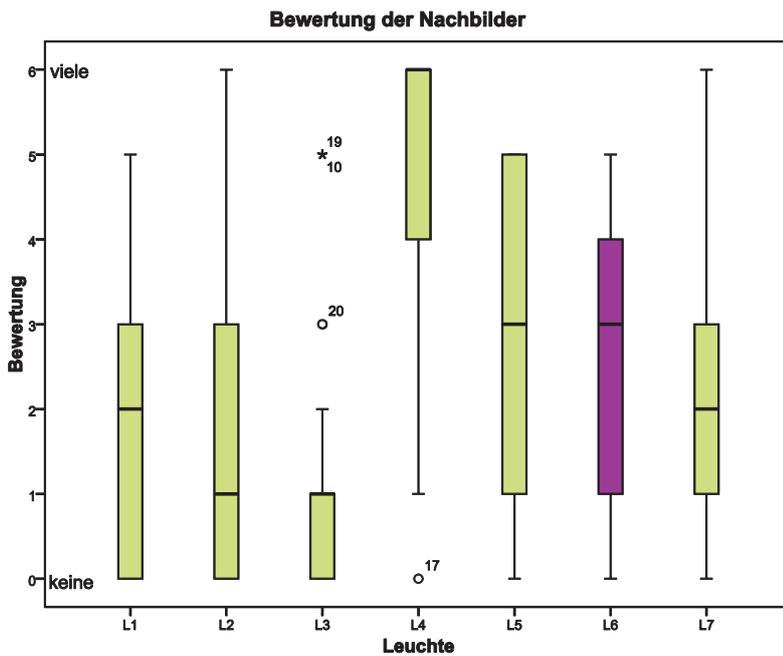


Abbildung 7: Median und Boxplot der Bewertung der Nachbilder nach dem direkten Blick in die Leuchte

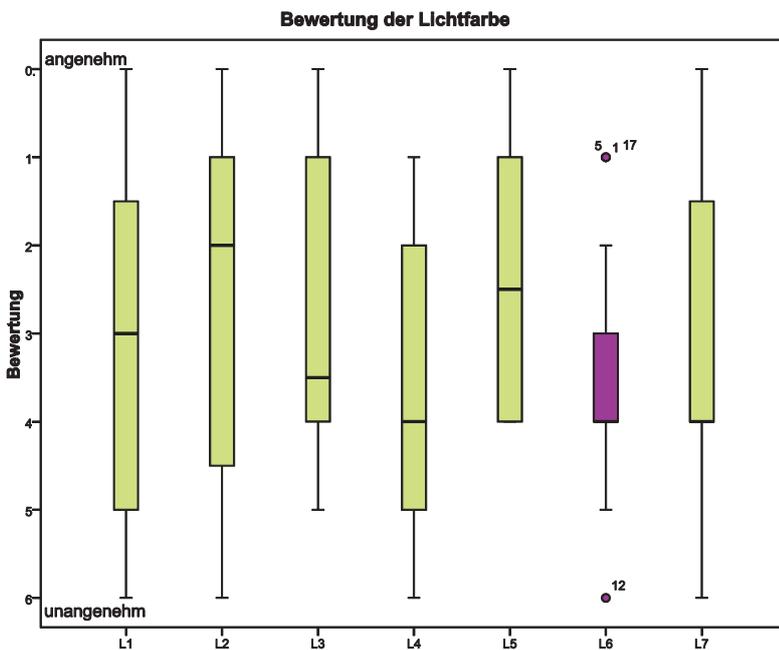


Abbildung 8: Median und Boxplot der Bewertung der Lichtfarbe

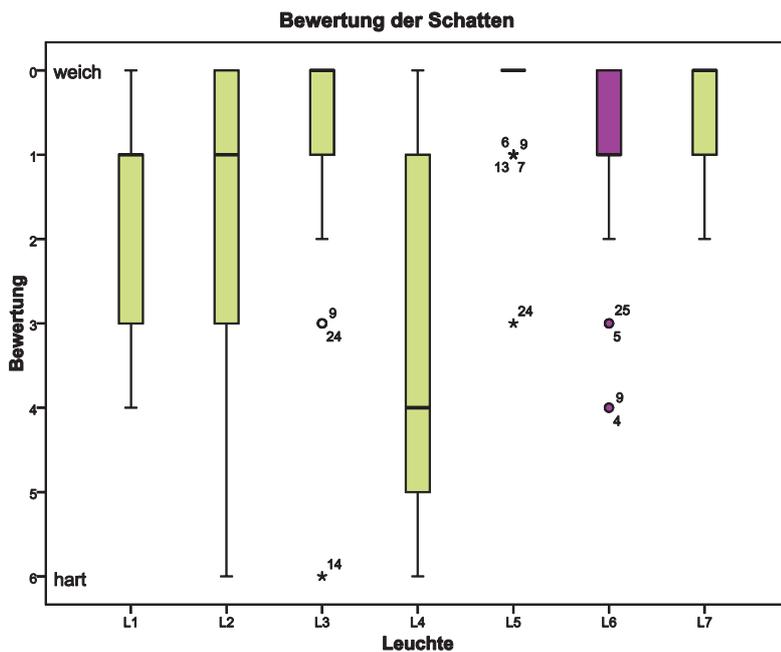
Leuchte L5 unterscheidet sich in der Blendungsbewertung nicht von der Referenzleuchte L6. Bei den Leuchten L1, L2 und L3 tritt weniger Blendung als bei der Referenzleuchte L6 auf.

Nachbilder nach dem direkten Blick in die Leuchte werden ähnlich wie die Blendung beim direkten Blick in die Leuchte bewertet (Abbildung 7). Hier macht sich bemerkbar, dass bei der Leuchte L4 deutlich höhere Leuchtdichten, als bei der Referenzleuchte auftreten. Dieser Effekt ist jedoch im derzeitigen Blendungs-Bewertungssystem nicht enthalten, solange man nur typische Blickrichtungen betrachtet.

4.4 Bewertung der Lichtfarbe

In der Bewertung der Lichtfarbe ergaben sich Unterschiede (Abbildung 8) wobei bei der Referenzleuchte L6 und der Leuchte L4 die Lichtfarbe als signifikant unangenehm als bei den Leuchten L2, L3 und L5 bewertet wurde. Da die Leuchten nahezu die gleiche Lichtfarbe haben (4000 K, Ausnahme L2: 3500 K), sind hier Einflüsse des Spektrums (Abbildung 12) erkennbar. Die Testpersonen haben eventuell die Farbwiedergabe mit in die Bewertung einbezogen. Der Farbwiedergabewert CRI aller Leuchten war größer 80 (Ausnahme L4: $R_a=67$).

4.5 Bewertung der Schatten



Harte Schatten wurden nur bei Leuchte L4 festgestellt. Durch die Lichtabstrahlung über einzelnen Linsen traten hier sehr viele Schatten auf, die als „hart“ und „störend“ bewertet wurden. Bei allen anderen Leuchten traten nur als angenehm empfundene weiche Schatten auf (Abbildung 9).

Abbildung 9: Median und Boxplot der Bewertung der Schatten

4.6 Störende Reflexe

Störende Reflexe auf der Arbeitsfläche wurden von Testpersonen kaum festgestellt. In der Rangfolge am schlechtesten bewertet wurden die Leuchten L1, L4 und L5. Hier traten mehr Reflexe auf als bei der Referenzleuchte L6. Es konnte kein Zusammenhang der Bewertung mit den gemessenen CRF-Werten festgestellt werden. Die CRF-Mittelwerte lagen alle im Bereich 0,94 bis 0,96, Die Minimalwerte lagen bei 0,70 bis 0,79 (Ausnahme L4: 0,59). Diese Leuchte wurde allerdings nicht am schlechtesten bewertet.

Die Reflexblendung am Bildschirm wurde für alle Leuchten als unkritisch bewertet, was zu erwarten war, da alle Leuchten in den relevanten Abstrahlrichtungen gut entblendet sind.

4.7 Weitere Bewertungen

Neben den Güteigenschaften wurden noch weitere Kriterien, wie das Gefallen der Leuchte und der Lichtatmosphäre abgefragt. Die LED-Leuchten waren in allen Kriterien besser als die Rasterleuchte. Da hier verschiedenen Technologien miteinander verglichen wurden, ist die Aussage nicht sehr repräsentativ. Leuchten mit Leuchtstofflampen und gleicher Lichtlenktechnologie wie die LED-Leuchten (Prismenabdeckung und Diffusor) wären eventuell auch besser bewertet worden. Insgesamt hat sich gezeigt, dass mit LED-Leuchten ein Raum ansprechend beleuchtet werden kann. Die Bewertung der Raumatmosphäre korreliert nicht mit der Abstrahlcharakteristik der Leuchten (Abbildung 9).

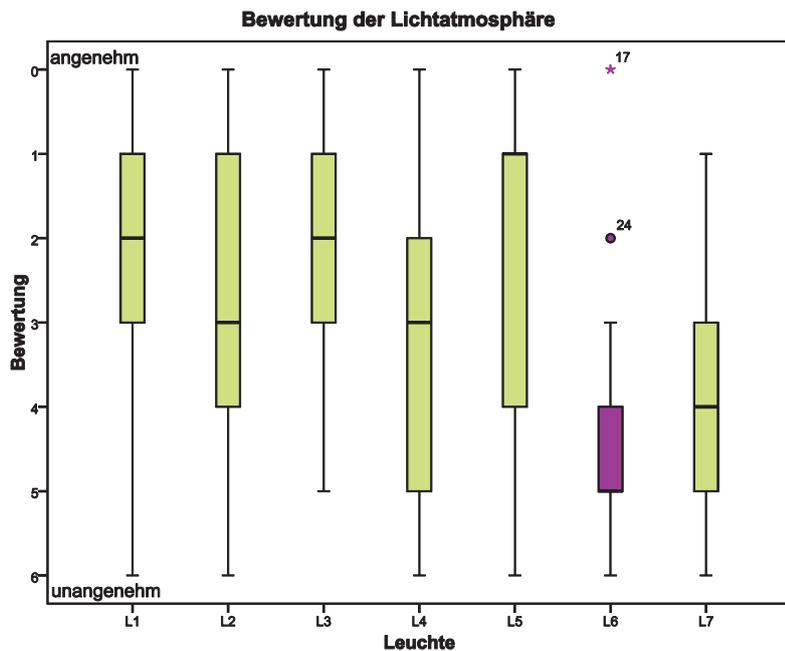


Abbildung 10: Median und Boxplot der Bewertung der Lichtatmosphäre

5 Zusammenfassung

Die Untersuchung hat gezeigt, dass mit LED-Leuchten Büroräume gut beleuchtet werden können. Die Forschungshypothesen konnten im Wesentlichen bestätigt werden:

1. LED-Leuchten sind hinsichtlich Blendung, Reflexblendung und Schattigkeit kritischer als klassische Leuchten, vor allem dann, wenn ein direkter Blick in die LEDs möglich ist.

Bei Leuchten, die einen direkten Blick auf die LEDs ermöglichen, muss ein besonderes Augenmerk auf die Güteermerekmale Blendung und Schattigkeit gelegt werden.

Die sehr hohen Leuchtdichten der LEDs führten beim direkten Blick in diese zu starker Blendung und auch zu Nachbildern. Diese Effekte werden durch das UGR-Blendungsbewertungssystem nicht erfasst, da dieses von einer waagerechten Blickrichtung ausgeht. Die nach dem Blick in die Leuchte auftretenden Nachbilder sind jedoch deutlich störender als die Blendung selbst. Hier gibt es akuten Forschungsbedarf.

Hinsichtlich Reflexblendung auf dem Bildschirm gab es keine Unterschiede zwischen den LED-Leuchten und der Referenzleuchte, da alle Leuchten in die relevanten Richtungen gut entblendet sind. Reflexe auf der Arbeitsfläche traten bei einigen LED-Leuchten etwas stärker in Erscheinung als bei der Referenzleuchte.

Sind an der Leuchtenoberfläche sehr hohe Punktleuchtdichten vorhanden, führt das zu einer störenden Schattenbildung. Für diese Form der Mehrfachschatten gibt es bisher kein Bewertungssystem.

2. LED-Leuchten mit diffusen oder lichtlenkenden Abschluss-Scheiben unterscheiden sich hinsichtlich Lichtverteilung und Blendung nicht von klassischen Leuchten.

Bei LED-Leuchten mit diffusen Reflektoren und/oder Prismenabdeckungen ergaben sich kaum Unterschiede zwischen den LED-Leuchten und der hier als Referenz verwendeten Rasterleuchte. Reflexe auf der Arbeitsfläche treten bei einigen Leuchten etwas stärker in

Erscheinung. Hinsichtlich Reflexblendung am Bildschirm gibt es keine nachgewiesenen Unterschiede zwischen den LED-Leuchten und der Referenzleuchte.

3. Das gewünschte Helligkeitsniveau wird aufgrund des abweichenden Spektrums anders bewertet.

Diese These konnte nicht bestätigt werden. Es wurden keine signifikanten Unterschiede in der Helligkeitsbewertung festgestellt. In der Tendenz werden höhere Beleuchtungsstärken als der Wartungswert in der Norm für Bürobeleuchtung gewünscht.

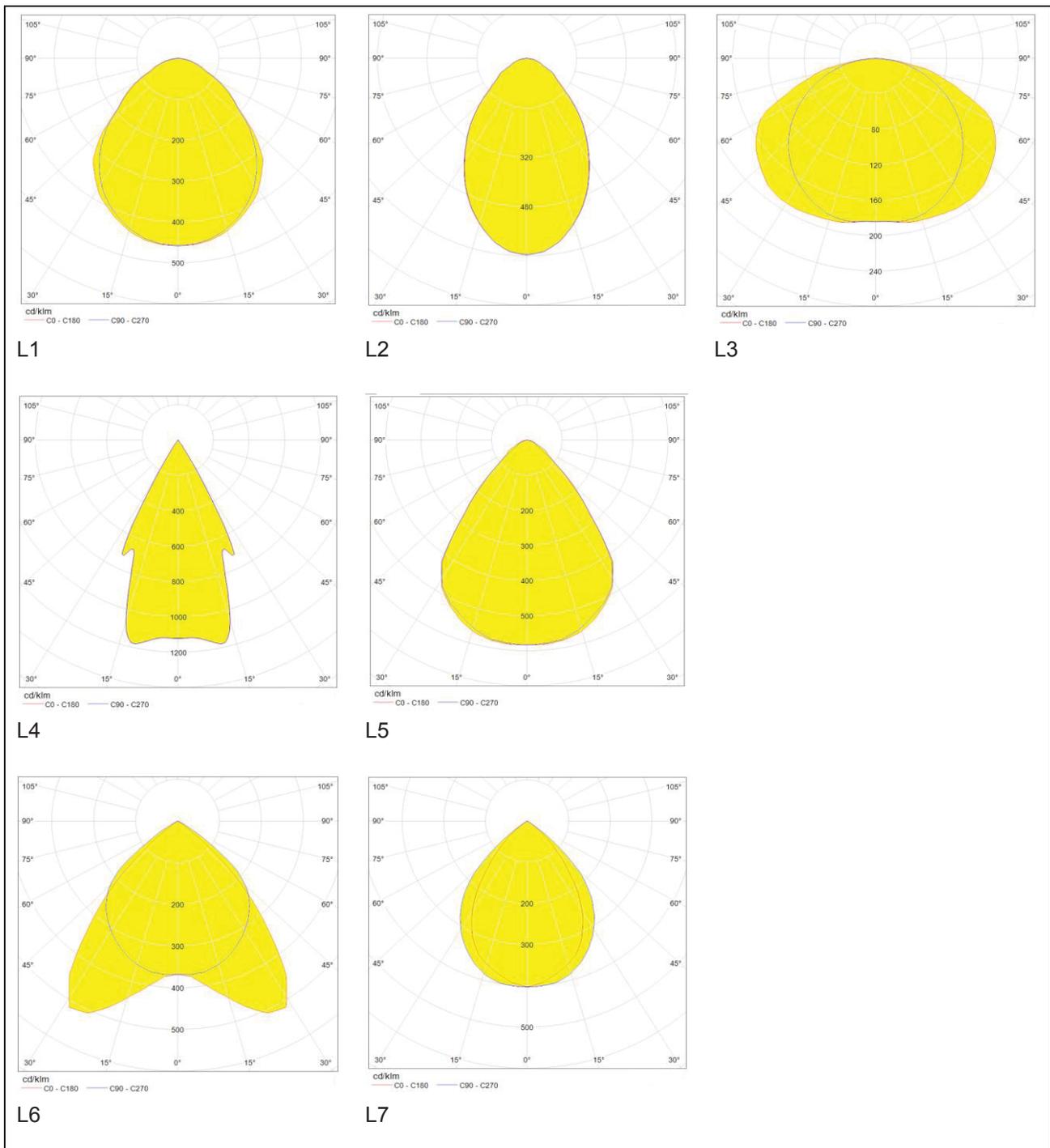
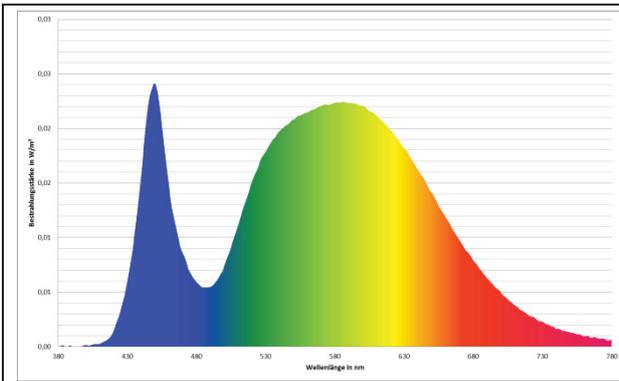
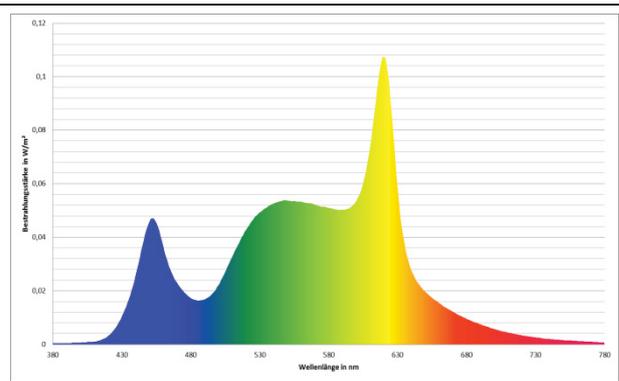


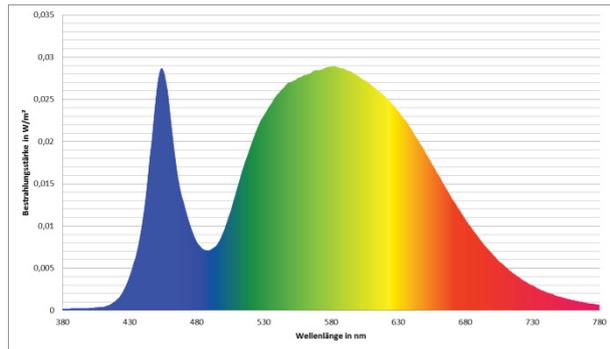
Abbildung 11: Lichtverteilung der untersuchten Leuchten



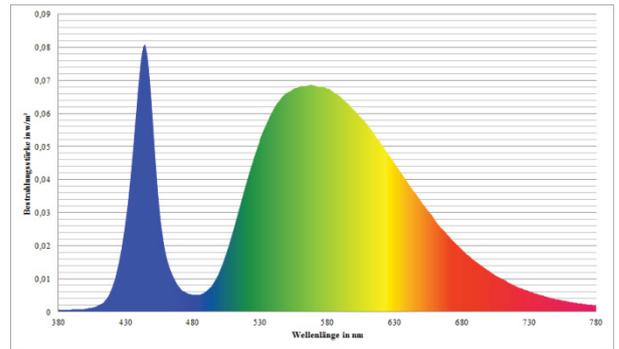
L1



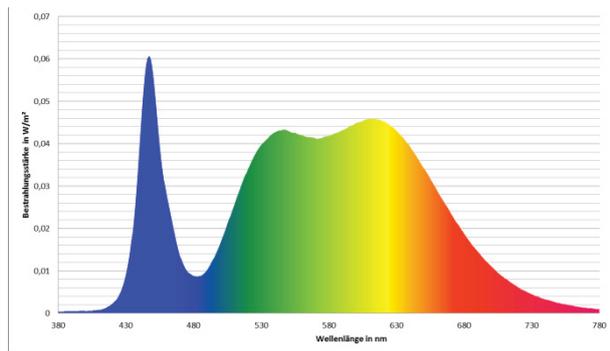
L2



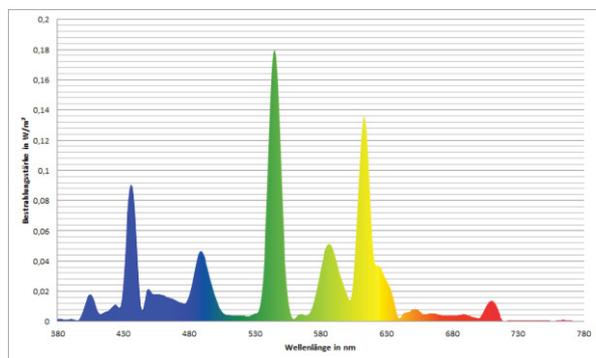
L3



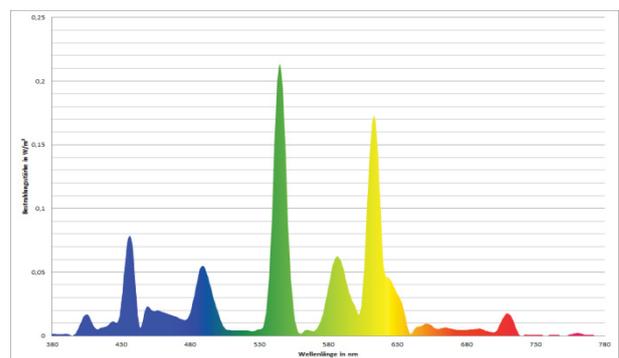
L4



L5



L6



L7

Abbildung 12: Spektren der untersuchten Leuchten

Neue 3-Kammer-Methode für die Psychometrie der Farbqualität für weiße LEDs

Nathalie Krause, Stefan Brückner, Peter Bodrogi, Tran Quoc Khanh
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik

Tagung LICHT 2012, Berlin, Tagungsband S. 469-475

1 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag beschreibt ausgewählte Ergebnisse eines Versuchs, der sich am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt mit dem Vergleich von Farbqualitätsaspekten verschiedener marktüblicher Lichtquellen beschäftigt. Ziel der Untersuchung ist es, die Gültigkeit einer neuen psychometrischen Methode zu analysieren. Die neue Methode soll erschließen, inwieweit sich zwei unterschiedliche Testlichtquellen in Bezug auf eine Referenzbeleuchtung unterscheiden.

Als Farbqualitätsmerkmale wurden die Farbpräferenz sowie die chromatische Helligkeit gewählt. Es wurde für jeden der drei Parameter zum einen ein Probandentest und zum anderen eine messtechnische Bewertung durchgeführt.

2 Einleitung

In der allgemeinen Innenraumbelichtung spielt die wahrgenommene Farbqualität eine entscheidende Rolle. Die Farbqualität hat mehrere Aspekte, wie Farbwiedergabe, chromatische Helligkeit der beleuchteten Objekte, optische Klarheit, Farbharmonie, Farbpräferenz, Farbgedächtnis und Farbgamut [1]. Diese Aspekte der Farbqualität wurden bisher auf kontinuierlichen visuellen Skalen mit Hilfe eines Vergleichs der Farberscheinung farbiger Objekte zwischen einer Test- und einer Referenzlichtquelle erfasst. Dabei ist es sehr wichtig, den Testpersonen eine eindeutig durchführbare Sehaufgabe zu stellen, um die verschiedenen Aspekte der Farbqualität auseinander zu halten und visuell zuverlässig bewerten zu können.

Zu diesem Zweck besteht unsere neue Forschungsidee darin, in einer 3-Kammer-Box neben der Referenzlichtquelle gleichzeitig mit zwei Testlichtquellen zu arbeiten, die die gleichen farbigen Testobjekte beleuchten. Damit besteht an unserem Fachgebiet die Möglichkeit, die Farbqualitätsaspekte zweier marktüblicher Lichtquellen (z.B. marktübliche Weiß-LEDs oder Kompaktleuchtstofflampen) gleichzeitig direkt mit einer Referenzlichtquelle zu vergleichen. In diesen Paarvergleichen [2] werden, im Gegensatz zu früheren Arbeiten, statt der kontinuierlichen Bewertungsskalen auch kategorische Skalen (sehr gut,

gut, mäßig, usw.) eingesetzt, die den alltäglichen Entscheidungsvorgängen der Benutzer besser entsprechen [3]. Somit soll mit dieser Arbeit untersucht werden, inwieweit sich die heute marktüblichen Lichtquellen der Innenraumbeleuchtung hinsichtlich der oben erwähnten Farbqualitätseigenschaften unterscheiden.

3 Untersuchungsmethodik

Am Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt wurde eine 3-Kammer-Box zum Testen der oben erwähnten Farbqualitätseigenschaften aufgebaut, die in Abbildung 1 schematisch und in Abbildung 2 mit allen Objekten in der Realität dargestellt ist.

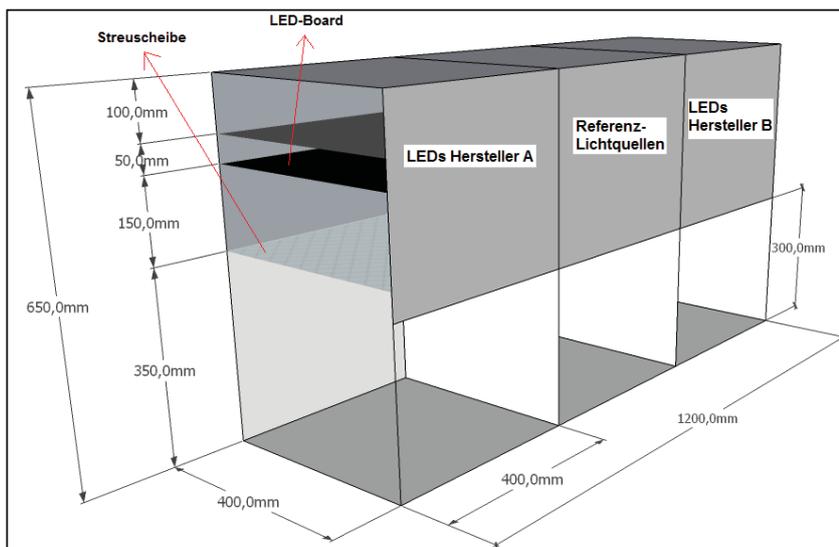


Abbildung 1: Schematischer Boxaufbau



Abbildung 2: 3-Kammer-Box mit allen Objekten

Folgende Testbedingungen sind gegeben:

- 2 Farbtemperaturen pro Kammer (2700 K, 5400 K)
- Beleuchtungsstärke $E = 1100 \text{ lx} \pm 50 \text{ lx}$ auf allen drei Boxböden
- Kammer 1 (links): marktübliche weiße LEDs (WLEDs) plus RGB-LEDs ($R_{a,2700K} = 69$ und $R_{a,5400K} = 71$)
- Kammer 2 (Mitte): Referenz-Lichtquellen, Halogen- und Leuchtstofflampe (LSL) ($R_{a,2700K} = 99$ und $R_{a,5400K} = 91$)
- Kammer 3 (rechts): Kompaktleuchtstofflampen (CFL) plus RGB-LEDs ($R_{a,2700K} = 84$ und $R_{a,5400K} = 81$)
- 30 farbige Objekte in jeder Kammer: Macbeth Color Checker, Textilien, künstliches Obst und Blumen sowie eine Barbie-Puppe

In jeder Kammer wurde pro Farbtemperatur visuell der gleiche Weißpunkt in der Mitte des Bodens eingestellt. Unter jeder der sechs möglichen Beleuchtungen (zwei pro Kammer) wurde für jedes Objekt mit einem Spektroradiometer (CS2000A von Konica Minolta) das Reflexionsspektrum $R(\lambda)$ gemessen. Die spektrale Strahlendichte der 6 Lichtquellen ist in Abbildung 3 zu sehen.

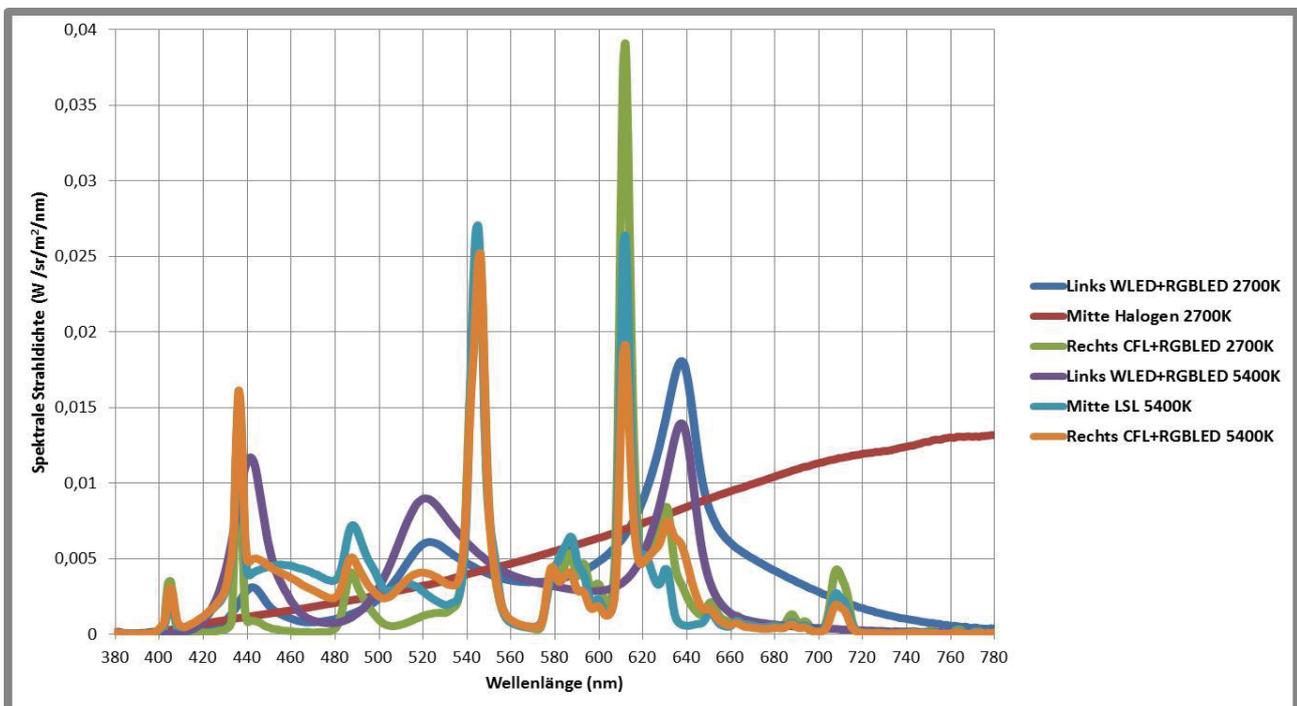


Abbildung 3: Spektrale Strahlendichte der sechs marktüblichen Lichtquellen

3.1 Untersuchte Parameter

Die folgenden Farbqualitätsmerkmale wurden untersucht: chromatische Helligkeit und Farbpräferenz. Bei der chromatischen Helligkeitsuntersuchung sollen die Testpersonen entscheiden, ob die Beleuchtung der linken Kammer (bzw. die Hellempfindung der einzelnen Objekte) bezogen auf die Referenzbeleuchtung in der Mitte heller erscheint als die Beleuchtung der rechten Kammer (Ja/Nein-Antwort). Diese Probanden-Ratings werden mit den berechneten chromatischen Helligkeitswerten L^{**} (L^{**} -Modell nach Fairchild und Pirrotta 1991) der einzelnen Objekte verglichen [4].

Die Farbpräferenz bedeutet eine Entscheidung, welche Farberscheinung des gleichen Objekts bevorzugt wird. Die Probanden werden aufgefordert, eine Reihenfolge festzulegen,

die angibt, welche Beleuchtung ihnen am besten gefällt, wobei sie alle Objekte gleichzeitig betrachten. Von allen Lichtquellen wird der CQS Q_a -Wert (Colour Quality Scale) [5] berechnet und mit den Probanden-Ratings in Korrelation gebracht.

3.2 Versuchsablauf

Nachdem alle drei Lichtquellen für die jeweilige Farbtemperatur eingeschaltet und eingeschwungen sind, kommt der Proband in den ansonsten völlig dunklen Raum und nimmt in einem Abstand von etwa 1,5 m zur Box auf einem Stehhocker Platz. Nach einer Adaptationszeit von 5 Minuten, während die Testfragen erklärt werden, beginnt der Test.

Bei jedem Test wurden die Lichtquellen der beiden äußeren Kammern mit der, bezogen auf die Farbtemperatur, passenden Referenzlichtquelle in der Mitte verglichen. Bei den Fragen bezogen auf chromatische Helligkeit werden alle Objekte nacheinander jeweils in der Mitte der Kammerböden platziert. Diese Betrachtung der einzelnen Objekte, anstelle des gesamten Setups, ist nötig, da die Leuchtdichteverteilung innerhalb der drei Kammern nicht exakt gleich ist.

3.3 Fragebogen

Der Fragebogen für diesen ersten Testdurchlauf enthält pro Objekt 4 Entscheidungen. In Tabelle 1 ist er beispielhaft für 4 Objekte dargestellt.

Tabelle 1: Fragebogen. Die Antwortmöglichkeit besteht aus „links“, „Mitte“ oder „rechts“

Probanden- name	Objekt	chromatische Helligkeit Reihenfolge (heller bis dunkler)			Präferenz Reihenfolge	
		1.	2.	3.	1.	2.
Max Mustermann	Kiwi					
	rote Rose					
	Stoff türkis					
	Farbfeld gelb					

3.4 Testpersonen

Die 20 Probanden setzen sich aus 16 männlichen und 4 weiblichen Personen zusammen. Der Altersdurchschnitt liegt bei 32 Jahren, was sich durch die hohe Anzahl der wissenschaftlichen Mitarbeiter und Studenten des Fachgebiets erklären lässt. Die Probanden benötigen zur Teilnahme am Test keine besonderen Vorkenntnisse. Einzige Einschränkung ist, dass sie nicht farbfahlsichtig sind und eine eventuelle Kurz- oder Weitsichtigkeit mittels Brille oder Kontaktlinsen vollständig korrigiert ist. Eine Überprüfung auf Farbfahlsichtigkeit wurde mit dem „Ishihara-Farbtest“ vor Beginn des Versuchs durchgeführt.

4 Ergebnisse

4.1 Messzahlen der Farbqualität

Für alle Lichtquellen wurden die ähnlichste Farbtemperatur T_c , die NIST Color Quality Scale CQS Q_a und Q_1 , der allgemeine Farbwiedergabeindex CIE R_a sowie die speziellen Indizes CIE R_1 bis R_{14} berechnet (Tabelle 2).

Tabelle 2: T_c , Q_a (NIST CQS v9.0b), Q_1 (für die gesättigte rote CQS-Testfarbe) und die CIE-Farbwiedergabeindizes R_a sowie R_1 - R_{14}

Licht- quelle	Links_2700	Mitte_2700	Rechts_2700	Links_5400	Mitte_5400	Rechts_5400
T_c :	2633	2616	2777	5409	5412	5449
CIE R_a :	69	99	84	71	91	81
CQS Q_a :	80	100	83	80	91	87
R_1	63	98	91	79	93	86
R_2	88	99	97	92	99	95
R_3	81	100	50	63	70	55
R_4	51	99	84	53	92	77
R_5	63	98	94	79	98	93
R_6	78	99	88	91	94	87
R_7	77	99	89	65	95	80
R_8	47	98	82	44	89	76
R_9 (rot)	4	94	31	-15	53	71
CQS Q_1 (rot)	90	99	83	81	87	95
R_{10}	77	98	58	81	76	64
R_{11}	36	98	90	47	92	83
R_{12}	71	97	52	75	83	71
R_{13}	68	98	88	88	91	89
R_{14}	86	100	65	78	79	70

Aus Tabelle 2 geht hervor, dass die Lichtquelle in der linken Kammer mit schlechter Farbwiedergabe einen besonders niedrigen (d. h. sehr schlechten) speziellen Farbwiedergabeindex R_9 für die gesättigte rote CIE-Testfarbe (CIETCS09) aufweist. Im Gegensatz dazu befindet sich der Wert des entsprechenden Farbpräferenzindex CQS Q_1 für die gesättigte rote CQS-Testfarbe Nr. 1 im mäßigen (81) bis guten (90) Bereich. Für die Bewertung der chromatischen Helligkeit der einzelnen Objekte wurde jeweils der L^{**} -Wert nach Fairchild-Pirrotta für alle 6 Lichtquellen berechnet. In Bezug auf die Farbpräferenz wurde für jede Beleuchtung der Wert von Q_a berechnet.

4.2 Farbpräferenz

Für die Farbpräferenz der ganzen Anordnung der farbigen Testobjekte (s. Abbildung 2) wurde für jede Lichtquelle die folgende visuelle Präferenzskala (s. Abszisse der Abbildung 4) erstellt: die Anzahl der Testpersonen, die die jeweilige Lichtquelle als „erste Wahl“ (s. Tab. 1) kennzeichneten, wurde mit dem Faktor 3,0 und die Anzahl der „zweiten Wahl“ mit dem Faktor 1,0 multipliziert und diese beiden Werte summiert. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse, die mit der CQS-Farbpräferenzmetrik der NIST (USA) verglichen wurden.

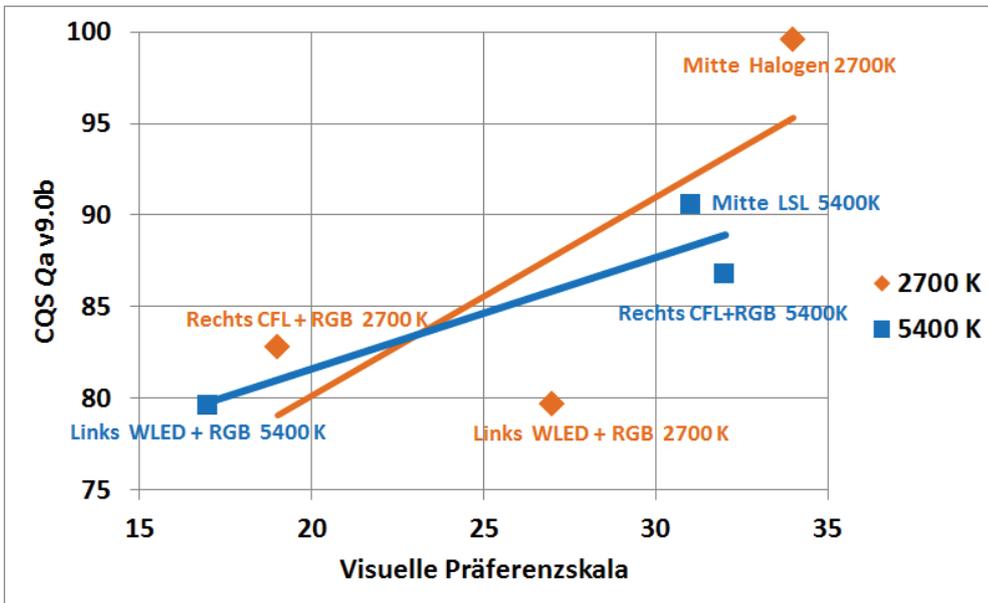


Abbildung 4: Visuelle Farbpräferenzskala und CQS-Farbpräferenzmetrik Q_a

Aus Abbildung 4 geht hervor, dass der Wert von Q_a die visuelle Farbpräferenz tendenziell beschreiben kann. Eine Ausnahme stellt die marktübliche weiße LED-Lichtquelle in Kombination mit den RGB-LEDs bei 2700 K dar, die einen zu niedrigen Q_a -Wert aufweist.

4.3 Chromatische Helligkeit

Für eine anschauliche Deutung der Ergebnisse ist es vorteilhaft, die Reihenfolge der Lichtquellen nach den visuellen Helligkeitsbewertungen der einzelnen farbigen Testobjekte (d. h. Platz 1, 2 oder 3, s. Tab. 1) als kontinuierliche Variable (d. h. 1,0; 2,0 und 3,0) aufzufassen, und die Mittelwerte dieser Bewertungen für alle Testobjekte darzustellen, s. Abbildung 5.

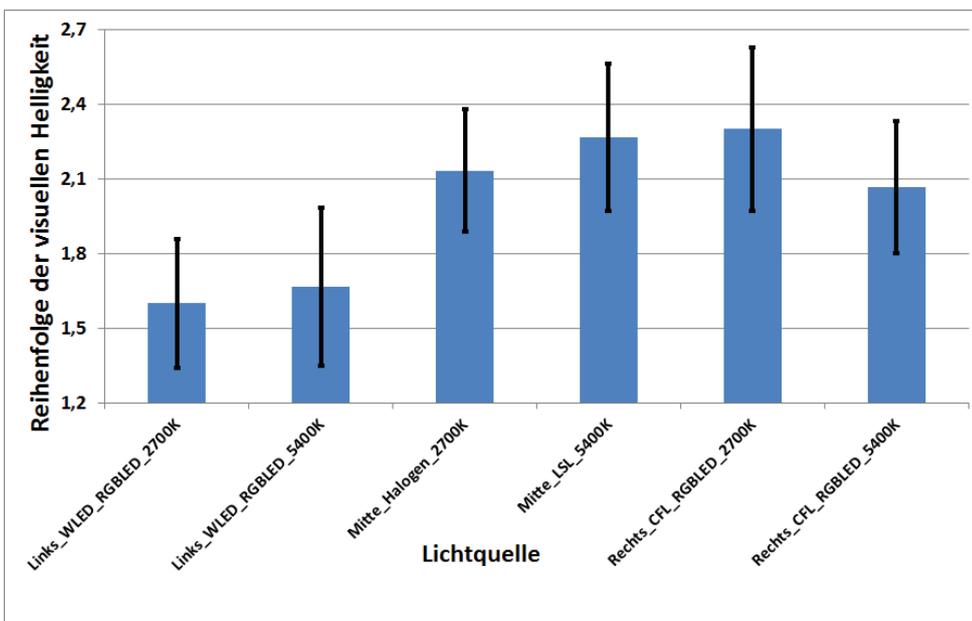


Abbildung 5: Reihenfolge der Lichtquellen nach den visuellen Helligkeitsbewertungen der einzelnen farbigen Testobjekte als kontinuierliche Variable. Mittelwerte für alle 30 Testobjekte und 95%-Konfidenzintervalle, für alle Lichtquellen

Aus Abbildung 5 geht tendenziell hervor, dass die zwei Lichtquellen, die auf den marktüblichen weißen LEDs basieren (WLED + RGBLED), für beide ähnlichste Farbtemperaturen (2700 K und 5400 K), eine höhere Helligkeitsempfindung der farbigen Testobjekte hervorrufen, als die anderen vier Lichtquellen. Die L^{**} -Metrik sagt die Reihenfolge der visuellen Helligkeitsbewertung der farbigen Testobjekte tendenziell richtig voraus (Abbildung 6).

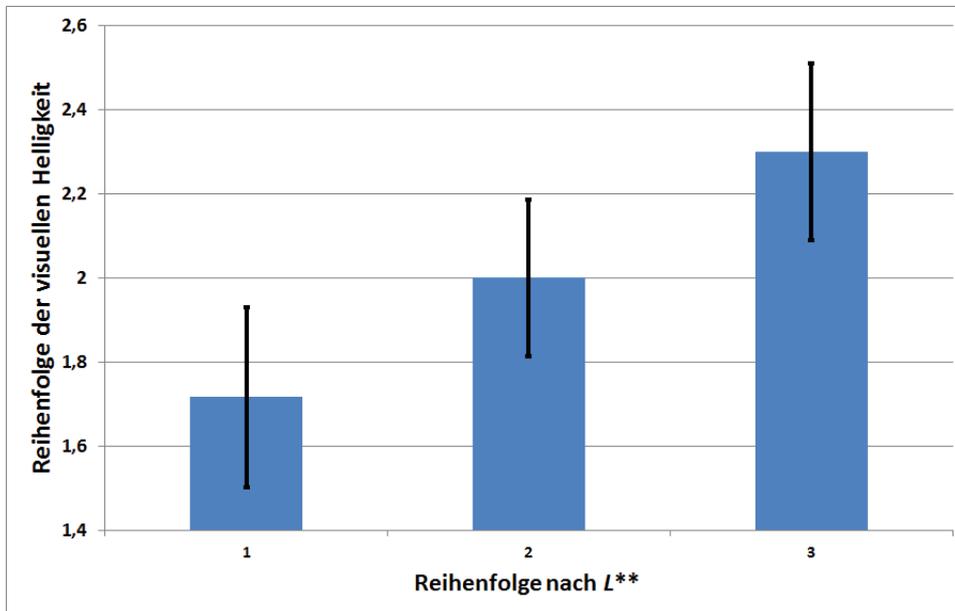


Abbildung 6: Reihenfolge der Lichtquellen nach den visuellen Helligkeitsbewertungen der einzelnen farbigen Testobjekte: Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle für alle 30 Testobjekte (Ordinate), gruppiert nach der Voraussage der Reihenfolge nach der L^{**} -Metrik (Abszisse), s. Text

5 Literatur

- [1] Bodrogi, P.; Brückner, S.; Khanh, T. Q.; Winkler, H.: Visual Assessment of Light Source Color Quality, Color Res. Appl., Early View, 2011.
- [2] Guilford. J. P.: Psychometric methods, New York: McGraw-Hill, 1954.
- [3] Bodrogi, P.; Krause, N.; Brückner, S.; Khanh, T. Q.; Winkler, H.: Psychological relationship between colour difference scales and colour rendering scales, AIC Midterm Meeting, Interaction of Colour & Light in the Arts and Sciences, Zürich, Switzerland, 2011.
- [4] Fairchild M, Pirrotta E, Predicting the lightness of chromatic object colors using CIELAB, Color Research and Application 16, 6 (1991), 385–393.
- [5] Davis, W.; Ohno, Y.: The Color Quality Scale, Optical Engineering, 49(3), 2010.

Rate the Rating: Stufe 2 – Erweiterung der Farbwiedergabeuntersuchungen vom Lichtsimulator zum Testraum

*Katharina Jungnitsch, Christoph Schierz
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik*

Tagung LICHT 2014, Den Haag, Tagungsband

Abstract

In diesem Beitrag wird eine kurze Zusammenfassung der Forschungsarbeit an der TU Ilmenau zur Diskrepanz der Wahrnehmung der Farbwiedergabe und ihrer objektiven Berechnung dargestellt. Es wird gezeigt, dass Untersuchungen, die mit Hilfe von Farbpatches durchgeführt wurden, sowohl im Bereich der Farbwiedergabebewertung, aber insbesondere auch bei der Bewertung von Präferenz oder Natürlichkeit an Grenzen stößt. Auch der Einfluss der Raumwirkung, der bei der subjektiven Bewertung einer beleuchteten Szenerie nicht zu vernachlässigen ist, kann durch einen Lichtsimulator nur unzureichend demonstriert werden. Daher wurde hier der nächste Schritt in Form von der Entwicklung eines Testraums gegangen, um neben der Raumwirkung auch solche Elemente wie Präferenz, Natürlichkeit oder Harmonie besser bewerten zu können.

Schlagwörter: Farbwiedergabe, Farbqualität, Farbwahrnehmung

1 Einleitung

In Anlehnung an die weltweite Diskussion über eine Überarbeitung des aktuell gültigen CIE-Farbwiedergabeindex Ra [CIE 13.3, 1995] wurden in den letzten Jahren an der TU Ilmenau zahlreiche Untersuchungen von Farbqualitätsmerkmalen von Lichtquellen - mit dem Schwerpunkt der Farbwiedergabebewertung – durchgeführt {[JUNGNITSCH et al., 2005], [LIEDTKE et al., 2007] , [RING et al., 2007], [HOFMANN et al., 2010], [HUPE et al., 2013] und [SÖLLNER et al., 2009]}. Dabei war es das Ziel herauszufinden, in wie weit das objektive Farbqualitätsmerkmal der Farbwiedergabe den subjektiven Beobachtungen entspricht, und wo Diskrepanzen auftreten.

Da neben der Farbwiedergabe andere Farbqualitätsmerkmale wie Harmonie der beleuchteten Farben, Farbunterscheidbarkeit oder Präferenz zur Beurteilung einer Beleuchtungsquelle eine wichtige Rolle spielen, wurden diese Faktoren in die Untersuchung mit aufgenommen. Durch die Untersuchung mehrerer Qualitätsmerkmale sollten eventuell

vorhandene Zusammenhänge zwischen den einzelnen Merkmalen herausgearbeitet werden. Da nicht alle Qualitätsmerkmale in einem einzelnen Versuch mit der klassischen Methode der Farbprobenbewertung gleichermaßen gut eingeschätzt werden konnten, wurde eine zweite Versuchsreihe in einem Versuchsraum an realen Objekten konzipiert [KÄSTNER et al., 2013] und bereits teilweise durchgeführt (z.Zt. laufende Masterarbeit Hr. Fiebig).

2 Untersuchungen von Farbpatches im Lichtsimulator

2.1 Versuchsaufbau

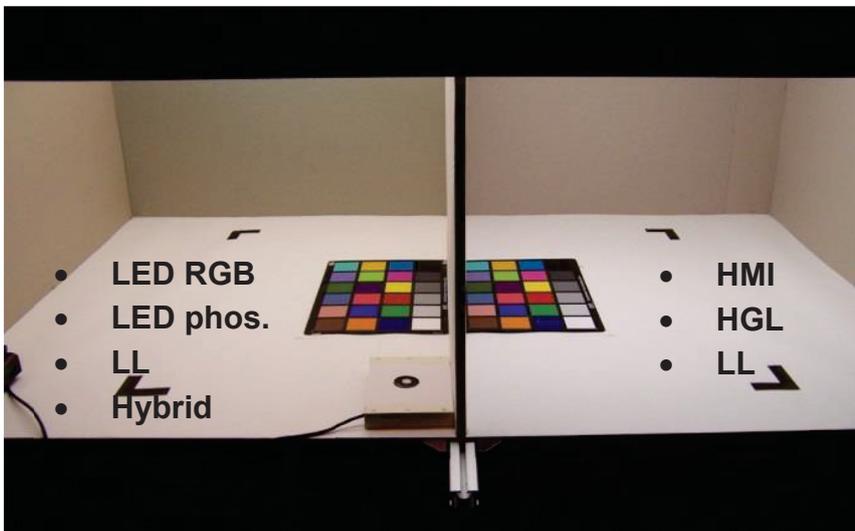


Abbildung 1: Lichtsimulator mit verwendeten Lichtquellen und mit MBCC (GretagMacBeth ColorChecker Chart)® in Bewertungsregionen

Da der Farbwiedergabeindex ein referenzbasierter Index ist, wurde der Versuchsaufbau ebenfalls als Vergleich einer Testlichtquelle mit einer Referenzlichtquelle konzipiert. Die Grundlage für den Aufbau bildeten die Richtlinien zum Testen von Farberscheinungsmodellen nach Fairchild ([FAIRCHILD, 2005]). Die zu vergleichenden Lichtquellen wurden in einem Lichtsimulator installiert, der aus zwei identischen Lichtkammern bestand (siehe Abbildung 1).

In der rechten Lichtkammer wurde die Referenzbeleuchtung gezeigt. Dies waren überwiegend Lichtquellen mit kontinuierlichem Spektrum (wie auch beim Farbwiedergabeindex). Die linke Lichtkammer wurde durch die Testlichtquellen beleuchtet. Hier wurden einerseits traditionelle Lichtquellen wie Leuchtstofflampen und andererseits neuere Lichtquellen wie LED bewertet. In Analogie zum Farbwiedergabeindex hatten die verglichenen Lichtquellen einen sehr geringen Farbabstand zueinander ($\Delta u'v' < 0,0054$).

Der Proband wurde so vor dem Lichtsimulator positioniert, dass ein Auge die Referenz- und ein Auge die Testkammer gesehen hat. So konnten die unterschiedlichen Beleuchtungssituationen haploskopisch im Simultanvergleich bewertet werden.

Die Versuche wurden für unterschiedliche Farbtemperaturbereiche durchgeführt. Einerseits wurden Lichtspektren mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von circa 3000K bewertet und mit einer Halogenleuchte verglichen. Diese hat, wie vom CIE-Farbwiedergabeindex für diese Farbtemperaturbereiche gefordert, annähernd die Eigenschaften eines Planckschen

Strahlers. Andererseits wurden Spektren mit einer ähnlichsten Farbtemperatur im Bereich zwischen 6000K und 6500K bewertet. Hierfür soll laut CIE-Farbwiedergabeindex ein tageslichtähnliches Spektrum mit der gleichen Farbtemperatur wie das Testspektrum als Referenz herangezogen werden. In den subjektiven Untersuchungen wurde dies zum einen mit einer HMI-Lampe und zum anderen mittels einer Halogenglühlampe mit Tageslichtfilter simuliert (siehe Abbildung 2). Auf der Bewertungsfläche wurde eine mittlere Beleuchtungsstärke von 500 lx realisiert, da dies laut DIN 5035 die vorgeschriebene Beleuchtungsstärke am Büroarbeitsplatz ist.

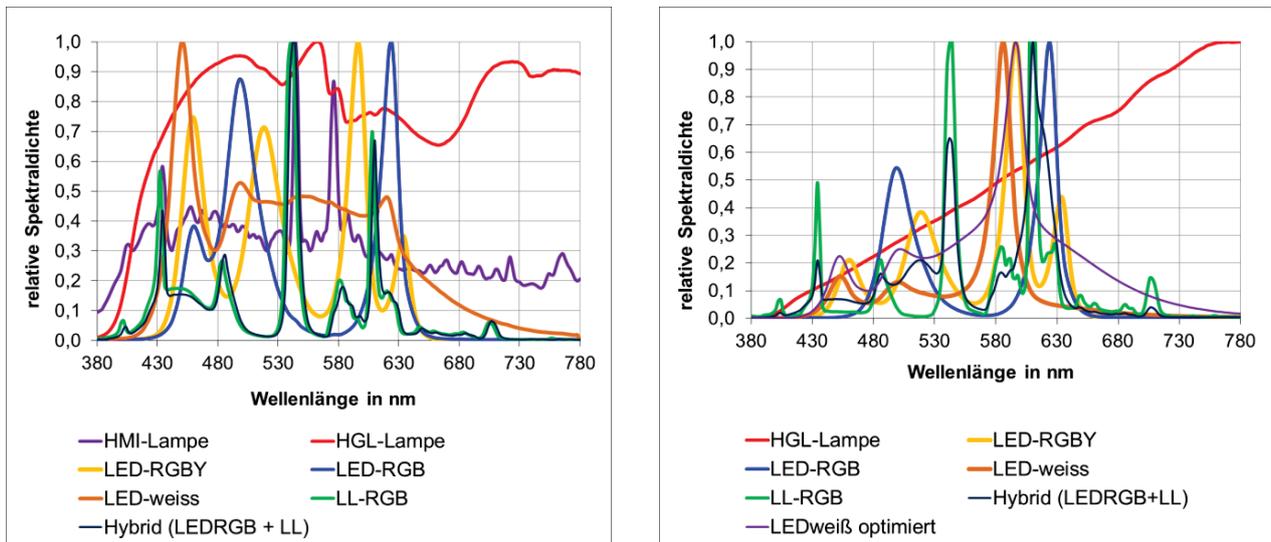


Abbildung 2: Untersuchte Spektren: Links: 6000 K / Rechts: 3000 K

2.2 Subjektive Bewertung – Testfarben und Fragenkatalog

Für die Bewertung wurden den Probanden 24 verschiedene Farbpatches in 4 verschiedene Farbgruppen (Rot, Gelb, Grün und Blau) gezeigt. In diesen Farbgruppen waren zum einen die CIE-Farben 1-8, 13 und 14 und zum anderen Farben des Gretag-MacBeth ColorCheckers® vertreten. Um kontextbezogene Bewertungen wie beispielsweise Natürlichkeit oder Präferenz vorzunehmen, wurden den Probanden zusätzlich 4 Farbfotografien gezeigt (siehe Abbildung 3). Diese Bewertungsobjekte wurden zeitgleich sowohl in der Referenz- als auch in der Testsituation gezeigt. Bewertet wurden dann von den Probanden lediglich die Unterschiede zwischen Test und Referenz und keine Absolutwerte.

Zur Bewertung der Farbwiedergabe und zur Bewertung der angesprochenen Farbqualitätsmerkmale wurden die Probanden für jede Testfarbe zu folgenden Parametern befragt:



- Größe des empfundenen Unterschieds
- Objekthelligkeit
- Leuchtkraft
- empfundene Temperatur (wärmer / kälter)
- Reinheit
- Kräftigkeit
- Bunttonverschiebung (Größe und Richtung)
- Präferenz und
- Natürlichkeit

Abbildung 3: Bewertete Farbfotografien

Allerdings ist bei den Befragungen häufig aufgefallen, dass, wie bereits vermutet, die Bewertung von Natürlichkeit und Präferenz anhand von Farbpatches vielen Probanden schwer fiel. Überraschender Weise änderte sich dieser Umstand auch bei der Bewertung der Farbfotografien nur in geringe Maß, so dass an dieser Stelle deutlich wurde, dass solche Faktoren in der 2-dimensionalen Ebene mit Farbpatches und Fotos schlecht zu bewerten sind.

In einer Faktorenanalyse konnten die Parameter "Leuchtkraft", "Reinheit" und "Kräftigkeit" zu einem neuen Faktor "Sättigung" zusammengefasst werden. Trotz der Bewertungsschwierigkeiten konnte auch zwischen den Parametern "Präferenz" und "Natürlichkeit" eine gute Korrelation ($r = 0,696$) nachgewiesen werden.

Diese Probandenbewertungen wurden in einem subjektiven Bewertungsindex SBI [JUNGNITSCH et al., 2008] für jede bewertete Lichtsituation zusammengefasst. Der Maximalwert, den der SBI annehmen kann, beträgt 100. Dieser Wert ist gleichbedeutend mit der Aussage, dass zwischen Test- und Referenzspektrum keine wahrnehmbaren Unterschiede bestehen. Je geringer der SBI-Wert wird, umso größer sind die wahrgenommenen Unterschiede.

2.3 Ergebnisse

Zur Auswertung wurde der SBI mit zahlreichen verschiedenen Indizes verglichen. In diesen Vergleich wurde unter anderem der CIE-Farbwiedergabeindex R_a , der Vorschlag $R_{CIECAM02-ucs}$ der in der CIE im TC1-91 als Verbesserung des aktuell gültigen CIE- R_a momentan diskutiert wird und der Präferenzindex CQS- Q_a nach Korrelationen mit den subjektiven Urteilen für jeden einzelnen Parameter, aber auch des Gesamteindrucks über den SBI überprüft.

Tabelle 1: Ergebnisse der Rangfolgenkorrelation zwischen unterschiedlichen Farbwiedergabeindizes und SBI (**höchst signifikantes Ergebnis)

FWG - Korrelation Spearman	SBI
CIE-CRI	0,772**
$CRI_{CAM02-UCS}$	0,715**
CQS- Q_a	0,849**

In Tabelle 1 wird deutlich, dass der SBI gut mit den allgemeinen Farbwiedergabeindizes (R_a und $R_{CIECAM02-ucs}$) und sogar noch etwas besser mit dem Präferenzindex Q_a korreliert. Im

Diagramm der Abbildung 4 wird der Zusammenhang zwischen der subjektiven Bewertung und den objektiven Größen gut veranschaulicht. Hier wird auch deutlich, dass diese gute Korrelation vor allem den Bewertungen von Lichtquellen mit einer Farbwiedergabe schlechter als 70 geschuldet ist.

Bei Farbwiedergabewerten größer 70 liegen die Probandenbewertungen für teilweise sehr unterschiedliche Farbwiedergabewerte sehr dicht zusammen.

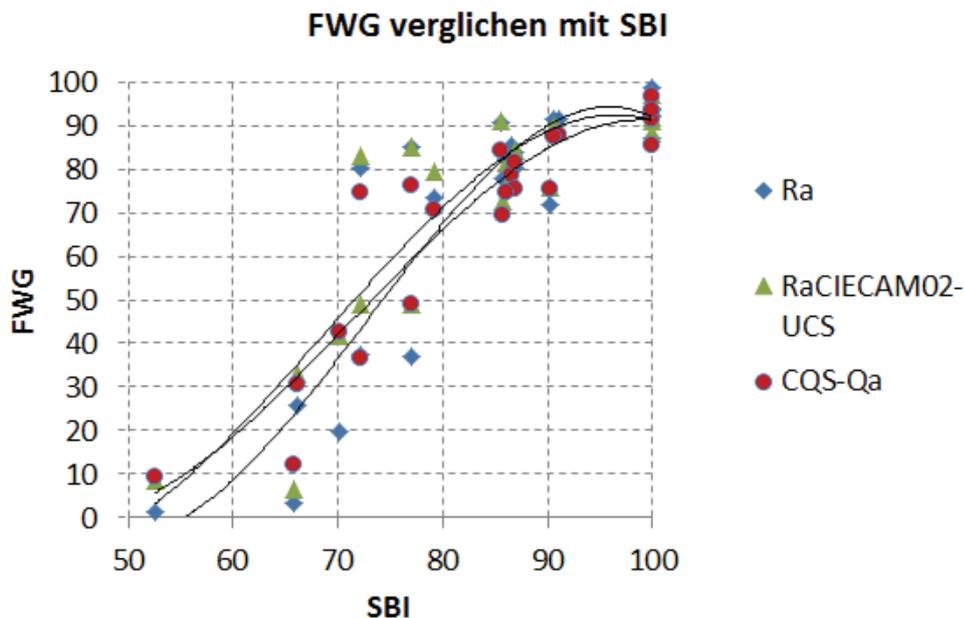


Abbildung 4: unterschiedliche Farbwiedergabeindizes in Abhängigkeit zum SBI

Dieser Effekt resultiert zum einen aus der Tatsache, dass bei Lichtquellen mit guter bis sehr guter Farbwiedergabe die bewertbaren Unterschiede für die Probanden sehr gering und kaum mehr wahrnehmbar werden. In empirischen Untersuchungen, bei welchen durch die Probanden nur sehr geringe Unterschiede zu bewerten sind, ist die Gefahr groß, dass eventuell vorhandene Effekte geringer sind, als die Antwortstreuung, und so diese Effekte bei der Mittelwertbildung nicht zum Tragen kommen, und dadurch auch keine Unterschiede nachweisbar sind.

Zum anderen erklärt sich dieses Ergebnis aus der Mittelwertbildung, die den objektiven Indizes zugrunde liegen. So kann es vorkommen, dass einzelne Farben mit sehr hohen speziellen Indizes bewertet werden, andere mit sehr viel geringeren – Einzeleffekte können sich herausmitteln. Ein gutes Beispiel ist in Abbildung 5 dargestellt, in welcher zwei Lichtquellen mit annähernd gleichem allgemeinen Farbwiedergabeindex aber mit sehr unterschiedlichen speziellen Indizes gezeigt sind. Dieses Wissen ist in der Lichtplanung von großer Bedeutung. Es ist für das Lichtkonzept wichtig, in wie weit alle Farben gut dargestellt werden sollen, oder ob es wie beispielsweise in der Medizin wichtig ist, einzelne Farben z. B. Rottöne gut wieder zu geben.

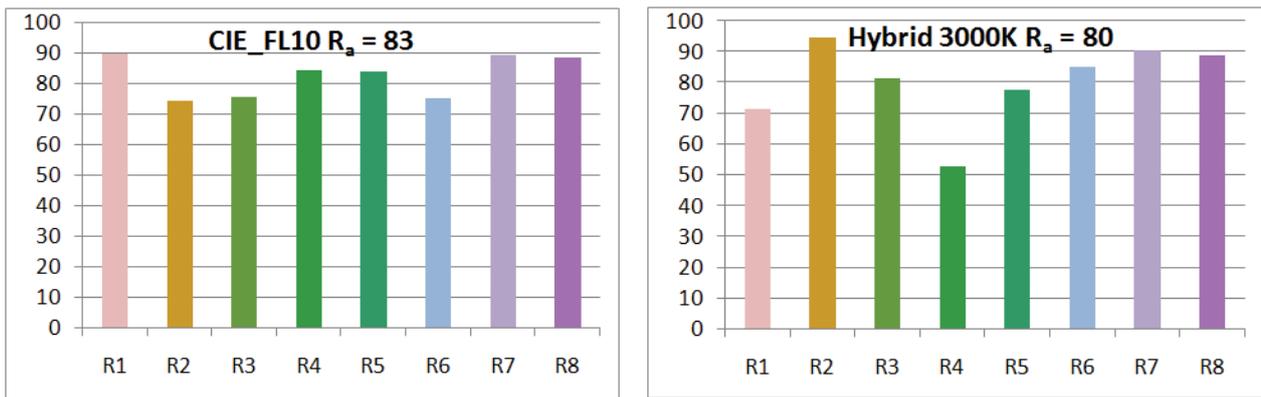


Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung der Bewertung untersuchter Lichtquellen mit ähnlichem CIE-R_a, aber deutlich unterschiedlichen R_i

Zwei Merkmale kristallisierten sich bei der Auswertung als besonders kritisch heraus: die Bewertungsparameter "Natürlichkeit" und "Präferenz" sind für die Probanden in dieser Versuchsanordnung und an dieser Art von Testobjekten nur sehr schwer zu bewerten. Aus diesem Grund wurde eine weitere Versuchsanordnung mit realen Testobjekten entworfen

3 Konzeption eines Testraums

3.1 Aufbau und Vermessung

In diesem Laborraum wurden drei Versuchsszenarien konzipiert, in denen die Farbwiedergabegüte und andere Farbqualitätsmerkmale der eingesetzten Lichtquellen 3-Banden-Leuchtstofflampen (LL) und Phosphor-LED (siehe Abbildung 7) verglichen werden sollten.

Neben dem Einfluss der Raumwirkung auf die subjektive Bewertung der Farbwiedergabe sollten in diesen Versuchen Farbqualitätsmerkmale wie Präferenz, Natürlichkeit und Harmonie an realen Objekten bewertet werden. Der Hauptunterschied zu anderen Tabletop-Untersuchungen bestand darin, dass der Proband selbst Teil der Szenerie wurde – ähnlich wie im Alltag auch – und nicht als bloßer Beobachter einer separierten Szene auftrat.

Eine besondere Herausforderung bei diesem Versuch war es, trotz eines komplexeren Umfeldes zwischen den Vergleichsszenen vergleichbare Bedingungen sicher zu stellen. Daher wurden alle Lichtquellen in mattweißen Plexiglasabdeckungen aufgehängt, so dass eine Unterscheidung durch den Probanden nicht möglich war. Außerdem wurde der Raum an den Wänden und an der Decke mit weißen Stoffbahnen verkleidet, um einen möglichst hohen diffusen Lichtanteil zu erhalten, und spektrale Änderungen einzelner Lichtquellen durch Einflüsse im Raum zu minimieren. Durch den Trennvorhang in der Mitte war es möglich, immer zwei Lichtquellen direkt miteinander zu vergleichen, ohne Lichtquellen an- oder ausschalten zu müssen. Damit konnten Nachteile wie Stabilitätsverlust durch Temperaturschwankungen oder Einbrennzeiten einzelner Lichtquellen entgegen gewirkt werden.

In umfangreichen Messungen [KÄSTNER et al., 2013] wurden so drei Lichtsituationen herausgearbeitet, in welchen die jeweiligen Vergleichsbeleuchtungen sowohl in der räumlichen Lichtverteilung sehr ähnlich zueinander sind, minimale Farbabstände untereinander realisiert wurden und maximal mögliche Farbwiedergabedifferenzen eingestellt wurden (siehe Tabelle 2). Des Weiteren konnte auf den Bewertungsflächen durch die oben angesprochenen Maßnahmen eine sehr homogene Ausleuchtung erzeugt werden ($\Delta L < 5\%$).

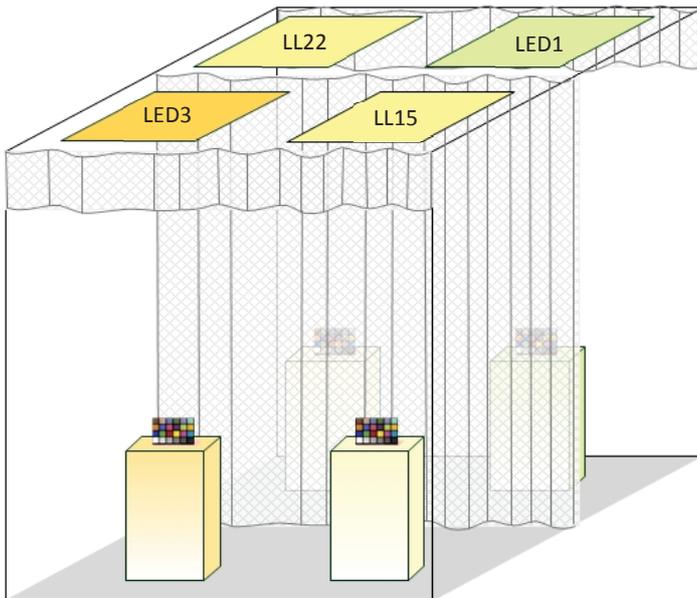


Abbildung 6: Prinzipskizze des Testraums mit GretagMacBeth ColorChecker®

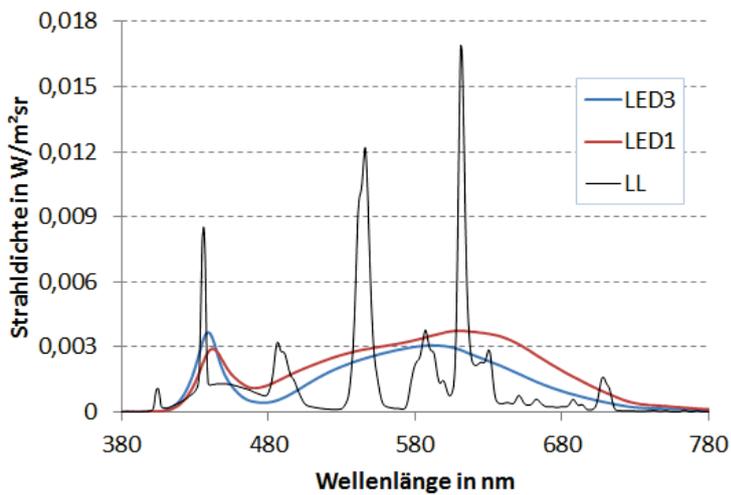


Abbildung 7: Im Testraum verwendete Spektren

Tabelle 1: Einstellwerte der untersuchten Lichtszenarien

	Szene 1		Szene 2		Szene 3	
	LED3	LL22	LED1	LL15	LED1	LED3
u'	0,2330	0,2341	0,2354	0,2363	0,2352	0,2364
v'	0,5017	0,5011	0,5073	0,5063	0,5085	0,5081
$\square u'v'$	0,0013		0,0013		0,0013	
L_v in cd/m^2	173,5	175,0	214,6	208,2	156,4	154,6
$\square L_v$	1,6		6,5		1,9	
CCT in K	3708	3677	3552	3536	3546	3514
R_a	76	85	92	85	94	83
ΔR_a	9		7		11	

3.2 Entwicklung eines Versuchskonzepts und Ausblick



Abbildung 8: Bewertetes Versuchsszenario

In einer laufenden Masterarbeit wurde zunächst aus einer Reihe unterschiedlicher möglicher Untersuchungsszenarien wie Büroumfeld, Lebensmittel- oder Textilgeschäft ein Aufbau aus dem Bereich der Lebensmittelpräsentation gewählt, da in diesem Bereich die Erwartungen und das Vorstellungsvermögen der Probanden, wie ein entsprechendes Objekt aussehen sollte, sehr ähnlich sind.

In Abbildung 8 sind die bewerteten Objekte dargestellt. Dieser Aufbau war in allen Beleuchtungsszenen identisch. In der Einzelbewertung wurden eine Coladose, Ketchup, ein Apfel, ein Pfirsich, eine Birne, eine Banane, ungekochte Nudeln, eine Gurke, Taschentücher und eine Salami beurteilt. Zusätzlich sollte jeder Proband die Farberscheinung seiner Hand unter der jeweiligen Beleuchtung bewerten. Um zu gewährleisten, dass von allen Probanden die zum Teil sehr inhomogenen Objekte an einer ähnlichen Stelle bewertet werden, wurden die Bewertungsbereiche durch den Testleiter markiert. Die Objekte sollten ähnlich wie in der vorangegangenen Untersuchung hinsichtlich Änderungen in der "Helligkeit", "Sättigung", "Bunton", "Natürlichkeit" und "Präferenz" bewertet werden. Um zu überprüfen inwieweit Änderungen der Harmonie zu einer anderen Bewertung der Farbwiedergabe beitragen, kam als neues Element die Bewertung der Farbharmonie verschiedener Objekte untereinander hinzu. Hierfür wurden die Wirkung der in Abbildung 8 sichtbaren Farbproben grün und blau, die Schokoladentafeln und die Kombination des Apfels mit der Birne bewertet.

Zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung waren die Probandenversuche weitestgehend abgeschlossen. Eine umfangreiche Auswertung der gewonnenen Daten und deren Interpretation stehen allerdings noch aus.

4 Literatur

- [CIE 13.3, 1995] CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) "Method of measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources", Vienna: CIE Central –Bureau, CIE Publ. 13.3, 1995
- [FAIRCHILD, 2005] M.D. Fairchild, "Color Appearance Models", 2. Aufl., Chichester, West Sussex, John Wiley & Sons Ltd, 2005
- [HOFMANN et al., 2010] F. Hofmann, K. Jungnitsch, K. Bieske, Ch. Schierz, "Untersuchungen zur Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von LED", Projektarbeit, TU Ilmenau, 2010
- [HUPE et al., 2013] Ch. Hupe, K. Jungnitsch, K. Bieske, Ch. Schierz, "Einfluss von Umgebungsbedingungen und Beobachtungsart auf die subjektive Bewertung von Farbwiedergabeeigenschaften", Studienarbeit, TU Ilmenau, 2013
- [JUNGNITSCH et al., 2005] K. Jungnitsch, C. Vandahl, D. Gall, H. Krömker, "Subjektive Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lampen mit unterschiedlichen Spektren", Diplomarbeit, TU Ilmenau, 2005
- [JUNGNITSCH et al., 2008] K. Jungnitsch, C. Vandahl, K. Bieske, "Subjektive Untersuchungen zur Farbwiedergabe in Abhängigkeit vom Lampenspektrum", LICHT 2008, Ilmenau, pp. 289-296, 2008
- [KÄSTNER et al., 2013] R. Kästner, A. Schelle, K. Jungnitsch, K. Bieske, Ch. Schierz, "Konzeption und Aufbau eines Versuchsraums zur subjektiven Untersuchung von Farbwiedergabeeigenschaften unterschiedlicher Lichtquellen", Projektarbeit, TU Ilmenau, 2013
- [LIEDTKE et al., 2007] C. Liedtke, M. Schuster, K. Bieske, C. Vandahl, "Untersuchungen zur Farbwiedergabe in Abhängigkeit vom Farbwiedergabeindex und dem Beleuchtungsniveau", Projektarbeit, TU Ilmenau, 2007
- [POLSTER et al., 2013] S. Polster, K. Bieske, "Neue spektrale Empfindlichkeitsfunktionen zur Erfassung visueller Farbgleichheit bei LED-Spektren", Lux junior 2013, Ilmenau, pp. 76-77, 2013
- [RING et al., 2007] S. Ring, C. Vandahl, D. Gall, "Subjektive Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lampen mit unterschiedlichen Spektren", Diplomarbeit, TU Ilmenau, 2007
- [SÖLLNER et al., 2009] St. Söllner, K. Jungnitsch, K. Bieske, Ch. Schierz, H. Krömker, "Untersuchungen zur spektralen Strahlungsverteilung für die Erzielung einer hohen Farbwiedergabegüte mit LEDs", Diplomarbeit, TU Ilmenau, 2009

Das Prinzip der Halbkugelprojektion als neuartiger Ansatz in der Lichtforschung?

Felix Börner

Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

Tagung Lux junior Dörfeld 2013

1 Einleitung

Im Laufe der vergangenen Jahrzehnte wurden viele Versuche unternommen, um die Technik vieler Lampen und Leuchtentypen den aktuellen Wünschen und Bedürfnissen der Gesellschaft entsprechend anzupassen. Zeitgleich zum ständig verbesserten Verhältnis von elektrischer Leistung zum resultierenden Lichtstrom wie sie derzeit z. B. bei der LED zu beobachten ist, wurde auch die Frage nach aktuellen Güte Merkmalen immer wieder gestellt.

Die Wirkung immer höherer Leuchtdichten, kleinerer Raumwinkel, unterschiedlicher Farbtemperaturen uvm. auf den Menschen wurde und wird auch aktuell immer wieder unter neuen Gesichtspunkten untersucht. Ziel ist es die Wirkungsweise des gesamten visuellen Apparates im Zusammenhang zu sich ständig ändernden Lichtverteilungen, Situationen und Lampentypen möglichst genau beschreiben zu können.

Ein immer wiederkehrendes Problem ist die Beschreibung der Adaptationsleuchtdichte in inhomogenen Situationen. Die Adaptationsleuchtdichte ist die Leuchtdichte, auf die sich das Auge einstellt, um optimal zu arbeiten. Unter Laborbedingungen ist es relativ einfach, diese Größe zu ermitteln, da die meisten Experimente vor einem homogen ausgeleuchteten Hintergrund durchgeführt werden.

In der Realität existieren solche Bedingungen leider nicht. In einer Alltagssituation ist das normale Sichtfeld aus einer Unzahl von verschiedenen Leuchtdichten zusammengesetzt, was dazu führt, dass es noch kein allgemein gültiges Verfahren zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte gibt.

Obwohl viele Studien über Helligkeitswahrnehmung potentiell mit dem Thema Adaptationsniveau in Beziehung stehen, konnte keine Fachliteratur gefunden werden, die diese Sache explizit behandelt. Alles was jetzt getan werden kann, ist Wissenschaftler zu ermutigen, die Forschung über das Adaptationsniveau nicht nur unter Experimentierbedingungen sondern auch in natürlicher und komplexer Umgebung durchzuführen [1].

Zieht man einen historischen Vergleich über die Grundlagenforschung zur Bestimmung visueller Güte Merkmale verschiedener Epochen, so wird man unweigerlich auf ähnliche Versuchsaufbauten stoßen. Doch welche sind das und wie könnte man diese mit den heute vorhandenen technischen Neuerungen verbessern?

Die Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte bei inhomogenen Umfeldern über die Schwarzschwelle ist eines der Themen, mit denen sich das Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität in Ilmenau in diesem Zusammenhang beschäftigt.

2 Historische Aufbauten

Viele Forscher haben für ihre Untersuchungen ähnliche Versuchsbedingungen benötigt.

Lowry, Haubner oder auch Rehder, um nur einige von ihnen zu nennen, benötigten ein homogenes Umfeld für ihre Untersuchungen auf das sie einen Probanden vollständig adaptiert wussten. Erreicht haben sie diese Bedingung, indem sie eine Halbkugel über einen Glühlampenkranz an den Kugelrändern beleuchteten (Abbildung 1). Somit wurden zum Teil Umfeldleuchtdichten von bis zu 1000cd/m^2 erzielt.[2][3][4]

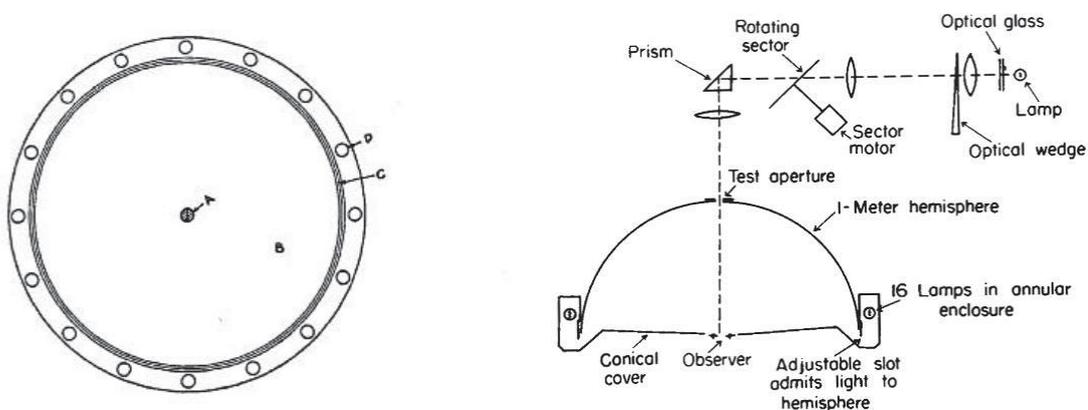


Abbildung 1: Messaufbau Lowry

Im Zentrum der Halbkugel wurde eine Lichtquelle ($0,5^\circ$ Sehwinkel) präsentiert, deren Helligkeit über diverse Blenden variiert werden konnte. Für gegebene Umfeldern wurde die Blendenstellung notiert, an der eine Versuchsperson die Lichtquelle gerade nicht mehr erkennen konnte.

Thiele und Gall verwendeten einen anderen Ansatz indem einer Versuchsperson nach erfolgter Adaptation an ein relativ hohes Leuchtdichteniveau ein niedrigeres Leuchtdichteniveau dargeboten wird und die Zeit (t_E) misst, die zur Lösung einer gestellten Sehaufgabe vergeht. [5] Im Punkt 0 wurde über einen Testfeldprojektor ein Sehzeichen (Landoltring) projiziert und die Zeit gemessen, die ein Proband benötigte dieses, nach abschalten des Szenenprojektors, zu erkennen (Abbildung 2: Messaufbau Thiele, Gall).

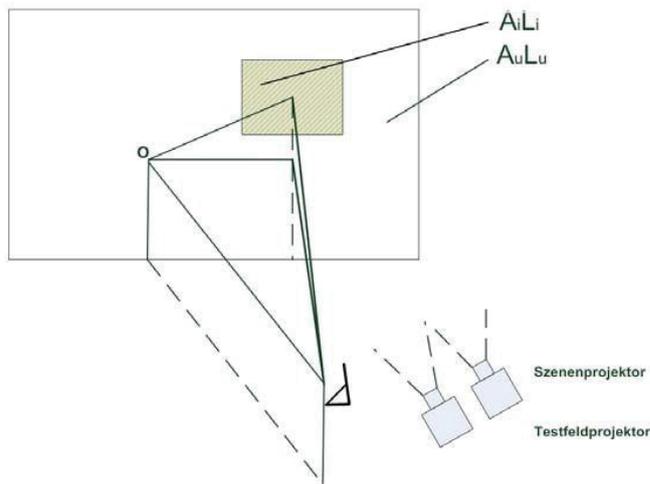


Abbildung 2: Messaufbau Thiele, Gall

Sie kommen zu dem Schluss, dass für die Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte bei Lokaladaptation der Adaptationszustand in der Fovea centralis sowohl von der Infeldleuchtdichte als auch von der Größe der dargebotenen Fläche, sowie den Umfeldleuchtdichten maßgeblich beeinflusst wird.

Man muss nun aus all diesen Ergebnissen schlussfolgern, dass eine allgemeine Aussage über den Adaptationszustand bei Lokaladaptation, wie etwa bei Bildfeldern, die uns täglich umgeben, wegen der komplizierten Verflechtung aller Parameter kaum möglich ist [5].

Die Grenzen dieser Versuchsaufbauten zeigen sich allerdings auf, wenn z.B. die Wirkung beliebig strukturierter Szenen auf den Adaptationszustand einer Versuchsperson sowohl im Labor als auch im Feld untersucht werden soll.

An diesem Punkt wird derzeit versucht in Ilmenau anzusetzen. Ziel ist es zum einen, einen Laboraufbau zu entwickeln der sowohl die Messungen von Lowry und Haubner als auch die von Thiele und Gall aufgreifen kann. Darüber hinaus werden definierte beliebige Strukturen und deren Wirkung auf die Adaptationsleuchtdichte als Weiterführung benötigt.

Als letzte Stufe dieser „Annäherung an reale Szenen“ bzw. Leuchtdichteverteilungen soll die Bestimmung der tatsächlichen Adaptationsleuchtdichte einer gegebenen Szene stehen.

3 Ansatz

Ein bereits aus der Spieleindustrie oder auch bei Flugsimulatoren bekanntes Prinzip kann diese Lücke schließen. Die Rede ist von der, durch den Australier Paul Bourke maßgeblich vorangetriebenen, „spherical mirror projection“ der Halbkugelprojektion [6]. Grundidee hierbei ist es einen Aufbau zu realisieren, welcher es ermöglicht mit geringem finanziellen Aufwand den Eindruck einer immersiven, virtuellen Umgebung zu schaffen. Die Umsetzung (siehe Abbildung 3) erfolgt über vier Komponenten, die sich aus einer Halbkugel, einem sphärischen Spiegel (Viertelkugelspiegel), einem Digital-Projektor und einer entsprechenden Entzerrungssoftware zusammensetzen.



Abbildung 3: Halbkugelprojektion nach P. Bourke

Bourke entwickelte ein eigenes Entzerrungstool und gestaltete seine virtuelle Umgebung mit Blender, einer 3D Open Source Software. Hauptaugenmerk seines Bestrebens war es nicht seine Halbkugel mit einem Durchmesser von $d = 2\text{m}$ möglichst homogen auszu-
leuchten bei maximal erreichbarer Leuchtdichte, ihm ging es vielmehr darum dem Problem der projektiven Entzerrung in der Halbkugel Herr zu werden.

3.1 Umsetzung in Ilmenau

An diesem Punkt setzt der Versuchsaufbau des Fachgebietes Lichttechnik der TU Ilmenau an. Ziel ist es an die Vorversuchsaufbauten aus dem Bereich Lichttechnik anzuknüpfen und diese durch die Halbkugelprojektion zu erweitern.

Damit in der Halbkugel eine möglichst hohe Leuchtdichte erzielt werden kann, musste ein entsprechender Kompromiss aus Kugelradius und Projektorlichtstrom gefunden werden. Umgesetzt wurde der Ilmenauer Versuchsaufbau (siehe Abbildung 4) mit einer Halbkugel (Durchmesser $d=1,5\text{m}$), einem Kugelspiegel und einem DLP Projektor von Panasonic.

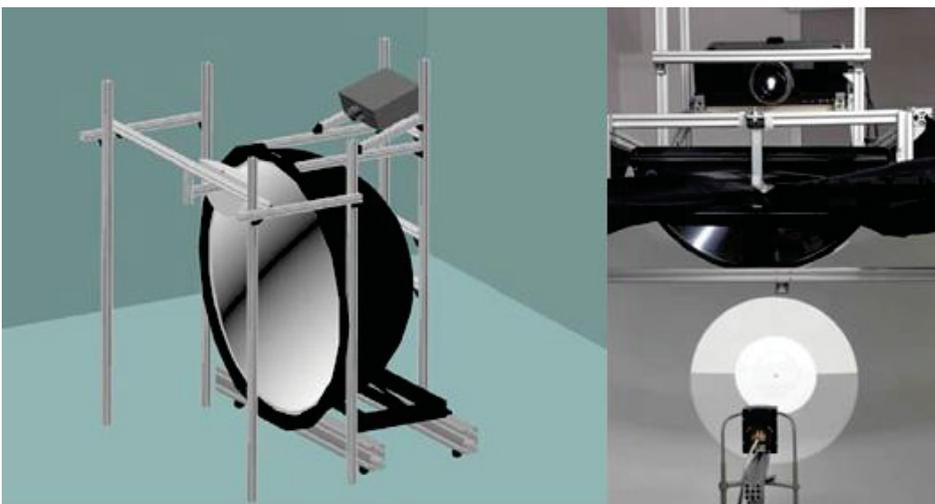


Abbildung 4: Umsetzung Halbkugelprojektion Ilmenau

Derzeit sind, je nach Projektoreinstellung, Leuchtdichten bis 300cd/m^2 (unkorrigiert) bei einer Farbtemperatur von 6500K möglich. Da bei voller Leistung des Projektors

(6000 Lumen) die erwähnte maximale Leuchtdichte in der Kugel zu großen Inhomogenitäten führte, musste eine Anpassung der projizierten Grafik vorgenommen werden. Nach pixelgenauer Bildkorrektur ist eine Leuchtdichteabweichung von Minimum zu Maximum von 5% noch vorhanden, Messfehler durch Leuchtdichteaufnahmen inbegriffen.

Im Zentrum der Kugel wurde eine Aufnahme eingefügt mit der es möglich ist verschiedene kreisförmige Adapterplatten mit zentralen Öffnungswinkeln von $0,5^\circ$ bis 10° Sehfeldgröße anzubringen. Die Anbindung an Folgeuntersuchungen im Bereich der Farbwahrnehmung oder Blendung ist so ohne weiteres gegeben.

Die zur geometrisch korrekten Darstellung, von Szenen und Objekten in der Kugel, notwendige Vorverzerrung wird über eine entsprechende Software rechnerseitig realisiert. Bild und Szenenwechsel dauern nur Sekunden und halten die Dauer eines Testdurchlaufes gering und infolgedessen auch die Belastung der Versuchsperson. Des Weiteren können einfache Blendquellen, minimal invasiv, in der Kugel befestigt werden um Blendungsuntersuchungen durchführen zu können.

3.2 Aktueller Forschungsstand in Ilmenau

Unter diesem Gesichtspunkt ist es somit möglich die Wirkung beliebiger homogener und inhomogener Szenen auf den Adaptationszustand eines Probanden zu untersuchen. Einfache und auch komplexe Strukturen, sowie auch vollständige Aufnahmen diverser Büro- oder Außenszenen können einer Versuchsperson dargeboten werden. Der zeitliche Aufwand von Umbaumaßnahmen, wie sie bei Rehder nötig waren, reduziert sich erheblich.

- Offene Fragen aus der Wahrnehmungsforschung und auch der Lichtmesstechnik können mit dem beschriebenen Versuchsaufbau gelöst werden. Dies sind unter anderem:
- Wodurch wird die Adaptationsleuchtdichte bestimmt wenn L_u , die Umfeldleuchtdichte, inhomogen ist?
- Entspricht die mittlere Leuchtdichte eines 40° Sehfeldbereiches tatsächlich der aktuellen Adaptationsleuchtdichte oder liegt der reale Wert ggf. höher als bisher angenommen?
- Ist eine winkelabhängige Gewichtung sämtlicher im Gesichtsfeld vorherrschenden Leuchtdichten zur Berechnung der Adaptationsleuchtdichte möglich?

Nach Baer kann ein Sehfeldbereich von $\pm 20^\circ$ als adaptationsbestimmendes Feld angegeben werden. [7]

Adrian unternahm ein Experiment in dem er zwei Kreisfelder gleicher Größe, gleicher mittlerer Leuchtdichte aber unterschiedlicher Verteilung in einem 20° Sehfeld (L_{20}) verglich. Er kommt zu dem Schluss, dass ein Feld gleicher mittlerer Leuchtdichte unterschiedliche Adaptationsstadien hervorrufen kann. Ferner postuliert er, dass es keine einfache Relation zwischen L_{20} und L_A gibt.[8]

Die Änderung des Adaptationszustandes einer Person lässt sich über die Bestimmung der Schwarzschwelle beobachten. Diese beschreibt den Punkt, an dem eine Lichtquelle oder ein Objekt vom Probanden „gerade nicht mehr“ bzw. als schwarz erkannt wird und variiert mit der Änderung des Adaptationsniveaus.

Eine Idee ist es, die Schwarzschwelle für verschiedene homogene Umfeldern unterschiedlicher Leuchtdichten zu bestimmen. Anschließend denselben Versuch bei inhomogenen Umfeldern zu wiederholen, auch hier die Schwarzschwelle zu bestimmen, um somit im Anschluss auf die Wirkung eines äquivalenten homogenen Umfeldes zu schließen.

4 Erste Ergebnisse

4.1 Homogene Umfelder

Bezogen auf Forschungsfrage 2 wird die Leuchtdichte der Schwarzschwelle bei homogenen Umfeldern von 3 cd/m^3 bis 230 cd/m^2 bestimmt und deren Verlauf festgehalten. Hierzu wird im Kugelzentrum (ähnlich wie bei Lowry) eine periodisch (jede Sekunde) für die Dauer von 0,2 Sekunden dargebotene Lichtquelle (Öffnungswinkel $0,5^\circ$) soweit gedimmt bis diese gerade nicht mehr zu erkennen ist. Der hierzu entsprechende Leuchtdichtewert der Lichtquelle ist durch Voruntersuchungen bekannt und ermöglicht dementsprechend die Bestimmung der Schwarzschwelleleuchtdichte bei gegebenem Umfeld. In diesem Fall kann $L_u = L_{Ad}$ gesetzt werden.

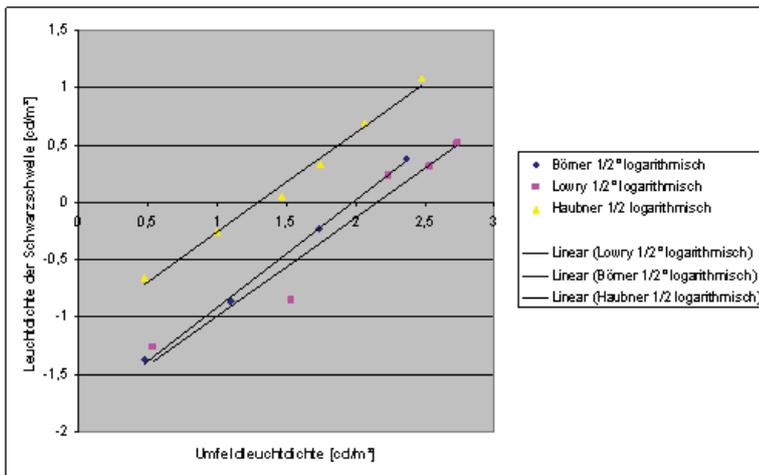


Abbildung 5: Verlauf der Schwarzschwelle Börner, Lowry, Haubner

Die Ergebnisse der ersten Messreihen wurden zu denen von Lowry und Haubner in Beziehung gesetzt (Abbildung 5) und liefern ähnliche Verläufe. Haubners Werte liegen im Durchschnitt höher als die von Börner und Lowry. Eine Ursache hierfür ist u. a. dass er keine blinkende Lichtquelle verwendete, sondern eine permanent Leuchtende. Lowry hingegen führte seine Untersuchungen mit nur zwei Probanden durch.

4.2 Inhomogene Umfelder

Ob die Mittelwertbildung sämtlicher Leuchtdichten im 40° Sehfeldbereich auch der tatsächlichen Adaptationsleuchtdichte entspricht, soll im Folgenden ähnlich wie bei Adrian untersucht werden. Hierzu wird die Schwarzschwelleleuchtdichte eines im Kugelzentrum projizierten 40° Vollkreises von $L_{40^\circ \text{VK}} = 80 \text{ cd/m}^2$ Positivkontrast bestimmt. Im Anschluss wird das zuvor präsentierte Sehfeld in verschiedene einfache Strukturen unterteilt, während aber der Mittelwert der Leuchtdichte auf das gesamte 40° Vollkreis Sehfeld bezogen ebenfalls 80 cd/m^2 ergibt.

Die in Abbildung 6 dargestellten Strukturen unterteilen sich in Vollkreise (VK) von 10° bis 40° Sehfeldgröße, Halbkreise (HK) innerhalb des 40° Sehfeldbereiches an unterschiedlichen Positionen, in Kreisringe (KR) deren innere und äußere Radien in Abhängigkeit ihrer Winkellage im Gesichtsfeld angegeben werden und in einfacher Abstrakte Büroszenen.

Einzelne Strukturen können, separat betrachtet, höhere Leuchtdichten als die angegebenen 80 cd/m^2 erreichen. So lässt sich z.B. die Leuchtdichte des 20° VK ohne weiteres auf

Werte $> 100 \text{ cd/m}^2$ einstellen. Diese Option lässt Untersuchungen zur Richtungsabhängigkeit einzelner Sehfeldbereiche offen. Indem z. B. die Struktur KR (Kreisring) je auf denselben Leuchtdichtewert eingestellt wird und die Auswirkung unterschiedlicher Winkelbereiche untersucht wird.

Eine weitere Herangehensweise zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte inhomogener Szene ist es, die äquivalente Schleierleuchtdichte am Beobachteraue konstant zu halten und die Größe der Kreisflächen beispielsweise zu variieren. Vermutlich wird sich die Leuchtdichte der Schwarzschwelle mit steigender Sehfeldgröße zu höheren Werten hin ändern.

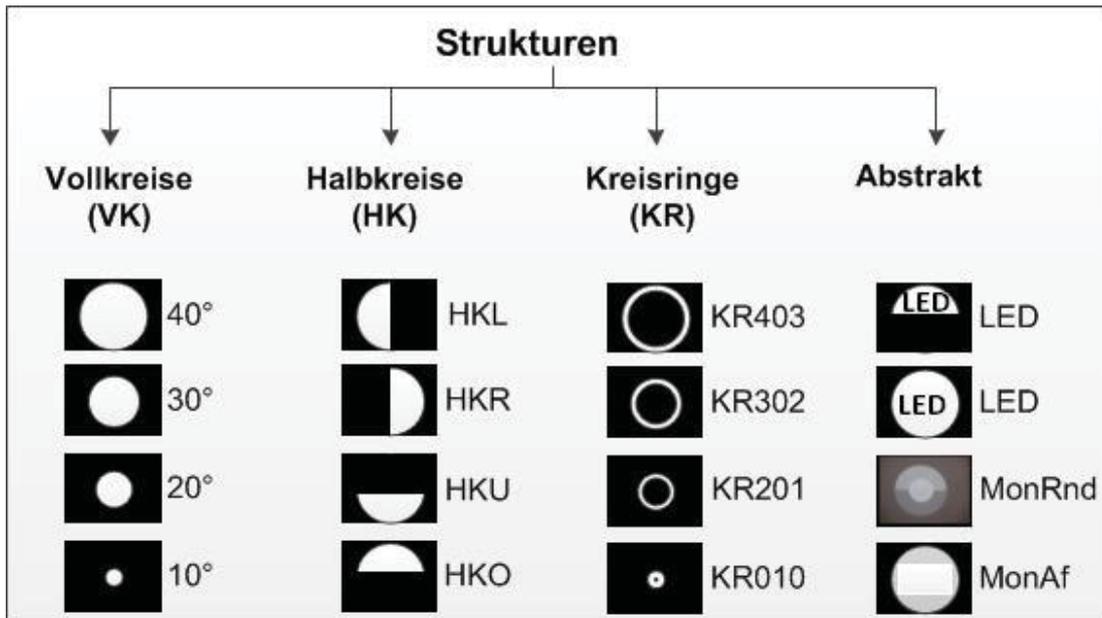


Abbildung 6: Übersicht inhomogene Umfeldler/Strukturen

5 Ausblick

Erste Vorversuche bei homogenen Umfeldern zeigen, dass mit dem beschriebenen Versuchsaufbau, vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können wie bei Lowry und Haubner. Auch wenn beide Forscher weitaus höhere Leuchtdichten in ihren Aufbauten erzielten, so ist der Verlauf der in Ilmenau ermittelten Funktion, bezogen auf den Leuchtdichtebereich von 3 cd/m^2 bis 230 cd/m^2 , ähnlich. Unterschiede sind in der Anzahl der Probanden sowie in der Darbietungsdauer der Lichtquelle zu begründen.

Derzeit laufen die Untersuchungen mit strukturierten Umfeldern. Erste Ergebnisse werden zur LUX junior 2013 erwartet. Ferner sind erste Folgeuntersuchungen mit abstrahierten Szenen in der Halbkugel vorgesehen, sowie Blendungsuntersuchungen mit einfachen Strukturen.

6 Literatur

- [1] Visual Adaptation to Complex Luminance Distribution / Commission Internationale de l'Eclairage. Wien, 1999 (135/5). – Forschungsbericht
- [2] Lowry E.M., Jarvis J.G.: The Luminance of Subjective Black In: Journal of SMPTE Vol.65 (1956) S.411-414
- [3] Haubner P. : Zur Relation zwischen Schwarzschwelle Umfeldleuchtdichte und Detailgröße In: „LichtForschung: Entwicklung, Technologie“. (1979) Band 1, S. 51
- [4] Rehder, W. M.: Der Adaptationszustand des menschlichen Auges in Abhängigkeit von der Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld. Dissertation, Math.-nat. Fakultät der Universität Hamburg 1965
- [5] Thiele E. ;Gall D.; Adaptationsleuchtdichte und mittlere Leuchtdichte bei direktem und indirektem Sehen In: Wiss.Z.TH Ilmenau 14; 1968
- [6] <http://paulbourke.net/dome/iDome/> Stand: 18.04.2013
- [7] Baer, R.: Grundlagen Beleuchtungstechnik In: Huss-Medien GmbH, 2006
- [8] Adrian, W.K.; Adaptation luminance when approaching a tunnel in daytime In: Lighting Res. Technol. 19; S.73-79; 1987

Describing the Luminance Adaptation of the Human Eye for Inhomogeneous Scenes via Spherical Mirror Projection and the Luminance of Subjective Black

Felix Börner, Christoph Schierz
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

Tagung BullLight Sosopol 2014, Bulgarian National Committee on Illumination, S. 13-16

Abstract

Baseline investigations describing luminance adaptation, color perception or glare rating were made a lot.

Many attempts have been made to describe and calculate luminance adaptation of the human eye. Nevertheless until now there is no exact and common model to calculate e.g. luminance adaptation for a given scene.

Lowry, Haubner or Rehder made the first steps in homogeneous surroundings with measuring the luminance of subjective black for a given luminance.

To know a person totally adapted to a surrounding they illuminated a hemisphere with a filament lamp rim. In the center of this hemisphere there was a circular dimmable light source with which the luminance of subjective black could be measured. Their experimental setup had some limitations in describing luminance of subjective black in inhomogeneous surroundings. To fill this gap spherical mirror projection might be useful.

Using a digital projector and a spherical mirror, it is possible to generate homogenous as well as inhomogeneous scenes within a hemisphere. Furthermore, the impact of structured scenes of the luminance of subjective black can be observed.

Keywords: luminance adaptation, spherical mirror projection, equivalent veiling luminance, luminance of subjective black

1 Introduction

During the last decades there have been many attempts to improve the technology of light distribution according to human requirements. New light sources e.g. LED or OLED's are nowadays on the rise for Indoor as well as Outdoor lighting.

Simultaneously to this development, former quality criteria e.g. for human vision, which were based on filament or fluorescent lamps, have to be renewed. Describing all functions of

human visual apparatus in context to several given situations and luminance distributions is a goal of researches around the world. An old one but still not totally solved problem is describing and calculating the luminance adaptation of the human eye for inhomogeneous surroundings. [1]

Lots of Model's were made for mesopic and photopic vision using similar methods and experimental conditions. Summing up several approaches and combining them with new technical methods the following paper will show an approach for describing the luminance adaptation of the human eye by measuring the luminance of subjective black for inhomogeneous luminance distributions.

2 History

Scientists studying the luminance adaptation of the human eye needed similar conditions for their experimental setups.

Lowry, Haubner as well as Rehder just to mention a few, needed a homogeneous surrounding for their studies. To realize this requirement they used a Dome and an annulus of filament lamps at the rim of this Dome (see. Figure 1 below). In this way homogeneous background luminances up to 1000cd/m^2 were easily possible. [2][3][4]

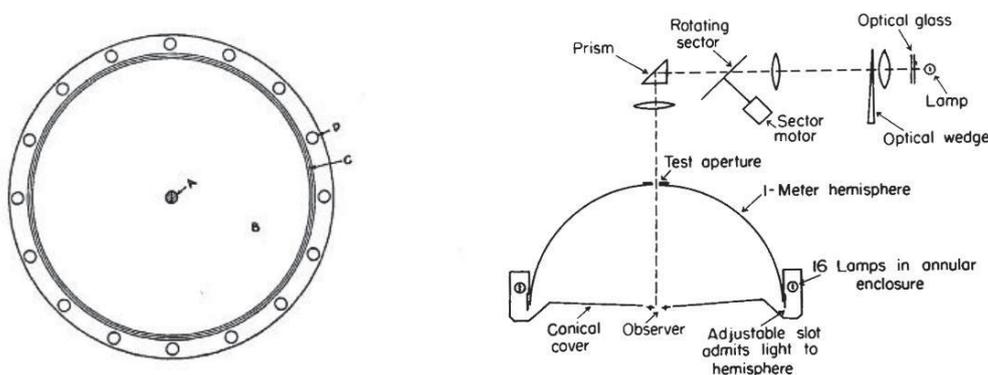


Figure 1: Experimental setup Lowry

As one can see, in the center of this dome was the Test field which subtended an angle of $22'$ at the eye of the observer.[2] The luminance of this field could be reduced by the observer until it just disappears for a given surrounding (luminance of subjective black). Lowry did his research within homogeneous surrounds and found a way to forecast adaptation luminance by knowing the luminance of subjective black. For inhomogeneous surroundings he tried to find an approach to combine data measured within both kinds of situations.

Thiele and Gall went another way without a dome (see Figure 2). Observers in their setup had to adapt to a relatively high luminance distribution. After doing this they switched this luminance with a lower luminance distribution and measured the time (t_E) to solve a given visual task. [5]

Furthermore they tried to find out whether there is an influence of visual adaptation within different positions in the visual field or not.

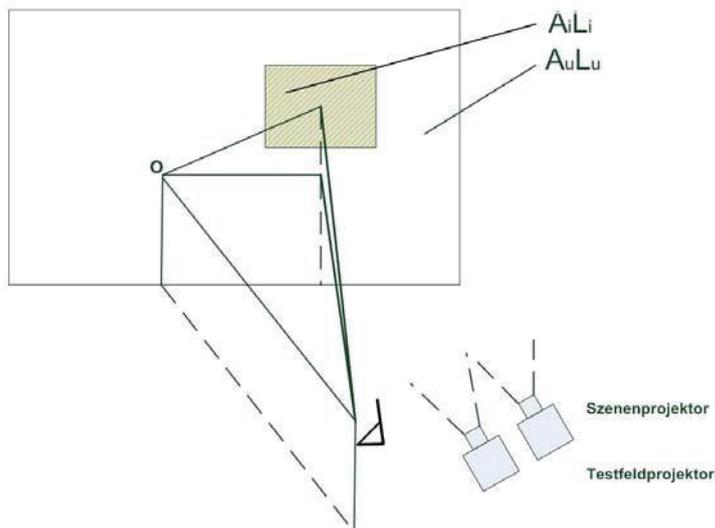


Figure 2: Experimental setup Thiele, Gall

After their research they came to the conclusion that a general statement of the state of adaptation for foveal adaptation is hardly possible.

In 1987 Adrian used a dome as an adapting field similar to Lowry. In contrast he was able to change the size and luminance of an inner visual field between the test spot and its surrounding. It was possible to remove a center part of the dome and replace it with translucent circular part of the dome which was illuminated from the back. In summary he postulated, a visual field of the same average luminance can produce different Adaptation levels and that there is no simple relation between the luminance of a field size of 20 degrees and adaptation luminance. [8]

3 Approach and procedure

Although the described experimental setups had their benefits, they all are limited in one case. It is not possible to do research in a homogeneous and an inhomogeneous surround without going to considerable length in time in mechanical alterations. On this level, research in Ilmenau begins. The idea was to combine psychophysical methods as well as former experimental setups and to improve everything by using a technique called "spherical mirror projection". This principle was mainly impelled by Paul Bourke [8] and is well known in the gaming industry.

The experimental setup shown in Figure 3 consists of a full dome (150cm in diameter) a spherical mirror a digital projector (6000lumens) and a special software (for the warping algorithm) driven by a normal PC.

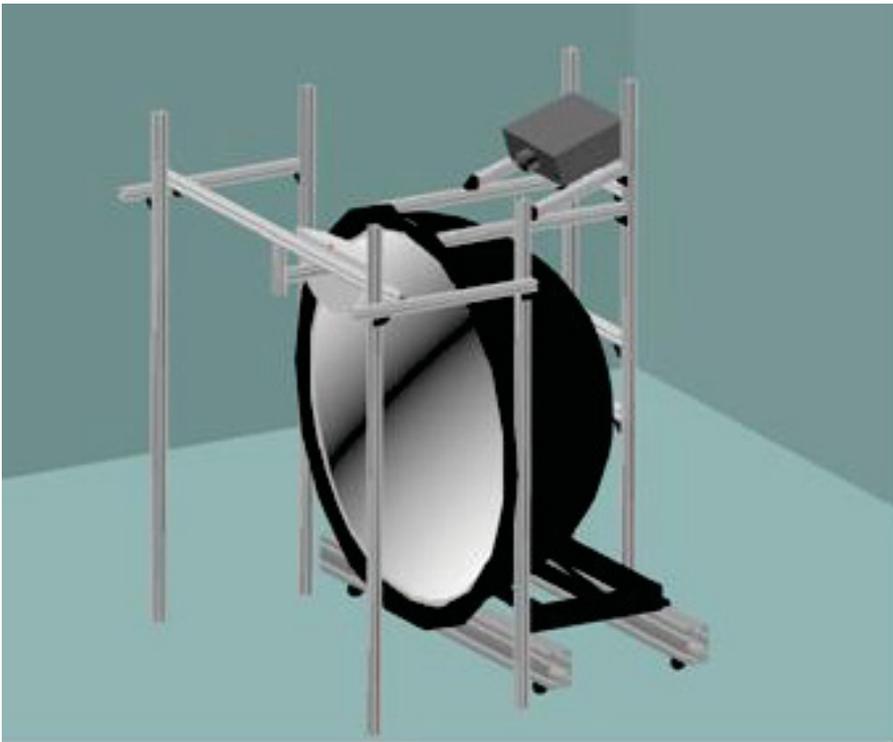


Figure 3: Experimental setup Ilmenau

It is now possible to investigate the effect of homogeneous and accurately defined, time stabilized inhomogeneous surroundings, on the observer. Time needed to switch between several luminance distributions is minimized and just a simple mouse-click away.

Furthermore there are luminances up to 300cd/m^2 possible on the inside of the dome.

As mentioned in the introduction there are still some research questions unacknowledged.

- How can luminance adaptation be determined if the visual field is inhomogeneous?
- Is the average luminance calculated over a field of view of 40 degrees precise enough to give a statement about the state of adaptation??

To investigate the effect of different surroundings on the human luminance adaptation the approach of Lowry's studies was used. Measuring the luminance of subjective black is one way to get information whether the adaptation level of a person has changed or not. The luminance of subjective black is the point where a luminance e.g. of a test spot appears black within a given surround. First of all an observer is placed in front of the dome and sees only homogeneous surrounds.

For these surrounds he or she has to reduce the luminance of a test field in the center of the dome which subtends an angle of $30'$ (at the observer's eye) until it just disappears flashing. Afterwards this test is being repeated but the surrounds will be inhomogeneous.

Aim of this method is to find that equivalent adaptation luminance which produces the same subjective black in a homogeneous surround.

3.1 Homogeneous surrounds

Starting with homogeneous surrounds an observer took place in front of the dome. The head's position was fixed with a chin rest and the test spot luminance could be adjusted by a remote control. For each of four surrounds, 3cd/m^2 up to 230cd/m^2 , all test persons had to adjust the luminance of subjective black ten times.

Results compared to Lowry and Haubner showed similar effects and run of the curves. Differences are explained in [10].

With knowledge of the run of the curve it is now possible to calculate what luminance of subjective black equals the luminance of a homogeneous surround. This is necessary for tests in inhomogeneous surrounds as described before.

3.2 Inhomogeneous surrounds

In everyday life the luminance distributions in the human field of view change permanently. Until now there is no scientific approved model to forecast or calculate the adaptation luminance for inhomogeneous scenes. Starting with simple structures e.g. circles, rectangles or annuluses' [see.10 P.8f] is the first step to handle the problem of various surroundings and their effect to the human visual apparatus. The following steps will consist of more detailed structures up to abstracted bureau scenes in grayscales.

To prove if the average luminance of a half space in front of an observer (see [9]) is exact enough for describing the adaptation level, simple circular structures were used. Referring to Baer a field of view of about $\pm 20^\circ$ can be seen as adaptation dominating. [7]

The second step is based on Adrian. [11] This time the field luminance is kept constant but the field's size changes step by step. As shown in Figure 4 the field luminance is kept at 120cd/m^2 .

The field of view is varied from $2,5^\circ$ up to 180° .

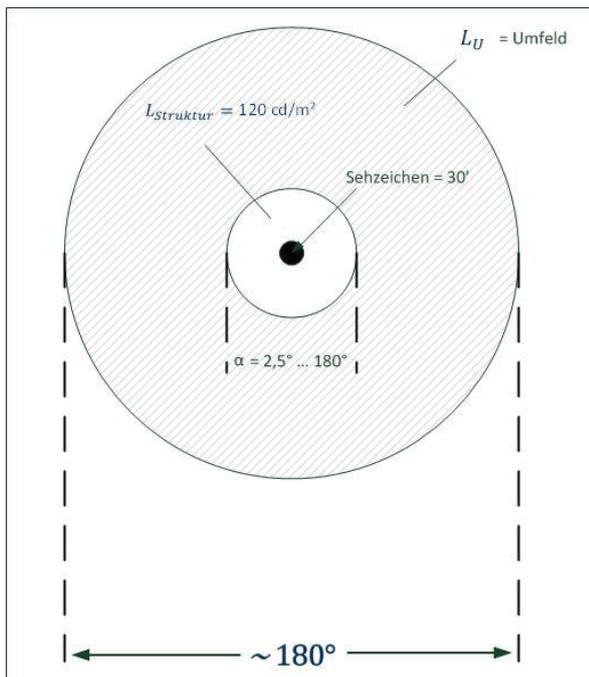


Figure 4: Effect of specific parts of the field of view based on Adrian 1968/69

4 First results

All structures shown in Figure 5 were presented in the center of the dome within a field size of $\pm 20^\circ$ having the same average luminance. These structures ranged (left to right) from a circle of $\pm 20^\circ$, a circle $\pm 15^\circ$, an inner circle of $\pm 10^\circ$ combined with an annulus Ring, four semicircles of different orientation and an annulus Ring between $\pm 20^\circ$ and $\pm 15^\circ$.

If the averaged luminance within a defined field of view as written in [7] is suitable to describe a human's adaptation level, the luminance of subjective black must be the same for all structures. In that case the influence of peripheral luminances is neglected and set to a luminance of approximately 0 cd/m².

Further influence of peripheral luminance distributions will be discussed in following studies.

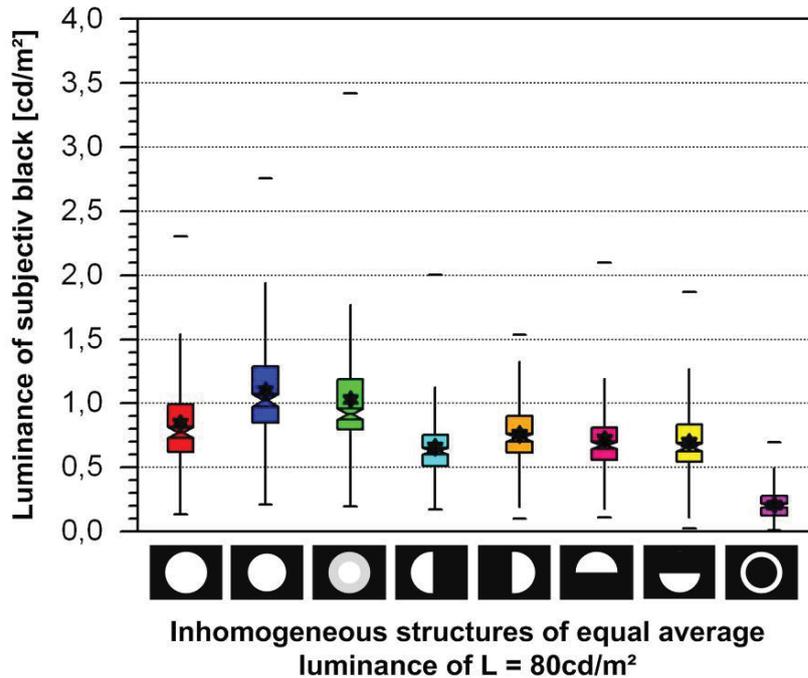


Figure 5: first results of defined inhomogeneous structures

Results obtained show a statistical significant variation in the luminance of subjective black although the average luminance is equal for all structures. Considering the semicircle structures, measured values show no significant difference in the position of each structure. Comparing the results of e.g. a circle of $\pm 20^\circ$ and an annulus Ring between $\pm 20^\circ$ and $\pm 15^\circ$ the luminance of subjective black of the Ring is significantly lower than the one of the circle. One reason can be seen in the different contrast of the structures found directly around the test spot. Another one in the different equivalent veiling luminance generated by each structure.

As mentioned above the next step will be a change in the field's (circle structure) size while the field luminance is kept constant. Furthermore it is of interest how the luminance of subjective black (and later on the adaptation luminance) follows the luminance increase of a defined structure in the field of view.

Both aspects will be discussed during the presentation in Bulgaria because the field data for this part wasn't finished yet.

5 Discussion and conclusion

Concluding the explained experimental setup and furthermore results obtained with it, some limitations have to be mentioned.

The luminance range used is limited to max value of 300cd/m². Experiments were made with max 230cd/m² which is at a lower level of photopic vision. Decrease of luminous flux of the projector lamps can be compensated with the software used for the created images.

Combining all results during my investigations it will be possible to get a closer “look” into the mechanism of the human visual system and the adaptation level a person is adapted to within an inhomogeneous luminance distribution.

6 References

- [1] Visual Adaptation to Complex Luminance Distribution / Commission Internationale de l’Eclairage. Wien, 1999 (135/5). – Forschungsbericht
- [2] Lowry E.M., Jarvis J.G.: The Luminance of Subjective Black In: Journal of SMPTE Vol.65 (1956) S.411-414
- [3] Haubner P.: Zur Relation zwischen Schwarzschwelle Umfeldleuchtdichte und Detailgröße In: „Licht- Forschung: Entwicklung, Technologie“. (1979) Band 1, S. 51
- [4] Rehder W. M.: Der Adaptationszustand des menschlichen Auges in Abhängigkeit von der Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld. Dissertation, Math.-nat. Fakultät der Universität Hamburg 1965
- [5] Thiele E.; Gall D.; Adaptationsleuchtdichte und mittlere Leuchtdichte bei direktem und indirektem Sehen In: Wiss.Z.TH Ilmenau 14; 1968
- [6] <http://paulbourke.net/dome/iDome/> Stand: 18.04.2013
- [7] Baer R.: Grundlagen Beleuchtungstechnik In: Huss-Medien GmbH, 2006
- [8] Adrian W. K.; Adaptation luminance when approaching a tunnel in daytime In: Lighting Res. Technol. 19; S.73-79; 1987
- [9] LiTG, Deutsche Lichttechnische Gesellschaft, Das UGR – Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen In: Publikation 20:2003 S.32
- [10] Börner F.: Das Prinzip der Halbkugelprojektion als neuartiger Ansatz in der Lichtforschung? In: Tagungsband Lux junior; Dörfeld/Ilmenau;2013
- [11] Adrian W., Eberbach K.: Über den Zusammenhang zwischen Sehschwelle und Umfeldgröße In: Optik 28, Heft 2, 1968/69

Das Prinzip der Kugelspiegelprojektion als Ansatz zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte

Felix Börner, Christoph Schierz
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

Tagung LICHT 2014, Den Haag, Tagungsband

Abstract

Unter Laborbedingungen ist es relativ einfach, die Adaptationsleuchtdichte zu ermitteln, da die meisten Experimente vor einem homogen ausgeleuchteten Hintergrund durchgeführt werden.

In der Realität existieren solche Bedingungen leider nicht. In einer Alltagssituation ist das normale Sichtfeld aus einer Unzahl von verschiedenen Leuchtdichten zusammengesetzt, was dazu führt, dass es noch kein wissenschaftlich gestütztes Verfahren zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte gibt.

Diese Lücke soll nun geschlossen werden. Über einen Digital-Projektor und einen sphärischen Spiegel werden einer Versuchsperson sowohl homogene als auch definierte, strukturierte und zeitlich konstante Leuchtdichteverteilungen in einer Halbkugel dargeboten. Die Wirkung dieser Strukturen auf das subjektive Schwarz (die Schwarzschwelle) wird ermittelt.

Über eine entsprechende Ansteuerung können einfache Szenen aus der Realität gewählt und in abstrahierter Form dargestellt werden. Lange Umbauzeiten entfallen und die Möglichkeit die dynamische und statische Adaptation zu untersuchen sind gegeben. Ferner besteht die Möglichkeit ein nahezu homogenes Umfeld als Referenz darstellen zu können was durch eine Kugelausleuchtung z.B. über einen Glühlampenkranz schwer zu erreichen ist.

Vorgestellt wird der Versuchsaufbau, dessen technische Umsetzung und der Vergleich zu bisher verwendeten Versuchsdesigns.

Schlagwörter: Adaptationsleuchtdichte, spherical mirror projection, immersive environment, Schwarzschwelle

1 Einleitung und Problemstellung

Historisch betrachtet gab es zahlreiche Versuche und Versuchsaufbauten zur Bestimmung unterschiedlicher Parameter des menschlichen visuellen Apparates. Eine spezielle Forschungsfrage die auch derzeit noch aktuell ist, ist die Frage nach der Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte in inhomogenen Umfeldern unter mesopischen und photopischen Bedingungen. Bei vielen Laboraufbauten ist es relativ einfach, konstante und reproduzierbare Gegebenheiten für die einzelnen Versuche zu schaffen in Alltagssituationen ist dies nicht möglich.

Um die Adaptationsleuchtdichte homogener Umfeldern zu bestimmen wurden häufig Halbkugeln verwendet welche über einen Glühlampenkranz an den Rändern beleuchtet werden konnten. Eine Versuchsperson befand sich während der Untersuchungen, fixiert mit einer Kinnstütze, vor der Kugel und musste diverse Sehaufgabe erfüllen. Bestand allerdings der Wunsch neben den homogenen Umfeldern auch definierte, strukturierte und zeitlich konstante Leuchtdichteverteilungen zu erzeugen, so bedeutete dies meist einen erhöhten zeitlichen Umbauaufwand. So musste erst ein Stoff mit geringem Reflexionsgrad im Gesichtsfeld des Beobachters oder auf der Kugelfläche befestigt werden. Dieser Vorgang ist sehr aufwendig, zeitintensiv und reduziert somit die Dauer des eigentlichen Versuchsablaufes.

Unter diesem Aspekt entstand die Idee, einen Versuchsaufbau zu entwerfen mit dem es sowohl möglich ist einer Versuchsperson ein definiertes homogenes Umfeld als auch beliebig inhomogene Leuchtdichteverteilungen zu präsentieren. Die Herausforderung bestand darin die o. g. Umbau und Rückbauzeiten auf ein Minimum zu reduzieren.

2 Einflüsse aus der Virtual Reality

Bei der Frage nach der Umsetzung eines Versuchsaufbaus muss ein wenig über den Tellerrand der Lichttechnik in Richtung Medientechnologie geschaut werden. Ein interessanter Ansatz welcher auch schon in Bereichen der Kraftfahrzeugentwicklung, der Flugsimulation oder der Spieleindustrie seine Anwendung gefunden hat ist die virtuelle Realität (VR). Über Computer werden scheinbare Welten geschaffen welche ohne tatsächlich vorhandene Gegenstände den Eindruck einer realistisch erscheinenden Welt vermitteln. Zwei Varianten der Umsetzung sollen im Folgenden kurz angerissen werden.

2.1 FSAP (flexible audiovisuelle Stereoprojektion)

Das Kompetenzzentrum der TU Ilmenau verfügt über eine flexible audiovisuelle Stereo-Projektionseinrichtung (FASP). Diese bietet durch Kombination von Stereoprojektion und akustischer Wellenfeldsynthese technologisch neue Möglichkeiten für die Produkt- und Prozesssimulation in virtuellen Räumen. Der Aufbau (Abbildung 1) besteht aus drei Projektionsflächen (zwei flexible Projektionsflächen). Je Projektionswand werden zwei DLP Projektoren mit einer Auflösung von 1400 x 1050 Pixel und 4200 Lumen verwendet [1]. Über eine entsprechende Software können 3D Daten geladen, konvertiert und somit einzelne Szenen umgesetzt werden.

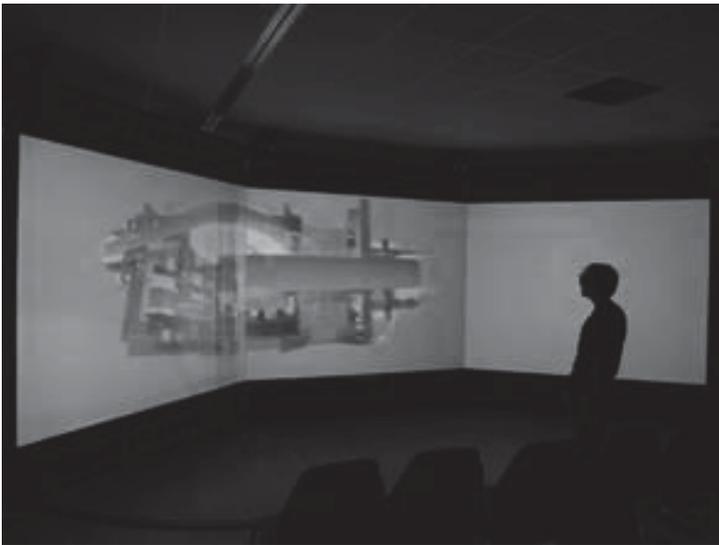


Abbildung 1 – CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) [1]

2.2 Spherical mirror Projection

Die zweite Variante eine virtuelle Umgebung zu erzeugen ist das Prinzip der Kugelspiegelprojektion. Es besteht die Möglichkeit eine Kugelinnenfläche ähnlich einem Planetarium, mit einem Fischaugenobjektiv zu beleuchten. Allerdings ist der Knackpunkt dieser Konstellation, dass in diesem Fall der Projektor an derselben Position angebracht werden muss die perfekt für den Beobachter ist. Verwendet man jedoch einen sphärischen Spiegel, so lässt sich ein passabler Kompromiss aus Beobachterposition und Kugelbeleuchtung finden. Paul Bourke [2] fand einen Weg indem er einen Kugelspiegel am Rand einer aufrecht stehenden Halbkugel positionierte (Abbildung 2) und diesen über eine Aussparung an der Kugel beleuchtete. Die geometrische Vorverzerrung, die nötig ist zur korrekten Darstellung von Inhalten in der Halbkugel, erstellte er selber. Die wichtigsten Parameter hierzu sind:

Halbkugel: Position und Neigungswinkel
 Projektor: Position, Neigungswinkel, Öffnungswinkel, Offset
 Spiegel: Radius und Position

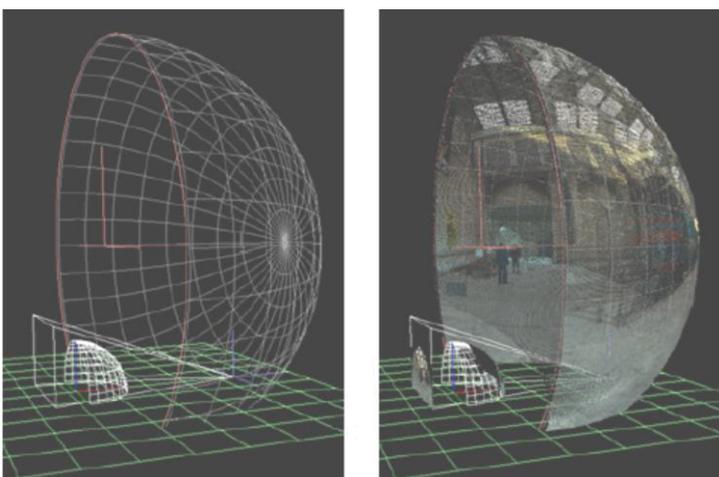


Abbildung 2 – Beispielhafter, simulierter Strahlenverlauf (links) und Umsetzung der simulierten Projektion (rechts) [2]

Über die Anbindung an die open Source Software Blender können 3D Szenen erstellt werden in denen sich ein Beobachter frei bewegen kann. Hauptanliegen des

Versuchsaufbau war es das Gefühl einer immersiven Umgebung für den Beobachter zu erzeugen also einer virtuellen Welt in die man eintauchen kann. Das erreichen möglichst hoher Leuchtdichten oder auch großer homogener Umfelder war hierbei nicht von Interesse.

3 Umsetzung der Kugelprojektion in Ilmenau

Im Zuge des Zielvorhabens die visuelle Adaptation homogener und strukturierter Leuchtdichtfelder zu untersuchen scheint ein Versuchsaufbau nach Bourke geeigneter. Mit der FSAP ist es zum einen nicht möglich ein vollständig homogenes Umfeld zu generieren und ferner ist es nicht realisierbar das gesamte Gesichtsfeld einer Person auszufüllen. Des Weiteren lässt sich durch die Wahl einer Halbkugel auch der Vergleich zu vorhergegangenen Untersuchungen bzw. Ergebnissen ziehen. Das Testzeichen, welches für die Untersuchungen vorgesehen war, konnte auch nicht angebracht werden ohne den ursprünglichen Versuchsaufbau zu beschädigen.

Die Umsetzung sieht wie in Abbildung 3 dargestellt aus. Die Halbkugel hat einen Durchmesser von $d = 1,5 \text{ m}$ und ist mit einem matt weißen Innenanstrich $\rho = 0,84$ versehen. Bei der Auswahl eines digitalen Projektors wurde die Entscheidung zugunsten des Panasonic PT-DZ6700 mit einem Kontrast von $1 : 1500$, einem Lichtstrom von 6000 Lumen bei einer Auflösung von $1920 \times 1200 \text{ Pixel}$ getroffen. Somit sind Leuchtdichten bis 300 cd/m^2 zu erzielen.

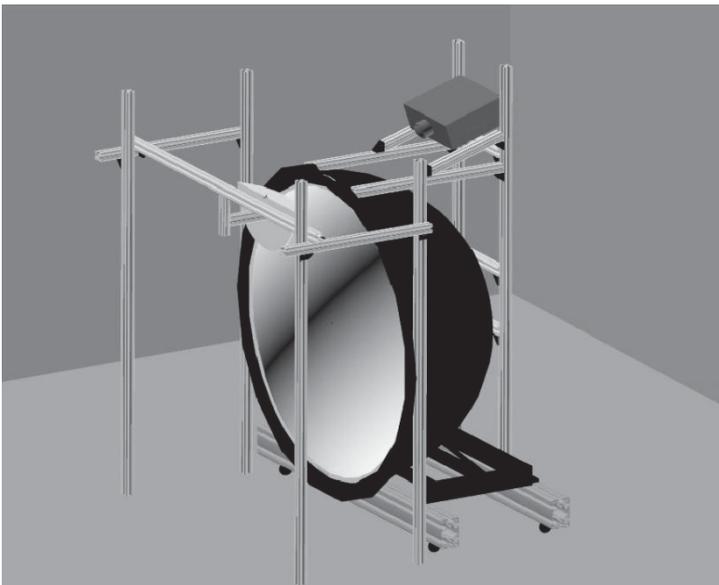


Abbildung 3 – Umsetzung der Kugelprojektion in Ilmenau

Sowohl der Kugelspiegel als auch der Projektor wurden, im Gegensatz zum Aufbau von Bourke, auf der Kugel und somit oberhalb des Probanden angebracht. Diese Position hat den Vorteil dass so keine Versuchsperson aus Versehen gegen den Spiegel treten und die geometrische Entzerrung zerstört. Die Spiegelmaße sind in Abbildung 4 dargestellt. Es handelt sich hierbei um einen handelsüblichen Spiegel zur Verkehrsüberwachung wie er auch vor Einfahrten zu finden ist. Die entsprechende geometrische Vorverzerrung die nötig ist um alle Objekte und Szenen auch korrekt darzustellen, wurde über eine Software der Firma Coolux realisiert. Ist die Entzerrung einmal erstellt, können anschließend beliebig Grafiken oder Videos eingebunden werden. Über eine frei zu gestaltende Benutzeroberfläche sind die Wechsel von homogenen zu inhomogenen Umfeldern ohne Umbaumaßnahmen und erhöhten Zeitaufwand mittels einfacher Tastenbelegungen möglich. Im Kugelzentrum befindet sich eine Öffnung von 30° hinter welcher sich eine

blinkende LED befindet. Mittels Potentiometer kann die Versuchsperson die Helligkeit der Lichtquelle variieren. Eine Kopfstütze dient der Arretierung des Kopfes um reproduzierbare Bedingungen zu gewährleisten.

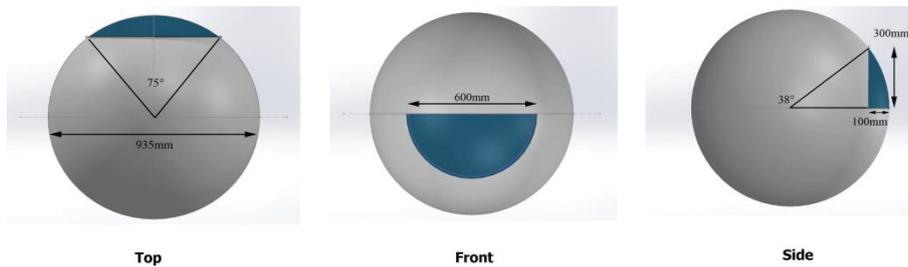


Abbildung 4 – Abmaße des Kugelspiegels

4 Anwendung bei der Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte

Die Adaptationsleuchtdichte ist die Leuchtdichte, auf die sich das Auge einstellt, um optimal zu arbeiten [3]. Bei Darbietung eines homogenen Leuchtdichtefeldes in der Halbkugel kann sie gleich der Leuchtdichte des Umfeldes gesetzt werden. Die Frage wie sie zu berechnen ist wenn das Umfeld aus einer Vielzahl verschiedener Leuchtdichten zusammengesetzt ist, kann über eine Auswahl an vorerst simplen Strukturen (Abbildung 5) untersucht werden.

Struktur	Bezeichnung	Struktur	Bezeichnung	Struktur	Bezeichnung
	VK40		KR3040 =KR4030		VK40 } VK10 } Lu={12;54;120;200 cd/m ² }
	VK30		KR2030		
	VK20		KR1020		VK180 } VK2,5 } Lu={120cd/m ² }
	VK10		KR010		
	HKL		MoniRnd		KR4030 = {12;54;130cd/m ² }
	HKR		MonAf		VK10 = {12;54;100cd/m ² } Lu=0cd/m ²
	HKO		abstrakte Bürosituation		VK40 = {12;54;100cd/m ² } Lu=0cd/m ²
	HKU		VK10 und KR1040		VK40={100;150cd/m ² } bei Lu=const=54cd/m ² VK40={80;100;200cd/m ² } bei Lu=const=150cd/m ²

Abbildung 5 – Übersicht definierter inhomogener Leuchtdichteverteilungen

Die abhängige Variable dieser Testreihe ist die Schwarzschwelle oder auch die Leuchtdichte des subjektiven Schwarz. Ist das Auge auf eine bestimmte Helligkeit adaptiert, lässt sich für ein dunkles Sehobjekt die sogenannte Schwarzschwelle festlegen. Sie ist diejenige Leuchtdichte, die als „gerade lichtlos, ohne Helligkeit“ empfunden wird. Wird die Leuchtdichte weiter reduziert, erscheint das Objekt unverändert schwarz [4]. Beobachtet man also die Veränderung der Schwarzschwelle bei Betrachtung von verschiedenen

Sehfeldgrößen, Positionen, Strukturen und Leuchtdichten, kann man Aussagen über die Änderung des Adaptationszustandes treffen.

5 Fazit

Erste Versuchsreihen haben gezeigt dass die gewonnen Leuchtdichten des subjektiven Schwarz bei homogenen Umfeldleuchtdichten zu vergleichbaren Werten vorheriger Untersuchungen wie Lowry oder Haubner führen.

Beliebige Strukturen bzw. deren Wirkung auf das Schwarzempfinden können sowohl unter mesopischen als auch unter photopischen Bedingungen getestet werden.

In zwei weiteren Untersuchungsreihen mit strukturierten Leuchtdichtefeldern konnten erste Ergebnisse zur Eingrenzung des Adaptationsfeldes bestimmt werden. Die Komplexität der Leuchtdichtestrukturen soll immer weiter erhöht werden und in der abstrakten Darstellung realer Büroszenen in Graustufen enden.

Abschließend können die Zielvorgaben als erfüllt betrachtet werden. Es wurde ein Aufbau erstellt der es ermöglicht, ohne Zeitverluste durch Umbaumaßnahmen während eines Probandentests, homogene und definierte, strukturierte und zeitlich stabile Leuchtdichteverteilungen zu erzeugen. Deren Auswirkung auf das Adaptationsniveau konnte untersucht und bewertet werden.

Der Effekt der Farbwahrnehmung in Abhängigkeit der Sehfeldgröße und des Umfeldes eines Farbreizes stellt einen weiteren Untersuchungsansatz dar.

6 Literatur

- [1] KVR (Kompetenzzentrum Virtual Reality) 2007, Kompetenzzentrum Virtual Reality: Abrufbar online unter <http://www.tu-ilmenau.de/mb/nachrichtenarchiv/einzelnachricht/newsbeitrag/10166/>, zuletzt aufgerufen Juli 2014
- [2] Bourke, P. D. Low Cost Projection Environment for Immersive Gaming. JMM (Journal of Multimedia), ISSN: 1796-2048, Volume 3, Issue 1, 2008, pp 41-46.
- [3] CIE: Visual Adaptation to Complex Luminance Distribution / Commission Internationale de l'Éclairage. Wien, 1999 (135/5). – Forschungsbericht
- [4] Schierz, C.: Grundlagen der Ökologie I. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule in Zürich, Skript für den Bachelor-Studiengang in Architektur, 24.10.2005

Versuchsdesign zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte homogener und definiert strukturierter Leuchtdichtefelder unter photopischen Bedingungen

Felix Börner, Christoph Schierz
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

Tagung LICHT 2014, Den Haag, Tagungsband

Abstract

Um für unterschiedliche Situationen bei Innen und Außenbeleuchtung den Grad einer möglichen Blendung berechnen zu können, ist es wichtig das Adaptationsniveau eines Beobachters zu kennen auf das sich sein Auge eingestellt hat um optimal zu Arbeiten. Unter Laborbedingungen ist es relativ einfach, die Adaptationsleuchtdichte zu ermitteln, da die meisten Experimente vor einem homogen ausgeleuchteten Hintergrund durchgeführt werden. In der Realität existieren solche Bedingungen leider nicht. In einer Alltagssituation ist das normale Sichtfeld aus einer Vielzahl von verschiedenen Leuchtdichten zusammengesetzt. Die Wirkung dieser komplexen Leuchtdichtestrukturen konnte bisher noch durch kein wissenschaftlich gestütztes Verfahren quantifiziert werden um daraus auf die resultierende Adaptationsleuchtdichte zu schließen.

Diese Lücke soll nun geschlossen werden. Die Forschungsfrage, ob sich die Adaptationsleuchtdichte inhomogener Umfeldern über eine sehinkelabhängige Gewichtung der Leuchtdichten definierter Gesichtsfeldbereiche beschreiben lässt, soll mit diesen Versuchen geklärt werden.

Ziel der Untersuchung ist es die Schwarzschnellen herauszufinden, welche in inhomogenen Leuchtdichtestrukturen dasselbe subjektive Schwarz hervorrufen wie in einer homogenen Umgebung.

1 Einleitung

Die Adaptationsleuchtdichte ist die Leuchtdichte, auf die sich das Auge einstellt, um optimal zu arbeiten [1]. Unter Laborbedingungen ist es relativ einfach, diese Größe zu ermitteln, da die meisten Experimente vor einem homogen ausgeleuchteten Hintergrund durchgeführt werden. In der Realität existieren solche Bedingungen leider nicht. In einer Alltagssituation ist das normale Sichtfeld aus einer Unzahl von verschiedenen Leuchtdichten zusammengesetzt, was dazu führt, dass es noch kein allgemein gültiges Verfahren zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte

Obwohl viele Studien über Helligkeitswahrnehmung potentiell mit dem Thema Adaptationsniveau in Beziehung stehen, konnte keine Fachliteratur gefunden werden, die diese Sache explizit behandelt. Alles was jetzt getan werden kann, ist Wissenschaftler zu ermutigen, die Forschung über das Adaptationsniveau nicht nur unter Experimentierbedingungen sondern auch in natürlicher und komplexer Umgebung durchzuführen [1].

Zieht man einen historischen Vergleich über die Grundlagenforschung zur Bestimmung visueller Gütemerkmale verschiedener Epochen, so wird man unweigerlich auf ähnliche Versuchsaufbauten stoßen. Doch welche sind das und wie könnte man diese mit den heute vorhandenen technischen Neuerungen verbessern? Die Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte bei inhomogenen Umfeldern über die Schwarzschwelle, unter anderem mit dieser Frage beschäftigt sich das Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität in Ilmenau.

2 Historische Aufbauten

Viele Forscher haben für ihre Untersuchungen ähnliche Versuchsbedingungen benötigt. Lowry, Haubner oder auch Rehder, um nur einige von ihnen zu nennen, benötigten ein homogenes Umfeld für ihre Untersuchungen auf das sie einen Probanden vollständig adaptiert wussten. Erreicht haben sie diese Bedingung, indem sie eine Halbkugel über einen Glühlampenkranz an den Kugelrändern beleuchteten (Abbildung 1: Messaufbau Lowry). Somit wurden zum Teil Umfeldleuchtdichten von bis zu 1000 cd/m^2 erzielt [2], [3], [4].

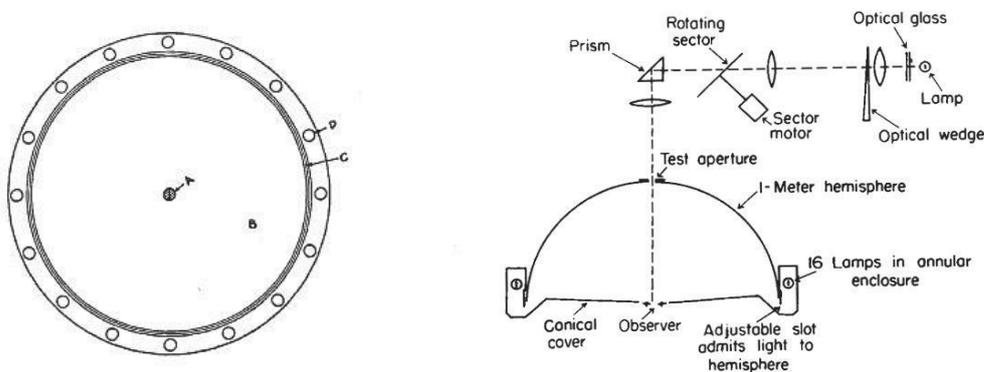


Abbildung 1: Messaufbau Lowry

Im Zentrum der Halbkugel wurde eine Lichtquelle ($0,5^\circ$ Sehwinkel) präsentiert deren Helligkeit über diverse Blenden variiert werden konnte. Für gegebene Umfeldler wurde die Blendenstellung notiert, an der eine Versuchsperson die Lichtquelle gerade nicht mehr erkennen konnte (Schwarzschwelle).

Thiele und Gall verwendeten einen anderen Ansatz, indem einer Versuchsperson nach erfolgter Adaptation an ein relativ hohes Leuchtdichteniveau ein niedrigeres Leuchtdichteniveau dargeboten wird und die Zeit (t_E) misst, die zur Lösung einer gestellten Sehaufgabe vergeht [5]. Im Punkt 0 wurde über einen Testfeldprojektor ein Sehzeichen (Landoltring) projiziert und die Zeit gemessen die ein Proband benötigte, dieses nach abschalten des Szenenprojektors, zu erkennen (Abbildung 2: Messaufbau Thiele, Gall).

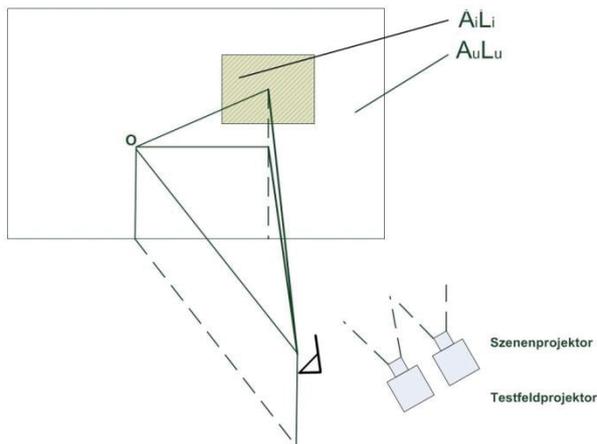


Abbildung 2: Messaufbau Thiele, Gall

Sie kommen zu dem Schluss, dass bei der Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte bei Lokaladaptation der Adaptationszustand in der Fovea centralis sowohl von der Infeldleuchtdichte (sowie auch von der Größe der dargebotenen Fläche) als auch den Umfeldleuchtdichten maßgeblich beeinflusst wird.

Man muss nun aus all diesen Ergebnissen schlussfolgern, dass eine allgemeine Aussage über den Adaptationszustand bei Lokaladaptation, wie etwa bei Bildfeldern, die uns täglich umgeben, wegen der komplizierten Verflechtung aller Parameter kaum möglich ist [5].

Die Grenzen dieser Versuchsaufbauten zeigen sich allerdings auf, wenn z. B. die Wirkung beliebig strukturierter Szenen auf den Adaptationszustand einer Versuchsperson sowohl im Labor als auch im Feld untersucht werden soll.

3 Umsetzung in Ilmenau

Umgesetzt wurde der Ilmenauer Versuchsaufbau (siehe Abbildung 3) mit einer Halbkugel (Durchmesser $d = 1,5 \text{ m}$), einem Kugelspiegel und einem DLP Projektor.

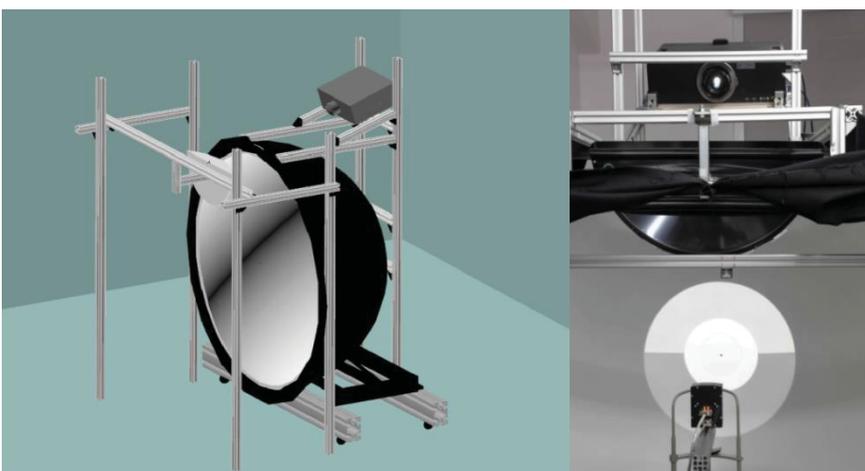


Abbildung 3: Umsetzung Halbkugelprojektion Ilmenau

Derzeit sind, je nach Projektor Einstellung, Leuchtdichten bis 300 cd/m^2 (unkorrigiert) bei einer Farbtemperatur von 6500 K möglich. Im Zentrum der Kugel wurde eine Aufnahme eingefügt mit der es möglich ist verschiedene kreisförmige Adapterplatten mit zentralen Öffnungswinkeln von $0,5^\circ$ bis 10° Sehfeldgröße anzubringen. Die Anbindung an

Folgeuntersuchungen im Bereich der Farbwahrnehmung oder Blendung ist so ohne weiteres gegeben. Die zur geometrisch korrekten Darstellung, von Szenen und Objekten in der Kugel, notwendige Vorverzerrung wird über eine entsprechende Software rechnerseitig realisiert. Bild- und Szenenwechsel dauern nur Sekunden und halten die Dauer eines Testdurchlaufes gering und infolgedessen auch die Belastung der Versuchsperson.

4 Aktueller Forschungsstand in Ilmenau

Unter diesem Gesichtspunkt ist es somit möglich die Wirkung beliebiger homogener und inhomogener Szenen auf den Adaptationszustand eines Probanden zu untersuchen. Offene Fragen aus der Wahrnehmungsforschung und auch der Lichtmesstechnik können mit dem beschriebenen Versuchsaufbau gelöst werden.

Die Änderung des Adaptationszustandes einer Person lässt sich über die Bestimmung der Schwarzschwelle beobachten. Diese beschreibt den Punkt an dem eine Lichtquelle oder ein Objekt vom Probanden „gerade nicht mehr“ bzw. als Schwarz erkannt wird und variiert mit der Änderung des Adaptationsniveaus.

Eine Idee ist es die Schwarzschwelle für verschiedene homogene Umfelder unterschiedlicher Leuchtdichten zu bestimmen. Anschließend denselben Versuch bei inhomogenen Umfeldern zu wiederholen, auch hier die Schwarzschwelle zu bestimmen, um somit im Anschluss auf die Wirkung eines äquivalenten homogenen Umfeldes zu schließen.

4.1 Erste Ergebnisse – Homogene Umfelder

Insgesamt haben 20 Probanden zu je fünf Terminen a 60 Minuten an den ersten Testreihen teilgenommen. Das durchschnittliche Probandenalter betrug 29 Jahre. Nach einer kurzen Einweisung (5 Minuten) konnten sie sich mit der Handhabung des Steuergerätes zur Dimmung der LED sowie der Sehaufgabe vertraut machen (5 Minuten). Im Anschluss erfolgte der Testdurchlauf mit vier Strukturen. Pro Struktur sollte die Schwarzschwelle jeweils zehnmal bestimmt werden.

Zuerst wurde die Leuchtdichte der Schwarzschwelle bei homogenen Umfeldern von 3 cd/m^2 bis 230 cd/m^2 bestimmt und deren Verlauf festgehalten. Hierzu wird im Kugelzentrum (ähnlich wie bei Lowry) eine periodisch (jede Sekunde) für die Dauer von 0,2 Sekunden dargebotene Lichtquelle (Öffnungswinkel $0,5^\circ$) soweit gedimmt bis diese gerade nicht mehr zu erkennen ist. Der hierzu entsprechende Leuchtdichtewert der Lichtquelle ist durch Voruntersuchungen bekannt und ermöglicht dementsprechend die Bestimmung der Schwarzschwelleleuchtdichte bei gegebenem Umfeld. In diesem Fall kann $L_u = L_{Ad}$ gesetzt werden.

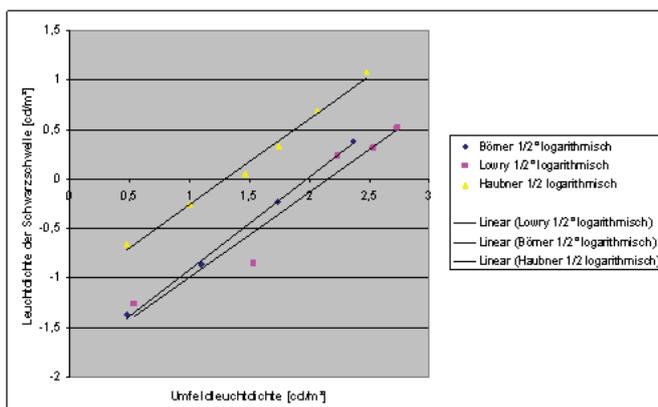


Abbildung 4: Verlauf der Schwarzschwelle Börner, Lowry, Haubner

Die Ergebnisse der ersten Messreihen wurden zu denen von Lowry und Haubner in Beziehung gesetzt (Abbildung 4) und liefern ähnliche Verläufe. Haubners Werte liegen im Durchschnitt höher als die von Börner und Lowry. Eine Ursache hierfür ist u. a. dass er keine blinkende Lichtquelle verwendete sondern eine permanent leuchtende. Lowry hingegen führte seine Untersuchungen mit nur zwei Probanden durch.

4.2 Erste Ergebnisse - inhomogene Umfelder

Ob eine einfache Mittelwertbildung sämtlicher Leuchtdichten im Gesichtsfeld auch der tatsächlichen Adaptationsleuchtdichte entsprechen könnte, soll im Folgenden ähnlich wie bei Adrian untersucht werden. Hierzu wird die Schwarzswellenleuchtdichte eines im Kugelzentrum projizierten 40°-Vollkreises von $L_{40^\circ VK} = 80 \text{ cd/m}^2$ Positivkontrast bestimmt. Im Anschluss wird das zuvor präsentierte Sehfeld in verschiedene einfache Strukturen (Abbildung 5) unterteilt, während aber der Mittelwert der Leuchtdichte auf das gesamte 40° Vollkreis Sehfeld bezogen ebenfalls 80 cd/m^2 ergibt.

Einzelne Strukturen können, separat betrachtet, höhere Leuchtdichten als die angegebenen 80 cd/m^2 erreichen. So lässt sich z. B. die Leuchtdichte des 20°-Vollkreises ohne weiteres auf Werte $> 100 \text{ cd/m}^2$ einstellen. Diese Option lässt Untersuchungen zur Richtungsabhängigkeit einzelner Sehfeldbereiche offen, indem z.B. die Struktur KR (Kreisring) je auf denselben Leuchtdichtewert eingestellt wird und die Auswirkung unterschiedlicher Winkelbereiche untersucht wird (Abbildung 5 rechts).

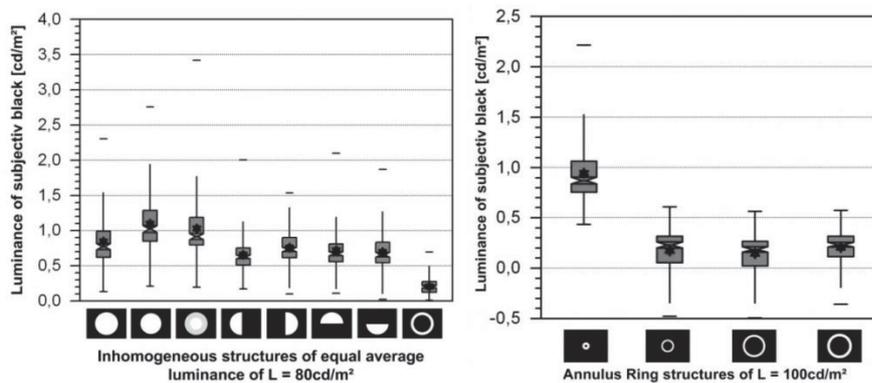


Abbildung 5: Ausprägung der Schwarzschwelle bei gleicher mittlerer Leuchtdichte (links), Einfluss ringförmiger Leuchtdichtestrukturen (rechts)

Die statistische Auswertung der Strukturen gleicher mittlerer Leuchtdichte zeigte einen signifikanten Effekt auf die Ausprägung der Schwarzschwelle. Dargestellt sind von links nach rechts ein 40° Sehfeld, ein 30° Sehfeld, ein 30° Sehfeld mit einem Kreisring, vier Halbkreise im 40° Sehfeld sowie ein Kreisring zwischen 30° und 40°. Obwohl die in Abbildung 5 dargestellten Halbkreise dieselbe mittlere Leuchtdichte bezogen auf ein 40° Sehfeld besaßen, so zeigte sich eine geringere Wirkung auf die Schwarzschwelle im Vergleich zu einem vollen 40° Sehfeld der Leuchtdichte $L=80 \text{ cd/m}^2$. Eine Abhängigkeit der Position eines der Halbkreise auf den Wert der Schwarzschwelle konnte nicht gezeigt werden.

Betrachtet man die Leuchtdichten des subjektiven Schwarz für die in Abbildung 5 rechts dargestellten Kreisringe, so fällt der Wert des Kreisringes zwischen 0,5° und 10° Sehfeldgröße auf. Während die drei Kreisringe zwischen 10° bis 40° Sehfeldgröße einen ähnlichen geringen Effekt auf die Schwelle erzeugen so liegt der Wert der Schwarzschwelle des in der Nähe des Fixationspunkt gelegenen Kreisringes um ein vielfaches höher. Eine Ursache kann u.a. in der durch die Strukturen erzeugten unterschiedlichen

Schleierleuchtdichte gesehen werden. Um diese Wirkung und den Einfluss zentrumsnaher sowie peripherer Strukturen bestimmen zu können, sind Folgeuntersuchungen notwendig.

5 Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass eine einfache Mittelung von Leuchtdichten im Gesichtsfeld eines Beobachters nicht hinreichend genau das vorherrschende Adaptationsniveau beschreiben können. Aus diesem Grund wurden Folgeuntersuchungen durchgeführt um eine Gewichtung definierter Bereiche im Gesichtsfeld sowie von Infeld und Peripherie zu untersuchen. Hierzu werden erneut einfache Kreisformen verwendet, welche sich in ihrer Größe nicht aber ihrer Leuchtdichte unterscheiden. Zur Bestimmung eines Einflusses peripherer Lichtquellen wird ein definiertes Sehfeld konstant bei einer Leuchtdichte von $L = 100 \text{ cd/m}^2$ gehalten und die Leuchtdichte des Umfeldes stufenweise erhöht. Sämtliche dargestellten Strukturen und Umfeldler sowie deren Wirkung auf die Schwarzwelle wurden im Zuge erster Untersuchungen nur unter photopischen Bedingungen bestimmt. Analog hierzu bieten sich Nachfolgetests unter mesopischen Voraussetzungen an.

6 Literatur

- [1] Visual Adaptation to Complex Luminance Distribution / Commission Internationale de l'Eclairage. Wien, 1999 (135/5). – Forschungsbericht
- [2] Lowry, E. M., Jarvis J.G.: The Luminance of Subjective Black In: Journal of SMPTE Vol.65 (1956) S.411-414
- [3] Haubner, P. : Zur Relation zwischen Schwarzschwelle Umfeldleuchtdichte und Detailgröße In: „Licht- Forschung: Entwicklung, Technologie“. (1979) Band 1, S. 51
- [4] Rehder, W. M.:Der Adaptationszustand des menschlichen Auges in Abhängigkeit von der Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld. Dissertation, Math.-nat. Fakultät der Universität Hamburg 1965
- [5] Thiele, E.; Gall, D.; Adaptationsleuchtdichte und mittlere Leuchtdichte bei direktem und indirektem Sehen In: Wiss. Z.TH Ilmenau 14; 1968

Einfluss der spektralen Zusammensetzung einer Lichtquelle auf die Blendung unter mesopischen Bedingungen

*Mathias Niedling, Daniel Kierdorf, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik*

Tagung LICHT 2012, Berlin, Tagungsband S. 484-487

1 Abstract

Um den Einfluss eines erhöhten Blauanteils im Spektrum einer Lichtquelle auf die physiologische und psychologische Blendung im Mesopischen zu untersuchen wurde ein Laborversuch konzipiert. Den Probanden wurden dabei künstliche schmalbandige Reize dargeboten um die Wirkung verschiedener spektraler Bereiche zu eruieren. Weiterhin wurden real existierende breitbandige Spektren untersucht, um mögliche Verzerrungen des Ergebnisses der Darbietung der synthetischen Spektren festzustellen. Die Ergebnisse lagen bei Abgabe des Beitrages noch nicht vor.

2 Einleitung

In den kommenden Jahren wird das nächtliche Erscheinungsbild unserer Städte zunehmend von LED-Straßenbeleuchtung geprägt werden. Diese neue Technologie bietet das Potential Energie zu sparen und das Licht exakt auf die Nutzflächen zu verteilen. Bei allen scheinbaren Vorteilen der LED-Beleuchtung zeigt sich jedoch bis dato immer wieder, dass die Umrüstung von konventioneller Straßenbeleuchtung auf die neue Technologie nicht reibungslos verläuft. Neben den teils noch sehr hohen Kosten für Neuinstallation sind vor allem Fragen wie die der Lebensdauer der Leuchten im realen Betrieb und die Auswirkungen der neuartigen Lichtquellen auf die Wahrnehmung noch nicht hinreichend untersucht. Zudem stellt die scheinbar höhere Blendung der LED-Leuchten immer wieder eine Hürde für die Akzeptanz dieser neuen Technologie dar. Ob und in wie weit eine höhere Blendung durch LED-Straßenbeleuchtung zu einer Beeinträchtigung der Verkehrsteilnehmer führt ist bis dato ebenfalls noch nicht hinreichend untersucht. Dabei unterscheiden sich die LED-Straßenleuchten signifikant von herkömmlichen HID-Leuchten. Zum einen weist das Spektrum der LEDs einen wesentlichen höheren Blauanteil auf. Zum anderen sind LEDs kleine punktförmige Lichtquellen mit hoher Leuchtdichte. Dadurch bedingte Unterschiede in der Leuchtenkonstruktion führen zu Leuchten mit hohen Leuchtdichten (LED mit Vorsatzoptik) und hohen Gradienten zum Umfeld und teils auch auf der leuchtenden Fläche. Beide genannten Unterschiede können Blendung negativ

beeinflussen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss der spektralen Zusammensetzung einer Lichtquelle auf die Blendung unter mesopischen Bedingungen. Dabei soll die Frage geklärt werden, ob der erhöhte Blauanteil einer LED-Beleuchtung zu einer erhöhten Blendung führt.

3 Stand der Wissenschaft

Bereits 1955 stellte De Boer /1/ fest, dass bei gleichem Grad der psychologischen Blendung bei Natrium-Niederdrucklampen höhere Leuchtdichten als bei Quecksilberdampf-Hochdrucklampen zulässig sind. Mit dem Einsatz von Gasentladungslampen in Automobilscheinwerfern wurden dann vermehrt Stimmen laut, die sich über erhöhte Blendung im Straßenverkehr beklagten. Untersuchungen von Völker /2/ dazu haben ergeben, dass im direkten Vergleich von Halogen und Gasentladungsscheinwerfern signifikante Unterschiede in der Blendungsbewertung bestehen. Es konnte gezeigt werden, dass die Lichtart zu einer Abweichung von einer Bewertungsstufe auf der 9-stufigen de Boer-Skala führt. Hierbei wurde das bläuliche Licht der Gasentladungslampe als störender bewertet. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt eine Studie von Sivak /3/. Er untersuchte die psychologische Blendung von fünf Kfz-Scheinwerfern mit verschiedenen Lichtquellen (Halogen, HID, LED 4000K, LED 4800K, LED 6600K). Alle Scheinwerfer wurden so eingestellt, dass sie am Auge der Probanden die gleiche Beleuchtungsstärke erzeugten. Die Bewertung der Blendung zeigte auch hier signifikante Unterschiede zwischen den Scheinwerfern. Je höher der Blauanteil im Spektrum der Lichtquelle war desto höher wurde die Blendung bewertet. Dabei wurden die Spektren der Lichtquellen mit der Empfindlichkeitskurve der Blauzapfen gewichtet. Eine lineare Regression zwischen den ermittelten Werten und der Blendungsbewertung ergab ein Bestimmtheitsmaß $R^2=0,99$. Demnach besteht zwischen der Blendungsbewertung und der Erregung der Blauzapfen ein direkter Zusammenhang. Bodrogi /4/ kommt in seiner Studie zu einem anderen Ergebnis. Er bot den Probanden schmalbandige Reize dar und ließ deren Leuchtdichten so einstellen, dass sie dem jeweils gleichen Wert auf der de Boer-Skala entsprechen. Ziel seiner Untersuchung war es, eine spektrale Blendempfindlichkeitskurve zu ermitteln. Die Bestimmung des Beitrages der Blauzapfen zur Blendungsbewertung zeigte jedoch keinen Einfluss. In einer Studie von Fekete /5/ zeigte sich bei Darbietung schmalbandiger Reize ein marginaler Einfluss der Blauzapfen. Bisherige Studien zeigen also, dass ein erhöhter Blauanteil im Spektrum zu einer höheren Blendungsbewertung führen kann. Je nach Ausführung der Studie kommt es jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen bezüglich des Beitrages der Blauzapfen. Betrachtet man vor diesem Hintergrund die Spektren konventioneller Lampen in der Straßenbeleuchtung (z. B. NAV) und die von LEDs in Verbindung mit den Empfindlichkeitskurven der Zapfen (Abb. 1) so erscheint es sinnvoll, den Einfluss der spektralen Zusammensetzung der Lichtquelle auf die Blendung für die Anwendung Straßenbeleuchtung zu untersuchen.

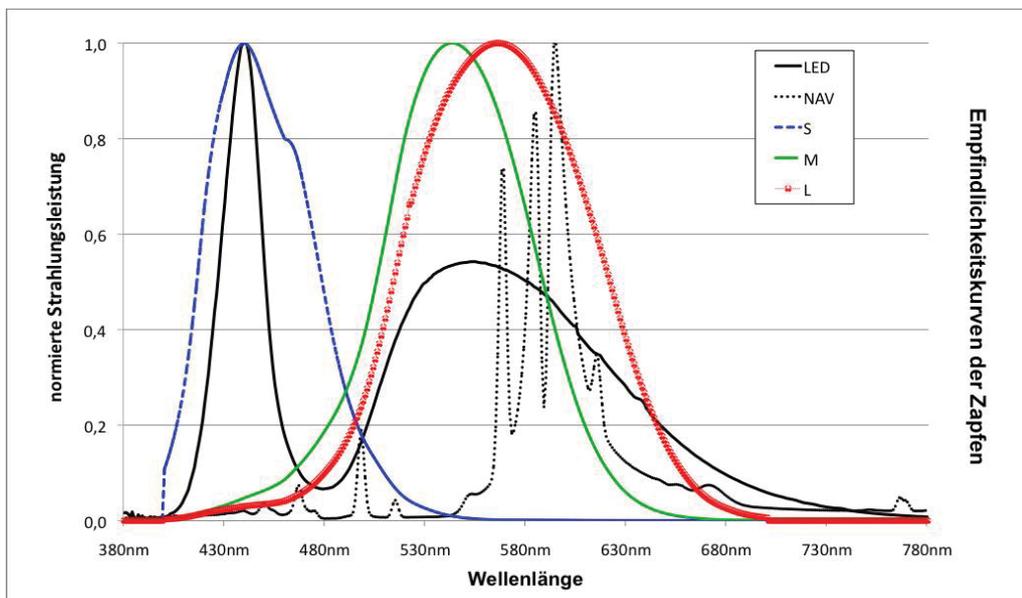


Abbildung 1: Spektrum einer Konversions-LED und einer NAV-Lampe und der Empfindlichkeitskurven der Zapfen

Die Alternativhypothese der Untersuchung lautet demnach: Die spektrale Zusammensetzung einer Blendquelle hat einen negativen Einfluss auf die psychologische Blendung. Ein höherer Blauanteil im Spektrum der Lichtquelle führt bei gleicher Leuchtdichte und Größe der Blendquelle zu einer höheren Blendungsbewertung. Der Autor vermutet zudem, dass es Unterschiede in der Bewertung der Blendung zwischen schmalbandigen und breitbandigen Reizen gibt. Schmalbandige Reize führen hierbei zu verzerrten Ergebnissen.

4 Untersuchung

Ziel dieser Studie war es, den Einfluss des Spektrums auf die psychologische und physiologische Blendung zu untersuchen. In Abbildung 2 a und 2 b ist das Setup der Untersuchung dargestellt. Die Probanden saßen vor einer halben Ulbrichtschen Kugel mit einem Radius von 0,75 m, welche das Umfeld darstellte (Abb. 2a). Die Umfeldleuchtdichte stand zum Zeitpunkt der Abgabe des Papers noch nicht fest. Der Kopf der Versuchspersonen wurde mittels einer Kinnstütze fixiert. Auf einem Monitor wurden durch eine Öffnung in der Halbkugel Sehzeichen präsentiert (Abb. 2b), um den Einfluss der Stimuli auf den Schwellenkontrast zu ermitteln. Die Blendquelle befand sich in einem Winkel von 3° oberhalb des Sehzeichens. Der Durchmesser der Blendquelle betrug 3 mm. Die Blendquelle wurde mit einem OL490 realisiert [6], dessen Spektrum frei einstellbar ist. Um den Einfluss einzelner spektraler Abschnitte zu untersuchen, wurde der Bereich von 400-700 nm in 11 schmale Banden unterteilt. Diese wurden den Probanden photonengleich und $v(\lambda)$ -bewertet dargeboten. Außerdem wurden real existierende breitbandige Spektren gezeigt um zu überprüfen, ob erwartete Effekte bei der Darbietung der schmalbandigen Reize auch bei breitbandigen Stimuli sichtbar werden. Zum Zeitpunkt der Abgabe des Papers befand sich die Studie noch in Durchführung. Weitere Details zu den Stimuli und den Umfeldbedingungen sind der Präsentation auf der Tagung zu entnehmen.

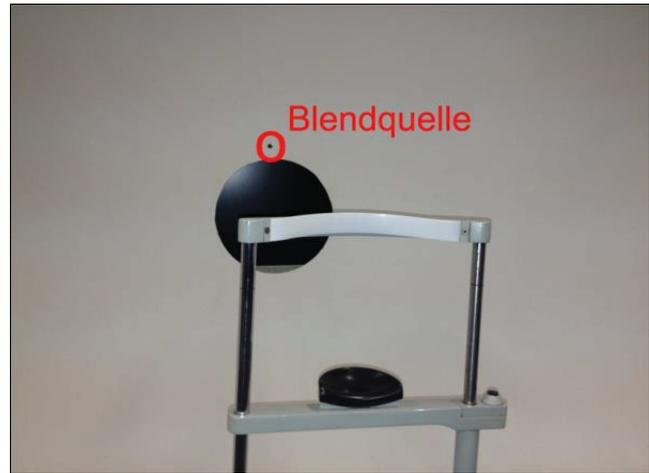


Abbildung 2a (links) & 2b (rechts): Aufbau des Laborversuches

Die Stimuli wurden in zweimal randomisierter Reihenfolge dargeboten. Aufgabe der Probanden war es, die Richtung des gezeigten Sehzeichens zu erkennen, dessen Kontrast während jedes Durchganges anstieg. Somit konnte zu jedem Reiz eine Kontraststufe ermittelt werden. Zugleich wurde eine Blendungsbewertung jedes Stimulus auf einer 9-stufigen Skala abgefragt. Die Probanden konnten mit einem Taster den Versuchsdurchlauf beenden, wenn die jeweilige Kontraststufe erkannt war. 40 Probanden (geschlechtsheterogen) in zwei Altersgruppen (20-30 Jahre und älter als 60 Jahre) nahmen an der Studie teil.

5 Ergebnisse

Zum Zeitpunkt der Abgabe des Papers lagen die Ergebnisse noch nicht vor. Diese werden auf der Tagung vorgestellt.

6 Literatur

- [1] De Boer, J.B., Observations on discomfort glare in street lighting; influence of the colours of light. 13. CIE Kongress Zürich, 1955
- [2] Völker S., Habilitationsschrift, L-LAB Paderborn, 2008
- [3] Sivak et al., Blue content of LED headlamps and discomfort glare, University of Michigan, Report No. UMTRI-2005-2, 2005
- [4] Bodgroggi et al., Spectral sensitivity and additivity of discomfort glare under street and automotive lighting conditions, 27. CIE Kongress, Sun City - Südafrika, 2011
- [5] Fekete et al., Spectral discomfort glare sensitivity investigations, Ophthalmic and Physiological Optics, 2010:30
- [6] <http://www.goochandhousego.com/products/life-science-instrumentation/spectral-imaging-synthesis/ol-490-agile-light-source>, letzter Zugriff am 14.06.2012

Influence of a Glare Sources Spectrum on Discomfort and Disability Glare under Mesopic Conditions

*Mathias Niedling, Daniel Kierdorf, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik*

Proceedings of the CIE Centenary Conference Paris 2013, S. 340-348

Abstract

This article discusses the influence of light source spectral power distribution (SPD) on discomfort and disability glare under mesopic conditions. There have been several investigations of this issue but the results are inconclusive. Many of them focussed on automotive lighting. The present study had the objective to investigate SPD-effects on glare from outdoor lighting installations. In an experimental setup different narrow band stimuli were presented to examine the influence of different spectral ranges on glare perception. Furthermore eight simulated spectra of (actual) light sources were tested to affirm the results for the narrow band stimuli. It was found that short wavelength radiation in the spectrum increases discomfort glare. No influence on disability glare could be detected. A strong correlation between the blue-cone-signal and the glare rating was found. The established glare sensitivity curve needs to be substantiated with further investigations under different conditions.

Keywords: Discomfort glare, Disability glare, Spectral power distribution, Experimental Design

1 Introduction

Typically the glare evaluation for street lighting is calculated by the illuminance at the eye caused by the luminaires (E_{Glare}) and the background-luminance (L_{ad}) (Threshold Increment TI, (DIN EN 2003), (CIE 1976)). These values can easily be simulated with light planning tools using the luminous intensity from the luminaires light distribution curve. This method is for evaluation of disability glare and is based on the Stiles-Holladay formula. The glare effect is described by an equivalent veiling luminance (L_{veil}) resulting from the stray light in the eye which superimposes the retinal image and leads to lower contrast sensitivity (CIE 2002). There are also models for the quantification of discomfort glare using the luminous intensity (CIE 1976), the illuminance at the eye (Bullough 2003) or the luminance of the glare source (Vos 2002). However, they are not established and in practice not used to predict discomfort

glare for the mentioned application. And this may cause problems in the transition from conventional street lighting to the new LED-technology.

Considering that the luminous intensity and the resultant illuminance at the eye do not provide any information about the illuminating surface, we have to take care for the differences between conventional luminaires and those with LED. Due to the small size and the high luminance of LED's there are major challenges for the developing and designing LED street lights. To direct the light from the LED onto the street mostly lenses are used. Compared to conventional street lighting with High pressure Mercury vapour Lamp (HML) or High Pressure Sodium lamp (HPS) lamps we do not have just 'one' illuminating surface but a lot of small luminous points on the luminaire. It means that the homogeneity of the illuminating surface, the maximum luminance and the average luminance can differ considerably. You can measure the same illuminance at the eye from a LED and HPS street light but the maximum luminance from the LED street light can be much higher caused by the inhomogeneity of the surface. These parameters can influence glare perception and should be taken into account for glare evaluation. This topic is part of a PhD study at the Technical University of Berlin but will not be discussed in this paper (Niedling 2013).

Furthermore the luminous intensity and the resultant illuminance at the eye give no information about spectral power distribution of the glare source, a second difference between conventional lamps and LED's. As shown in figure 1 there is a much higher blue content in the LED's spectrum compared to HPS, which is mostly used lamp for street lighting in the EU (Trilux 2009). Previous research (Sivak 2005), (De Boer 1955), (Bullough 2002) showed a greater discomfort glare rating for headlamps with higher blue content (HID, LED) compared to halogen headlamps. In the course of this, several investigations tried to find out a glare sensitivity curve to minimize discomfort glare (Fekete 2010), (Bodrogi 2011), (Bullough 2009). Unfortunately the results are inconclusive and we cannot assume that we can use the curves for the mentioned application. Different experimental designs could be the cause for that. Resulting, there remains a need to investigate this topic under street lighting conditions.

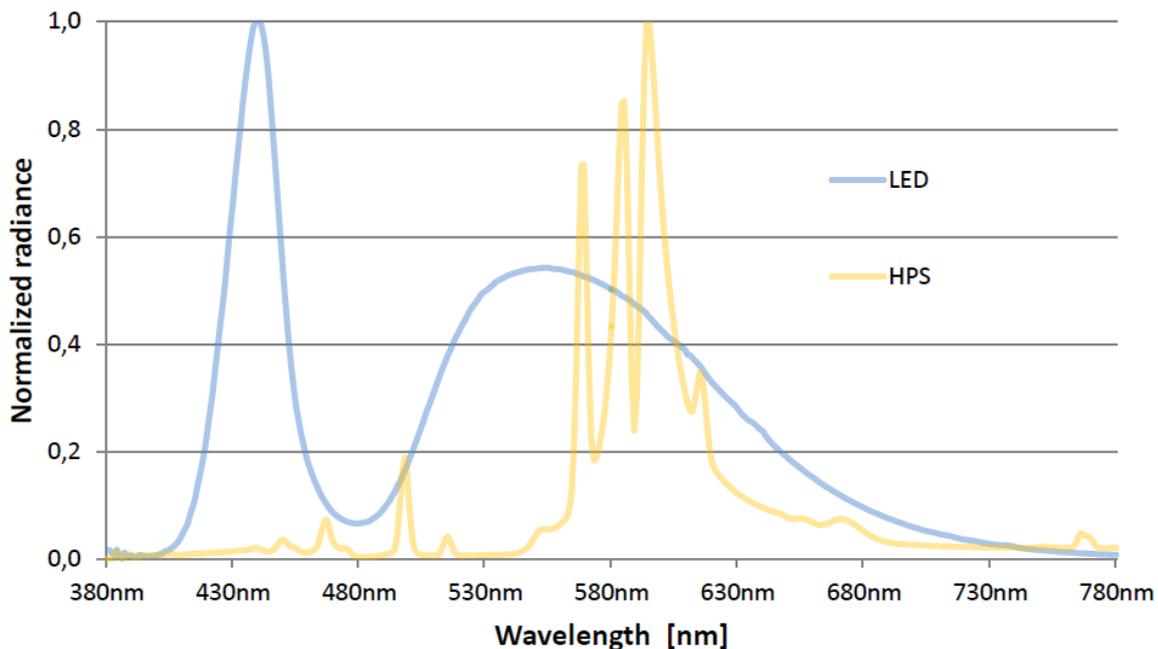


Figure 1: Relative SPD's of LED and HPS

2 Experimental Design

2.1 Experimental setup

Pictures of the experimental setup and the subjects view are shown in figures 2 and 3. The subjects were sitting in front of a half integrating sphere with a diameter of 1.5 m (fig. 2). The subjects view was fixed with a chin rest. The background luminance in the setup was realized with a flexible LED-tube (3.400 K) mounted at the frame of the half sphere behind a visual protection. The ambient light level was set to 0.05 cd/m^2 . The glare source was presented at an angel of 4° above the line of sight out of a light guide with a diameter of 3 mm (fig. 3). This corresponds to a mounting height of a luminaire of 6 m and a distance of 60 m with an eye level of 1.5 m. The spectral freely adjustable light source OL490¹, which offers the potential to produce user defined spectra, was used to realise the glare source with predefined spectral distribution. To reduce the guess probability and the variance, Landolt's ring with an opening of 5 mm (visual angel $0,38^\circ$) were shown as test characters (fig. 3).



Figure 2: Experimental setup

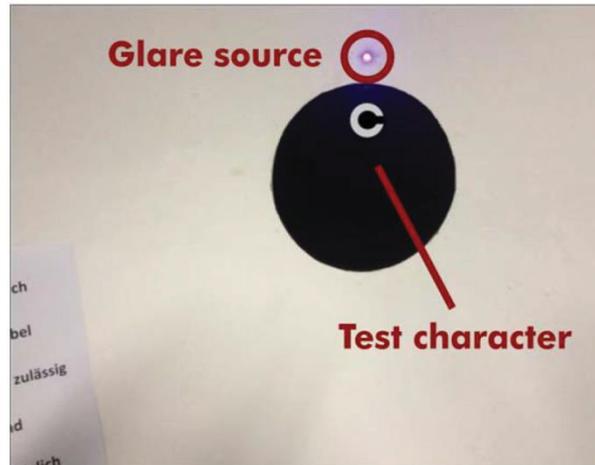


Figure 3: Subject's view

2.2 Stimuli

To investigate the influence of different spectral ranges on glare perception, narrow band stimuli with different peak-wavelengths were presented to the subjects. To see if there are differences for the presentation of narrow band stimuli and broadband stimuli, different spectra of actual light sources were presented additionally. The stimuli were subdivided into three groups. The first group consists of 11 narrow band stimuli (FWHM=25 nm) from 400 nm to 685 nm with equal radiance (fig. 4). The luminance in kilocandela and the illuminance at the subject's eye of each stimulus is shown in table 1. This table shows that the photometric values for these stimuli follow the $V(\lambda)$ curve. It is assumed that if there is another dimension for the glare rating in effect, the results will represent the deviation from the luminance of the stimuli.

¹ <http://goochandhousego.com/products/life-science-instrumentation/spectral-imaging-synthesis/ol-490-agile-light-source>, 27.02.2013

Table 1: Photometric values for the narrow band stimuli with equal radiance

Peak [nm]	414	441	468	492	518	542	567	592	619	644	669
L [kcd/m ²]	6.8	19.1	47.3	129	321	500	500	371	228	96	28.6
E _{eye}	0.06	0.1	0.4	1.3	3.2	5	5	3.8	1.4	0.8	0.3

The second group consists of nine narrow band stimuli with equal luminance (fig. 5). These were the same stimuli as in the first group, but adjusted to the same photopic luminance (compared to the blue peak very low intensities for yellow and green). Every stimulus caused an illuminance at the subjects' eye of 0.07 lx. Because of the limitation of the blue peak set by the OL490's light source the remaining stimuli had to be adjusted to this peak-wavelength. These stimuli were presented to confirm the results for the stimuli specified above.

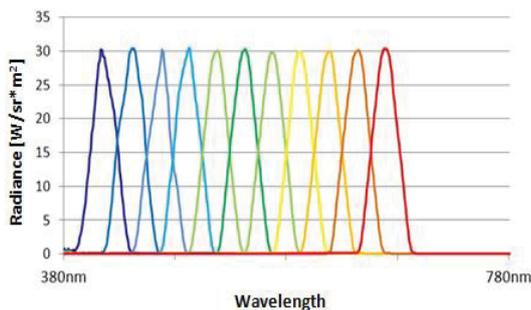


Figure 4: Narrow band stimuli with equal radiance

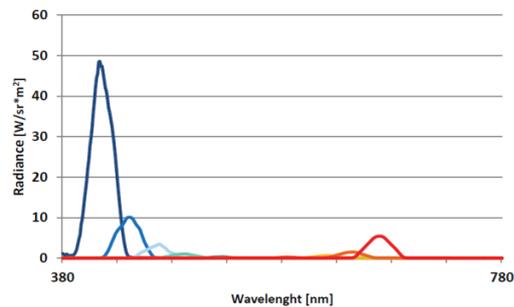


Figure 5: Narrow band stimuli with equal luminance

The third group consist of eight simulated spectra of different light sources with equal luminance. These stimuli also caused the same illuminance at the subject's eye (5 lx). In a pre-test stimuli with a number of intensities were evaluated. The intensity corresponding to an illuminance of 5 lx was tolerable for the majority of subjects. To that, it did not cause a corona around the glare source masking the test character. Because of the different results of previous research (see above) and the lacking knowledge with respect to the applicability of narrow band results to broadband stimuli these actual spectra were presented to constitute effects found for the stimuli shown above. The following spectra were presented:

- LED 7.800 K / LED 4.300 K / LED 3.300 K (all phosphor-converted)
- Incandescent lamp ILB
- High pressure sodium lamp (HPS)
- Fluorescent lamp (6.800 K)
- Metal halide lamp (MHL)
- High pressure mercury vapour lamp (HML).

2.3 Procedure and Task

Before starting, the subjects had to pass an eye test in the black room for about 6 minutes. After this they were asked to put their chin in the chin rest. The subjects were instructed to look on the fixation point which was the point of presentation of the test character at the same time. The instruction and 4 trial runs guaranteed another 5 minutes for adaptation. The stimuli were presented in randomised order (n=28, each stimulus twice). At the same time with the stimulus the test character was faded in with ascending grey scale. When the Landolt's ring opening was detected, the subjects had to push a button held in their hands to turn off the glare source and to fade out the test character. Subsequently they had to state the direction of the opening and rate the discomfort glare on the de Boer scale. To make the

glare rating more intuitive for non-experts the de Boer scale was inverted (1=not noticeable, 9=unbearable). The detected grey scale of the Landolt's ring is use as level for threshold contrast. There was a break of 40 sec between the stimuli. In a pre-test higher and lower times between the stimuli were tested. There was no influence on the glare perception, so a mean time was chosen for the experiment procedure. The total duration of the test was approximately 1 hour. 28 subjects (aged from 21-35 years, median 26 years) took part in this study.

3 Results

3.1 Results for the narrow band stimuli with equal radiance

The results of the glare rating and the detected grey scale for the narrow band stimuli with equal radiance are shown in figure 6 and 7. Please note that the results of the glare rating follow the inverted de Boer scale. In the diagrams the $V(\lambda)$ curve is drawn in (cf. 2.2). The discomfort glare values (represented in median de Boer), disability glare values (represented in median grey scale) and the illuminance at the subjects eye caused by the stimuli (see table 1) are shown in table 2. The comparison of the stimuli with peak-wavelength of 414 nm and 669 nm shows that there is a higher glare rating for the blue spectral band in spite of lower luminance and resultant lower illuminance at the eye (factor 4). The short-wavelength radiance seems to be more disturbing than the long-wave. This effect becomes also apparent for the comparison of the other short- and long-wavelength stimuli (e.g. 2 vs. 10). For the detection of the test target (disability glare) another effect was found. The disability glare rating follows $V(\lambda)$ relatively well. The higher the illuminance of the stimulus at the eye the higher was the threshold contrast. The comparison of the maximum of the detected curves with the photopic curve shows a mismatch for glare rating and a relation to $V(\lambda)$ for the detected grey scale. Also the shape of the discomfort glare rating shows another trend for the short-wavelength radiance compared to the disability glare rating.

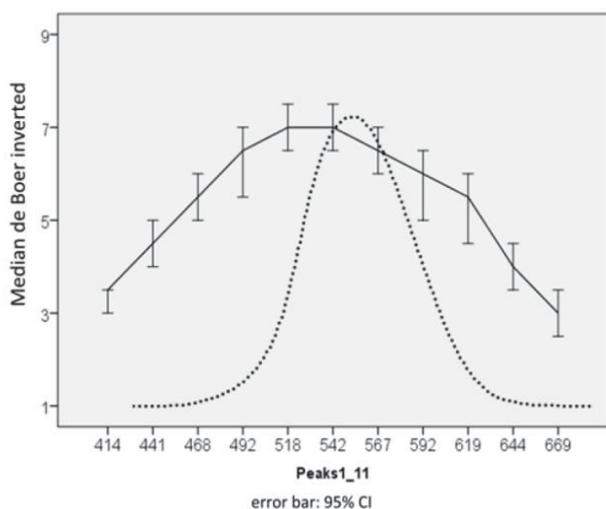


Figure 6: Results de Boer glare rating inverted for the narrow band stimuli with equal radiance

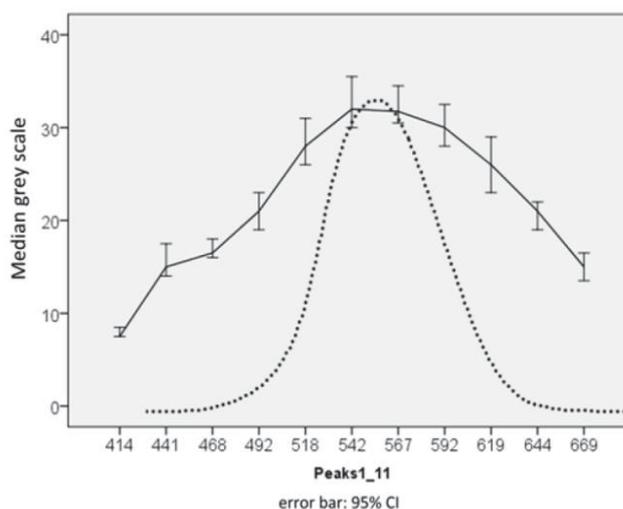


Figure 7: Results detected grey scale for the narrow band stimuli with equal radiance

Table 2: Results for the narrow band stimuli with equal radiance

Peak	414	441	468	492	518	542	567	592	619	644	669
Median de Boer	3.5	4.5	5.5	6.5	7.0	7.0	6.5	6.0	5.5	4.0	3.0
Median grey scale	7.5	15.0	16.5	21.0	28.0	32.0	31.8	30.0	26.0	21.0	15.0
E _{eye} [lx]	0.06	0.1	0.4	1.3	3.2	5	5	3.8	1.4	0.8	0.3

The results show, that the disability glare prediction is not dependent on a glare sources SPD. The veiling luminance, resultant from the illuminance at the eye, shows no dependency of the wavelength. However, the discomfort glare rating shows an influence of SPD. Shorter wavelengths seem to be more disturbing. The determined glare sensitivity found in this research will be compared with results from previous research ((Fekete 2010), (Bodrogi 2011), (Bullough 2009)) to investigate the differences.

3.2 Results for the stimuli with equal luminance

The results for the narrow band stimuli with equal luminance are shown in figure 8 and 9. The values for the glare rating and the grey scale are presented in table 3. The outcomes illustrated above can be confirmed by the results of this second group of the stimuli. As shown in the diagram in figure 8, there is an increase for the glare rating for shorter wavelengths. The differences for the stimuli with peak-wavelength of 414 nm, 440 nm, 468 nm and 490 nm are significant. There was also a small increase of the grey scale for the short-wavelength peaks detected. The differences for the peaks 414 nm and 440 nm are significant. This is an indicator of the higher dispersion of shorter wavelengths which results in higher veiling luminances.

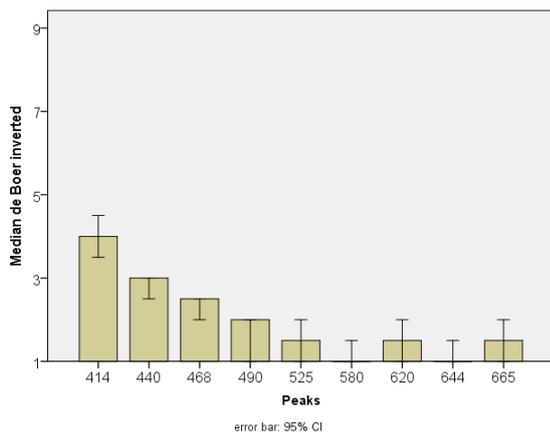


Figure 8: Results de Boer glare rating inverted for the narrow band stimuli with equal luminance

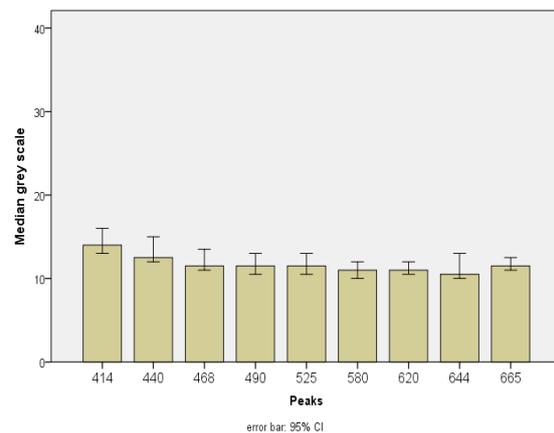


Figure 9: Results detected grey scale for the narrow band stimuli with equal luminance

Table 3: Results for the narrow band stimuli with equal luminance

Peak	414	440	468	490	525	580	620	644	665
Median de Boer	4.0	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5
Median grey scale	14.0	12.5	11.5	11.5	11.5	11.0	11.0	10.5	11.5

3.3 Results for the broadband stimuli

The results for the different simulated broadband spectra with equal illuminance at the subject's eye are shown in figure 10 and 11. There is no difference for the three LED spectra. No influence of the CCT of LED's on discomfort glare was found under these experimental conditions. For the incandescent lamp and the high pressure sodium lamp there is a high significant decrease of the glare rating (see table 4). Under equal conditions (same size and luminance of the glare source) spectra with "no" blue in it are less disturbing. For the HID's and the fluorescent lamp there are no significant differences compared to the LED's.

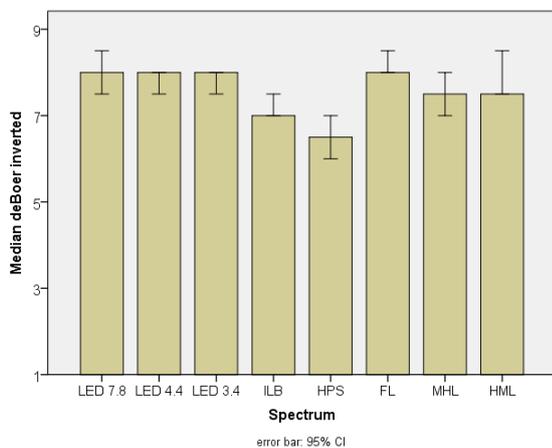


Figure 10: Results median de Boer glare rating inverted for the broadband spectra

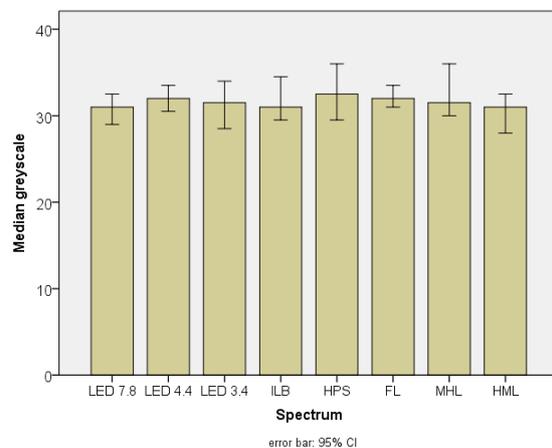


Figure 11: Results detected grey scale for the broadband spectra

Table 4: Results for the broadband spectra

Spectra	LED 7.8	LED 4.4	LED 3.4	ILB	HPS	FL	MHL	HML
Median de Boer	8.0	8.0	8.0	7.0	6.5	8.0	7.5	7.5
Median grey scale	31.0	32.0	31.5	31.0	32.5	32.0	31.5	31.0

No influence of SPD of broadband stimuli on disability glare under the used experimental conditions could be detected. A glare source's SPD does not influence the perception of road users. For the discomfort glare rating again there was a significant influence of short wavelength radiation. Light sources with higher blue content increase the glare rating. These results need to be affirmed for different conditions (lower luminances of the glare source, different ambient conditions)

3.4 Theoretical approach for the results

In figure 10 the median of the de Boer glare rating is shown which is not sensitive for small differences. Therefore in figure 12 the arithmetic mean of the glare rating (AM de Boer) is presented to make finer graduations visible. With this it becomes visible for the three LED spectra and the metal halide lamp as well that a higher blue content in the glare sources spectrum leads to higher glare ratings. In a next step the SPD of each spectra was weighted by the blue cone sensitivity curve and integrated over the wavelength (the so called 'blue-cone signal', see table 5, cf. (Sivak 2005)). In figure 13 the spectra are sorted by the ascending weighted radiant power. There seems to be a correlation for the glare rating and the blue-cone signal.

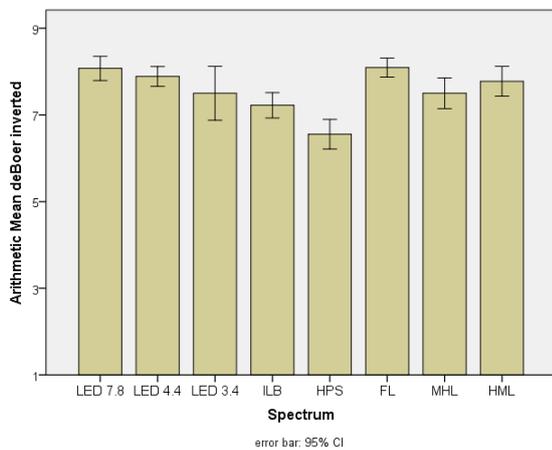


Figure 12: Results arithmetic mean de Boer glare rating inverted for the broadband spectra

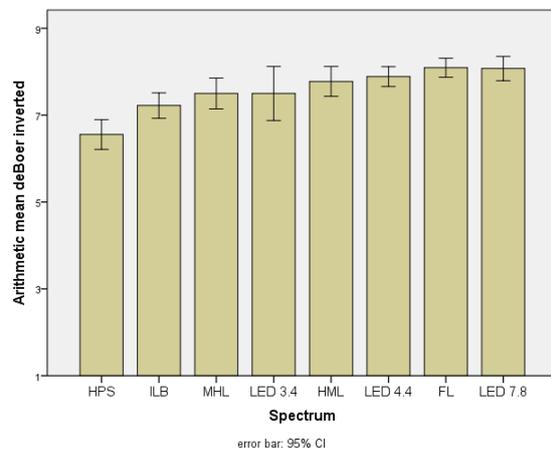


Figure 13: Results arithmetic mean de Boer glare rating sorted by weighted radiant power

Table 5: Radiant power weighted by the blue cone sensitivity curve with the arithmetic mean of de Boer glare rating

	HPS	ILB	MHL	LED 3.4	HML	LED 4.4	FL	LED 7.8
Signal blue-cone	38	119	218	284	330	348	474	571
AM de Boer	6,6	7,2	7,5	7,5	7,8	7,9	8,1	8,1

The analysis of this correlation is shown in figure 14. On the abscissa the spectra sorted by the blue-cone signal are shown (cf. table 5). The ordinate represents the arithmetic mean of the glare rating. As shown in the diagram we found a strong logarithmic relationship, with the radiance weighted by the blue-cone sensitivity curve accounting for 96.8% of the variance in discomfort glare.

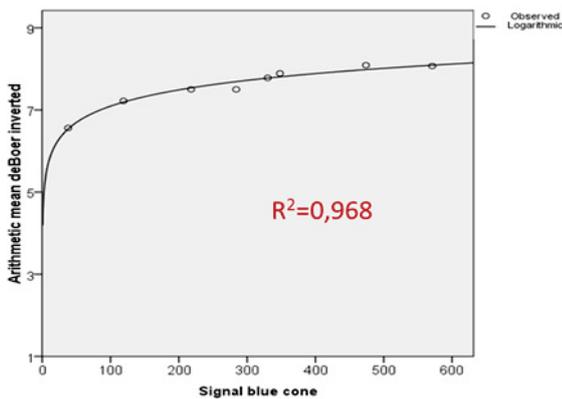


Figure 14: Correlation for the weighted radiant power and the arithmetic mean of inverted de Boer glare rating

This high correlation is similar to the findings from Sivak (Sivak 2005). Nonetheless, it is expected that SPD of the background-luminance (LED vs. HSP) and the adaptation-level (0.05 cd/m² vs. 1.00 cd/m²) has an influence on the glare rating (Sweater 2012). To verify this, further research is necessary.

4 Conclusion / Outlook

For the same illuminance at the subject's eye an increasing glare rating for broadband spectra with higher blue content was found. There was no influence of SPD on the threshold contrast when the glare illuminance was held constant. A high correlation for the discomfort glare rating and the radiant power weighted by the blue cone sensitivity curve was found.

A determined glare sensitivity found in this research needs to be confirmed under different conditions. The results have to be compared with previous research to find differences and similarities.

Presently a study to investigate the influence of the homogeneity of the illuminating surface on glare perception is in preparation at the Technical University of Berlin.

5 References

- Bodrogi, P., Wolf, N., Khanh, T.Q. 2011. Spectral sensitivity and additivity of discomfort glare under street and automotive lighting conditions. Proceedings of the CIE 27th Session Sun City / South Africa. CIE
- Bullough, J. D., Fu, Z., Van Derlofske, J. 2002. Discomfort and disability glare from halogen and HID headlamp systems. SAE Technical paper series 2002-01-0010. Michigan
- Bullough, J. D. 2003. Predicting discomfort glare from outdoor lighting installations. Lighting Res. Technol. 2008. 40. 225-242
- Bullough J. D. 2009. Spectral sensitivity for extrafoveal discomfort glare. Journal of Modern Optics 2009. Vol. 56. 1518-1522
- CIE 1976. CIE 31:1976. Glare and uniformity in road lighting installations. Paris: CIE
- CIE 2002. CIE 146:2002. CIE Collection on Glare. Vienna: CIE
- De Boer, J. B. 1955. Observations on discomfort glare in street lighting; influence of the colours of light. 13. CIE congress Zürich. CIE

DIN EN 2003. DIN EN 13201. Straßenbeleuchtung. Berlin: DIN

Fekete, J., Sik-Lanyi, C., Schanda, J. 2010. Spectral discomfort glare sensitivity investigations. *Ophthalmic and physiological optics* 2010 30. 182-187

Niedling, M., Völker, S. 2013. Abstracts. 8. LiTG Tagung Stadt- und Außenbeleuchtung. Weimar 2013. LiTG

Sivak, M., Schoettle, B., Minoda, T., Flannagan, M. J. 2005. Blue content of LED-headlamps and discomfort glare. Report No. UMTRI-2005-2. University of Michigan

Sweater Hickcox, K., Narendran, N., Bullough, J. D., Frey, J.P. 2012. Effect of different coloured luminous surrounds on LED discomfort glare perception. *Lighting Res. Technol.* 2012; 0. 1-12

Trilux GmbH & Co. KG 2009. *Beleuchtungspraxis Außenbeleuchtung*. 1. Auflage 2009. Germany. Arnsberg: Trilux

Vos, J. J. 2002. Reflections on glare. *Lighting Res. Technol.* 2003. 35. 163-176

Spectral power distribution and glare

Mathias Niedling, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

Proc. LUX Europa 2013, S. 281-286

Abstract

This article discusses the influence of light source spectral power distribution (SPD) on discomfort and disability glare under different mesopic conditions. There have been several investigations related to this issue but the results are inconclusive. The present study had the objective to investigate SPD-effects on discomfort glare from outdoor lighting installations. In an experimental setup narrow band stimuli were presented to examine the influence of different spectral ranges on discomfort glare under different spectral ambient conditions. Furthermore simulated spectra of (actual) light sources were tested to affirm the results. In order to verify the influence of the adaptation luminances on glare perception different ambient-levels for the background were used in the examination additionally.

Keywords: Discomfort glare, Disability glare, Spectral power distribution, Experimental Design

1 Introduction

In the EU glare from street lighting is evaluated by calculating the Threshold Increment TI (equation 1, (DIN EN 2003)). This method for evaluation of disability glare is based on an equivalent veiling luminance (L_v) resulting from the illuminance at the subjects eye caused by the luminaires (E_{gl}). This value can be calculated easily using the luminous intensity from the luminaire's luminous intensity distribution diagram.

$$TI = 65 * \frac{L_v}{L_b^{0.8}} \quad \text{with} \quad L_v = k * \frac{E_{gl}}{\Theta^2} \quad (1)$$

where

L_b is the luminance of the background

L_v is the veiling luminance;

E_{gl} is the illuminance at the subject's eye caused by the luminaire

Θ is the angle between the line of sight and the glare source

k is an age dependent factor

The TI describes the percentage increase in the threshold luminance due to the addition of glare sources. It was not developed to evaluate discomfort glare from street lighting. And

this may cause problems in the transition from conventional street lighting to the new LED-technology. Considering that the luminous intensity and the resultant illuminance at the eye do not provide any information about the luminous surface (inhomogeneity, maximum and average luminance) this needs to be taken into account for the glare evaluation. Due to the small size and the high luminance of LED's the glare rating will increase visibly. This topic is part of a PhD study at the Technical University of Berlin but is discussed elsewhere (Völker et al. 2013).

Furthermore the illuminance at the eye gives no information about the SPD of a light source, which influences glare perception as well. Previous research (Sivak et al. 2005), (Bullough et al. 2002) showed a greater discomfort glare rating for headlamps with higher blue content (HID, LED) compared to halogen headlamps. In the course of this, several investigations tried to establish a glare sensitivity curve to minimize discomfort glare (Fekete et al. 2010), (Bodrogi et al. 2011), (Bullough et al. 2009). Unfortunately the results are inconclusive and show different curves. Different experimental designs could be the cause for that. To that, it cannot be assumed that sensitivity curve set up for headlamps can be applied in other outdoor lighting applications. Resulting, there remains a need to investigate this topic under street lighting conditions.

Due to this an experiment was carried out at the Technical University of Berlin (Niedling et al. 2013). This research had the objective to investigate the influence of light source spectral power distribution (SPD) on discomfort and disability glare under street lighting conditions. Different narrow band stimuli with equal radiance were presented to examine the influence of different spectral ranges on glare perception. It has been suggested that due to the LEDs' high luminances the luminance-signal is generated by the cones. This would mean the glare rating follows relatively well the $V(\lambda)$ -curve (cf. Flannagan et al. 1994). It was assumed that if there is another dimension for the glare rating in effect (Fekete *ibid.*), (Bodrogi *ibid.*), (Bullough *ibid.*), the results would represent the deviation from the luminance of the stimuli. Furthermore eight simulated spectra of actual light sources with a luminance of 500,000 cd/m^2 were tested to affirm the results for the narrow band stimuli. The background luminance in the experiment was realized with a LED-tube with 3,400 K. The method was similar to the setup shown below. The results of this research are shown in figure 1 and 2.

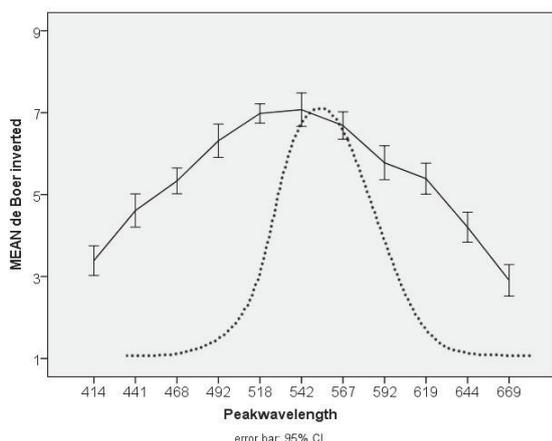


Figure 1: de Boer glare rating inverted for narrow band stimuli (FWHM=25nm) with different peakwavelength & equal radiance

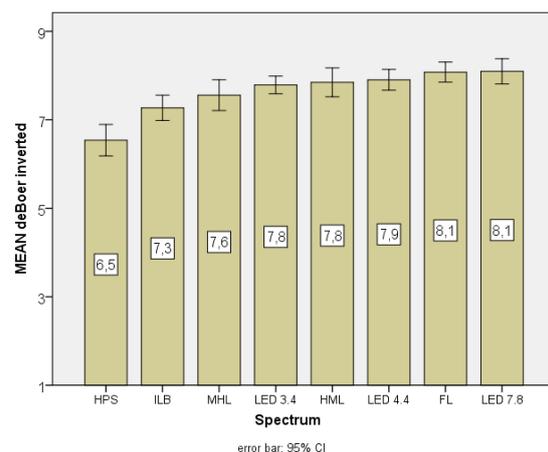


Figure 2: de Boer glare rating inverted for different spectra with equal luminance (illuminance at the eye=5 lx)

Figure 1 shows the de Boer glare rating for the narrow band stimuli. Please note that the results of the glare rating follow an inverted de Boer scale. In the diagrams the $V(\lambda)$ curve is

drawn in. As presented in the diagram above, the discomfort glare rating showed an influence of SPD. The maximum of the detected curve shifts into the direction of shorter wavelengths compared to $V(\lambda)$. Also the shape of the curve shows another trend for the short-wavelength radiance compared to the photopic curve. The short-wavelength radiance seems to be more disturbing than the long-wave. The results for the simulated spectra are shown in figure 2. For the discomfort glare rating again there was a significant influence of the SPD. In the diagram the presented broadband spectra (x-axis) are sorted by the radiant power weighted by the blue cone sensitivity curve and integrated over the wavelength, which means they are sorted by the signal for the blue cone from each spectrum. Light sources with higher blue content increase the glare rating.

The data reported there indicate a connection of the short-wavelength radiance of a glare sources SPD and the discomfort glare rating. Therefore an analysis was performed. In figure 3 you can see the comparison of weighted spectra (see above) with the de Boer glare rating. A strong logarithmic relationship with a $R^2=0.99$ was found. This high correlation is similar to the findings from Sivak (Sivak *ibid.*)

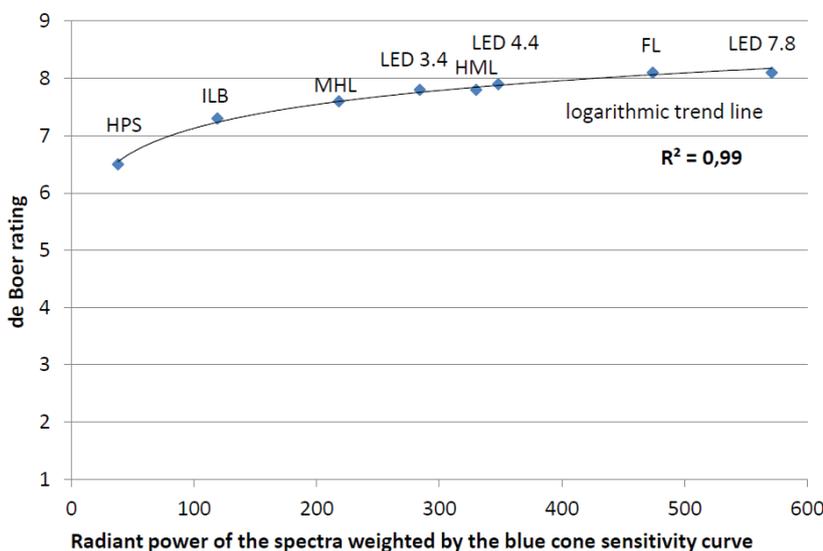


Figure 3: Correlation for the weighted radiant power by the blue cone sensitivity curve and the de Boer glare rating inverted

In this research no influence of SPD of broadband stimuli on disability glare could be detected. However, for the presented narrow band stimuli a significant influence on the threshold contrast was found. It is possible that due to the high luminances of the spectra an effect on the disability glare was partly overlapped.

Due to the different findings of previous research (see above) and the lacking knowledge with respect to the applicability of the results for different ambient conditions a follow-up study is in preparation at the Technical University of Berlin.

Because of an expected effect of the SPD of the background-luminance (Sweater 2012) the results shown above needs to be confirmed under different conditions. Therefore in this study the background luminance is realized with a HPS lamp additionally. Four of the spectra (with a luminance of $500,000 \text{ cd/m}^2$) and six of the narrow band stimuli shown in the research above will be presented to the subjects (see tab. 1, column 1). It is assumed that if there is an influence of the SPD of the background luminance on the glare sensitivity curve and the glare rating of the actual spectra, the results will represent the deviation the previous research. To control possible deviations of this follow-up study from the experiment

presented above the selected stimuli will be repeated under the same conditions as in the first study (tab. 1, column 3).

Furthermore the influence of different luminances (thus also different illuminances at the subject's eye) of the glare source will be examined in this follow-up study. To confirm the determined correlation for the weighted radiant power and the glare rating (see above) the four spectra (see tab 1) will be presented a second time with a luminance of 100,000 cd/m² (tab. 1, column 1 & 3).

Additionally the influence of the adaptation-level on glare perception will be investigated. Due to differences in real road scenes (e.g. city vs. suburb) there remains a need to confirm the findings from under different mesopic conditions. Therefore the actual spectra with a luminance of 100,000 cd/m² will be presented with an ambient level of 1 cd/m² with both ambient spectra (HPS & LED 3,400 K) as well. This enables a comparison of the results of the glare rating between different adaptation levels and different spectra (tab. 1, column 2 & 4). Table 1 shows all presented stimuli of this study.

Table 1: Presented stimuli

		HPS - 0,05 cd/m ²	HPS - 1 cd/m ²	LED 3,4K - 0,05 cd/m ²	LED 3,4K - 1 cd/m ²
L=500,000 cd/m²	LED 7,800 K	x		x	
	LED 3,400 K	x		x	
	HPS	x		x	
	HML	x		x	
L=100,000 cd/m²	LED 7,800 K	x	x	x	x
	LED 3,400 K	x	x	x	x
	HPS	x	x	x	x
	HML	x	x	x	x
Peak- Wavelength	414 nm	x		x	
	468 nm	x		x	
	542 nm	x		x	
	567 nm	x		x	
	619 nm	x		x	
	669 nm	x		x	

2 Method

2.1 Experimental Setup

Pictures of the experimental setup and the subjects view are shown in figures 4, 5 and 6. The subjects were sitting in front of a half integrating sphere with a radius of 0.75 m (fig. 4). The subjects view was fixed with a chin rest. The background luminance in the setup was realized with a flexible LED-tube (3,400 K, see above) and a HPS-lamp, coupled into the half sphere with a sphere diffuser (fig. 6) and an iris to adjust the background luminance. Over all four ambient conditions were presented to the subjects (cf. tab. 1). The glare source was presented at an angle of 4° above the line of sight out of a light guide with a diameter

of 3 mm (fig. 5, cf. Niedling *ibid.*). The spectral freely adjustable light source OL490², which offers the potential to produce user defined spectra, was used to realise the glare source with the predefined spectral distribution. The test character was shown on a LCD-monitor behind the sphere with ascending grey scale. To reduce the guess probability and the variance, Landolt's ring with an opening of 5 mm (visual angle 0,38°) were used as test characters.



Figure 4: Experimental setup

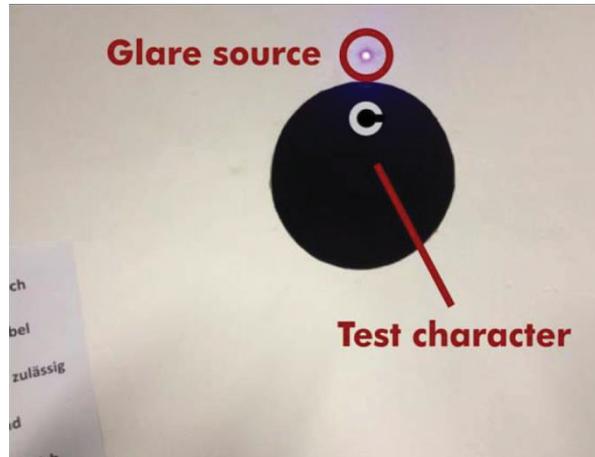


Figure 5: Subjects view

2.2 Task

The subjects task was to detect the test character (disability glare) and to rate the discomfort glare on the de Boer scale. To make the glare rating more intuitive for non-experts the de Boer scale was inverted (1=not noticeable, 9=unbearable). A copy of the used glare rating scale was fixed in the half sphere (see fig. 5) to refer to throughout the session as needed. The detected grey scale of the Landolt's ring is used as level for threshold contrast.



Figure 6: Illumination of the half sphere with a HPS lamp through a diffuser

2.3 Stimuli

The presented stimuli are shown in table 1. To confirm the glare sensitivity curve found in (Niedling *ibid.*) six grid points of the examined narrow band stimuli (FWHM=25 nm) with equal radiance (fig. 7) were shown to the subjects. The luminance in kilocandela, the

²<http://goochandhousego.com/products/life-science-instrumentation/spectral-imaging-synthesis/ol-490-agile-light-source>, 27.02.2013

illuminance at the subject's eye and the peak-wavelength of each stimulus is shown in table 2. This table shows that the photometric values for these stimuli follow the $V(\lambda)$ curve.

The four simulated spectra of different light sources were subdivided into two groups with different luminances (see tab. 1). These stimuli caused the same illuminance at the subject's eye.

Table 2: Photometric values for the narrow band stimuli

Peak [nm]	414	468	542	567	669
L [kcd/m ²]	6.8	47.3	500	500	28.6
E _{eye}	0.06	0.4	5	5	0.3

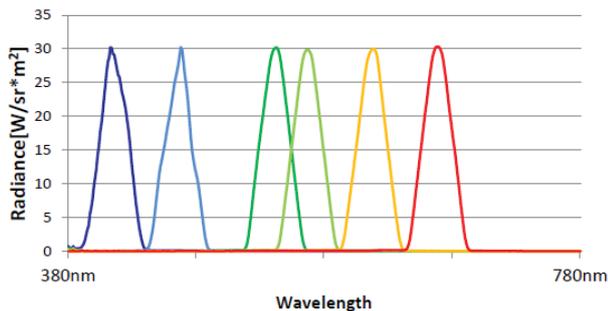


Figure 7: narrow band stimuli with equal radiance

2.4 Subjects

30 subjects aged from 20-35 took part in this study to make the results comparable with (Niedling *ibid.*).

2.5 Procedure

Before starting, the subjects had to pass an eye test in the black room for about 6 minutes. After this they were asked to put their chin in the chin rest. The subjects were instructed to look on the fixation point which was the point of presentation of the test character at the same time. The instruction and 4 trial runs guaranteed another 5 minutes for adaptation. The stimuli were presented in randomised order (each stimulus twice in every ambient condition). At the same time with the stimulus the test character was faded in with ascending grey scale. When the Landolt's ring opening was detected, the subjects had to push a button held in their hands to turn off the glare source and to fade out the test character. Subsequently they had to state the direction of the opening and rate the discomfort glare on the de Boer scale. There was a break of 40 sec between the stimuli. In a pre-test higher and lower times between the stimuli were tested. There was no influence on the glare perception, so a mean time was chosen for the experiment procedure. Between the ambient conditions there was a break for 3 min for adaptation. The total duration of the test was approximately 1 hour.

3 Results

At the time of submission the paper the study was currently in process. The results will be presented at the conference.

4 References

- Bodrogi, P., Wolf, N., Khanh, T.Q. 2011. Spectral sensitivity and additivity of discomfort glare under street and automotive lighting conditions. Proceedings of the CIE 27th Session Sun City / South Africa. CIE
- Bullough J. D. 2009. Spectral sensitivity for extrafoveal discomfort glare. Journal of Modern Optics 2009. Vol. 56. 1518-1522
- Bullough, J. D., Fu, Z., Van Derlofske, J. 2002. Discomfort and disability glare from halogen and HID headlamp systems. SAE Technical paper series 2002-01-0010. Michigan
- DIN EN 2003. DIN EN 13201. Straßenbeleuchtung. Berlin: DIN
- Fekete, J., Sik-Lanyi, C., Schanda, J. 2010. Spectral discomfort glare sensitivity investigations. Ophthalmic and physiological optics 2010 30. 182-187
- Flannagan, M. J., Sivak, M., Traube, E. C., Discomofrt glare and brightness as functions of wavelength. Report No. UMTRI-94-29. University of Michigan
- Niedling, M., Kierdorf, D., Völker, S. 2013. Influence of a glare sources spectrum on discomfort and disability glare under mesopic conditions. CIE-Proceedings
- Sivak, M., Schoettle, B., Minoda, T., Flannagan, M. J. 2005. Blue content of LED-headlamps and discomfort glare. Report No. UMTRI-2005-2. University of Michigan
- Sweater Hickcox, K., Narendran, N., Bullough, J. D., Freyisinier, J.P. 2012. Effect of different coloured luminous surrounds on LED discomfort glare perception. Lighting Res. Technol. 2012; 0. 1-12
- Völker, S., Niedling, M., 2013. Abstracts. 8. LiTG Tagung Stadt- und Außenbeleuchtung. Weimar 2013. LiTG

Erhöhte Blendung durch LED-Straßenleuchten – Mythos oder Realität?

*Mathias Niedling, Stephan Völker, Martine Knoop
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik*

LiTG-Tagung Stadt- und Außenbeleuchtung 2014, Weimar

Abstract

Im Zuge der Umrüstung ortsfester Straßenbeleuchtung auf die LED-Technik ist die Frage nach der Bewertung der Blendung bis dato nicht hinreichend geklärt. Ob und inwieweit die bauartbedingte Zerlegung der Lichtaustrittsfläche in kleine Lichtpunkte mit sehr hoher Leuchtdichte hierbei berücksichtigt werden muss, soll in dieser Arbeit diskutiert werden. Bisher durchgeführten Studien zu diesem Thema [1], [2] zeigen einen negativen Einfluss inhomogener Flächen mit höherer Leuchtdichte auf die psychologische Blendung. In beiden Studien wurde feste Geometrien (Darbietungswinkel der Blendquelle, Abstand der LEDs in der Blendquelle) verwendet. Im Anwendungsfall der Straßenbeleuchtung ist dies jedoch ein unrealistisches Szenario. Bewegt sich ein Verkehrsteilnehmer auf einer Straße, so wandert die Leuchte mit sicher verringerndem Abstand zwischen Beobachter und Leuchte zum einen in die Peripherie des Beobachters (größer werdender Winkel zwischen Blendquelle und Sichtachse). Zum anderen verändert sich der Öffnungswinkel Leuchte und damit wahrgenommene Abstand der LEDs in der Leuchte. Es stellt sich die Frage, ob einzelne LEDs´ in einer Straßenleuchte bei verschiedenen Entfernungen zwischen beiden Objekten, und somit verschiedenen Winkel der Blendquelle zum Betrachter, überhaupt als getrennte Lichtpunkte wahrgenommen werden können, oder die projizierte Fläche der Leuchte in der Peripherie als eine leuchtende Fläche erscheint.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Forschungsfrage, welche Abstände von Lichtpunkten das Auge noch als getrennt voneinander wahrnehmen kann (Grenzauflösung). Dabei werden verschiedene Leuchtdichten der Lichtpunkte und unterschiedliche Positionen der Darbietung berücksichtigt. Weiterhin wird der Frage nachgegangen, wie homogene und inhomogene Leuchtdichtestrukturen innerhalb dieser Grenzauflösung bewertet werden. Dazu werden verschiedene leuchtende Flächen simuliert und von Probanden bewertet. Die Untersuchung findet unter Laborbedingungen am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Berlin statt. Die Ergebnisse liefern einen wichtigen Beitrag zur Blendungsbewertung von LED-Straßenleuchten.

Literatur

- [1] Tashiro, T., Kimura-Minoda, T., Khoko, S., Ishikawa, T., Ayama, M. 2011. Discomfort glare evaluation to white LEDs with different spatial arrangement. CIE 27th Session, Sun City / South Africa
- [2] Lee, C-M., Kim, H., Choi, D-S. 2007, A study on the estimation of discomfort glare for LED-luminaires. CIE 26th Session, Beijing / China

Untersuchungen zur Erweiterung des UGR-Blendungsbewertungsverfahrens für strukturierte LED-Leuchten

*Carsten Funke, Christoph Schierz
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik*

Tagung LICHT 2014, Den Haag, Tagungsband

Abstract

In der Innenbeleuchtung hat sich das Unified Glare Rating Verfahren (UGR-Verfahren) zur Bewertung der psychologischen Blendung durchgesetzt. Es wurde für Blendquellen entwickelt, die einen Raumwinkel zwischen 0,0003 und 0,1 sr einnehmen [1]. Da sich LED-Lichtpunkte meist unterhalb dieses Größenbereichs befinden, können Leuchten mit direktstrahlenden LED nicht mit dem UGR-Verfahren bewertet werden. Obwohl die CIE-Schrift 147 [2] eine Erweiterung des UGR-Verfahrens für kleine und komplexe Lichtquellen einführt, zeigen zahlreiche Untersuchungen [3; 4; 5] Widersprüche bei der Blendungsbewertung von LED-Leuchten.

Im Rahmen von psychometrischen Untersuchungen im Sommer 2014 sollte ermittelt werden, inwiefern Leuchtdichteunterschiede innerhalb der Blendquelle einen Einfluss auf die Blendungsbewertung bei psychologischer Direktblendung haben. Dafür wurde ein Versuchsraum mit einer veränderbaren Testleuchte ausgestattet, mit der folgende Parameter verändert werden können:

- Leuchtdichte und Lichtstrom der sichtbaren LED
- Anzahl der sichtbaren LED
- Abstand der sichtbaren LED
- Leuchtdichte der homogen leuchtenden unmittelbaren Umgebung
- Größe der homogen leuchtenden unmittelbaren Umgebung

Die Ergebnisse der Untersuchung werden auf der Tagung im Rahmen der Präsentation vorgestellt.

Schlagwörter: UGR, psychologische Blendung, Blendungsbewertung, LED-Leuchten

1 Untersuchungsmethode

Zur Variation der oben genannten Parameter wurde eine Blendquellenanordnung gewählt, welche an die von EBERBACH [6] für den mesopischen Bereich durchgeführte Untersuchung angelehnt ist (vgl. Abb. 1). Die dargestellten Leuchtdichtestrukturen wurden mit einer 60 x 60 cm großen LED-Leuchte realisiert, welche am Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau für diesen Test entwickelt wurde. Sowohl die „dunkleren“ als auch die „hellen“ Bereiche der Leuchte lassen sich in der Leuchtdichte variieren.

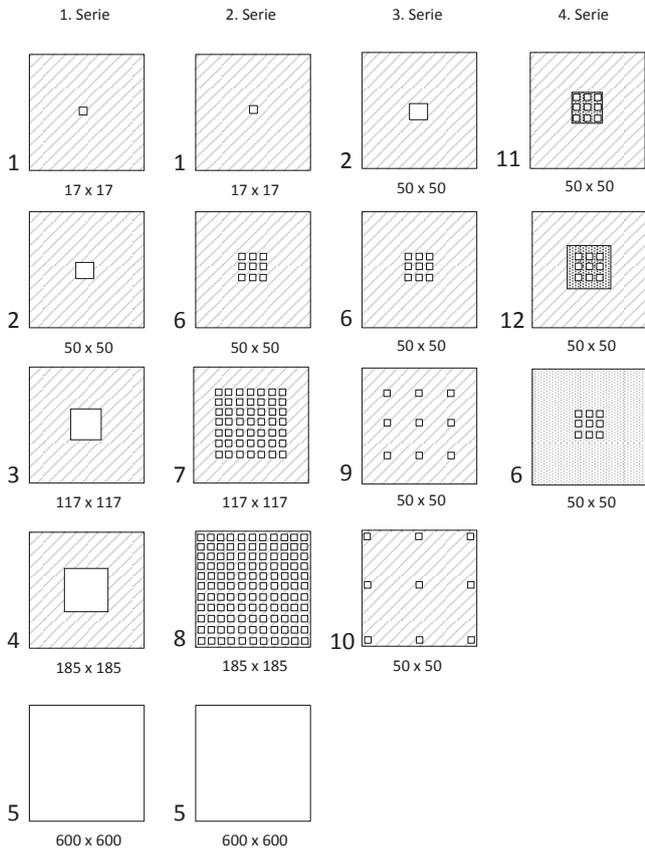


Abbildung 1: Leuchtdichtestrukturen der Blendquelle in vier Serien geordnet. Die schraffierten und gepunkteten Bereiche kennzeichnen die „dunkleren“ Bereiche, die weißen die „hellen“ Bereiche der Blendquelle. Alle Maße in Millimeter.

Durch Vergleich der Serien 1 und 2 lässt sich die Summation von LED-Lichtquellen auf die Blendung überprüfen. Dabei stellt Struktur Nummer 5 die homogen leuchtende Standardblendquelle dar. Ein Vergleich innerhalb der 3. Serie ermöglicht Aussagen über den Abstand der LED innerhalb einer Leuchte. Mithilfe der 4. Serie soll die Größe und Leuchtdichte der unmittelbaren Umgebung bei LED-Lichtquellen untersucht werden. Als Bewertungsmethode für die psychologische Blendung wurde die im Innenraum übliche siebenstufige Blendungsskala gewählt (0 = keine Blendung wahrnehmbar ... 6 = Blendung unerträglich).

Forschungshypothesen:

- Die von einer Leuchte ausgehende Blendung steigt mit zunehmendem Leuchtdichtekontrast innerhalb der Leuchte.
- Bei gleicher mittlerer Leuchtdichte weisen Leuchten mit großem Lichtquellen-abstand mehr Blendung auf.
- Die Gesamtblendzahl der Leuchte ist größer als die Summe der Einzelblendzahlen der Teilleuchten.

2 Untersuchungsaufbau und -ablauf

Die Untersuchungen wurden in einem büroähnlichen Untersuchungsraum (insgesamt 6,6 m x 3,5 m, Höhe 2,8 m) durchgeführt (s. Abb. 2 und 3). Abgesehen von der Blendquelle, welche in die abgehängte Decke eingehängt wurde, wurden insgesamt neun nicht sichtbare Ambientleuchten installiert, um die Adaptationsleuchtdichte während der Versuche einzustellen. Alle Leuchten haben eine ähnlichste Farbtemperatur zwischen 4000 K und 4500 K. Der Wände des Raums sind farbneutral ausgestattet. Die Ambientleuchten wurden mit DALI gedimmt und die Blendquelle mit Pulsweitenmodulation (14 bit, PWM-Frequenz 750 Hz). Für alle 12 Strukturen der Blendquelle wurden jeweils die „hellen“ und die „dunklen“ Bereiche mit verschiedenen Leuchtdichten kombiniert (vgl. Tab. 1), sodass insgesamt 71 Beleuchtungskonfigurationen entstanden.

Tabelle 1: Auflistung der Parameterwerte. L_s Leuchtdichte des hellen Bereichs; ω_s Raumwinkel des hellen Bereichs; φ_{LED} Abstand der sichtbaren LED innerhalb der Leuchte (bei Struktur 6, 9 und 10); L_d Leuchtdichte des dunklen Bereichs.

Leuchtdichte L_s (cd/m^2)	Raumwinkel ω_s (sr)	Abstand φ_{LED} (°)	Leuchtdichte L_d (cd/m^2)
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

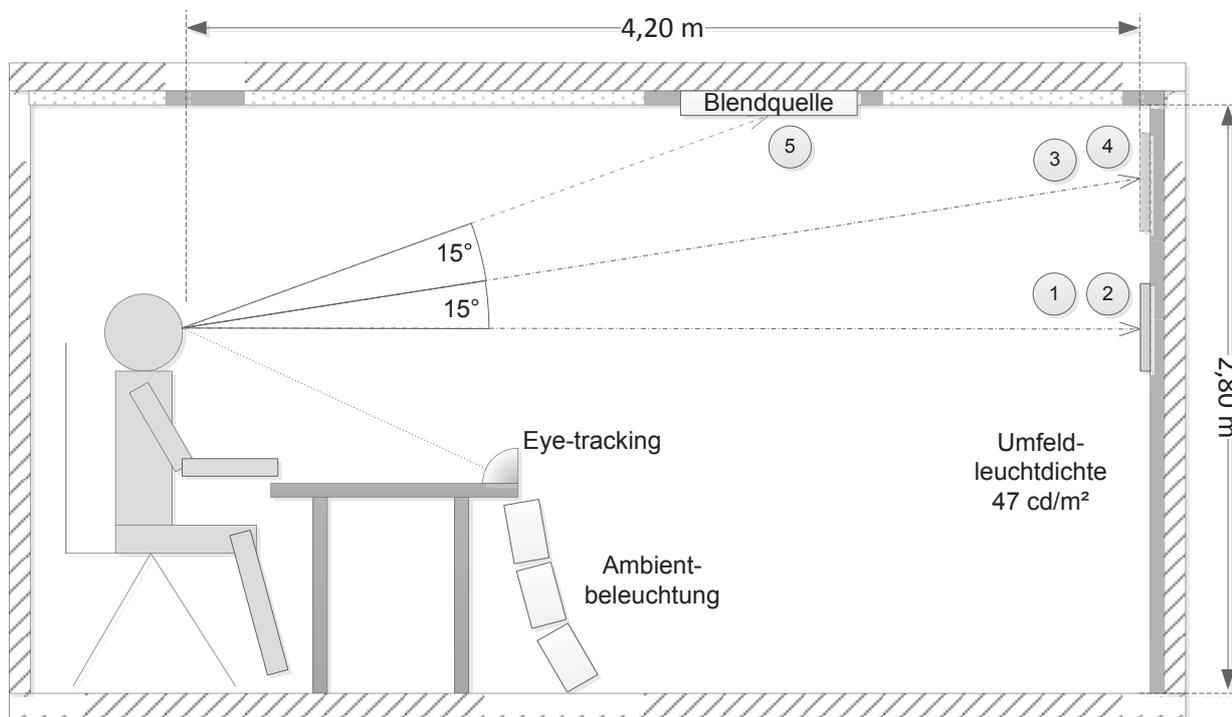


Abbildung 2: Position des Probanden im Untersuchungsraum. Die Zahlen 1 bis 5 symbolisieren die Aufgabennummern bei den einzelnen Blickrichtungen.

Alle 71 Konfigurationen wurden bei fünf verschiedenen Aufgaben blockweise dargeboten, d. h. die nächste Aufgabe wird erst durchgeführt, wenn alle 71 Beleuchtungssituationen für eine Aufgabe erledigt wurden (vgl. Aufgabennummern in Abb. 2). Als Hauptaufgabe

während der Untersuchung wurde ein Konzentrations-Leistungs-Test (KLT) mit Schwierigkeitsstufe C ausgewählt. Das Lösen von KLT-Aufgaben erfordert nach Brickenkamp [7, 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. Neben dem visuellen KLT wurde auch ein auditiver KLT durchgeführt, der im weitesten Sinne ein Telefongespräch simulieren soll. 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 einem letzten Aufgabenblock sollte der Proband kurz in die Blendquelle schauen und sein Blendurteil für diese Situation abgeben. Nachfolgend eine Übersicht der Aufgabenblöcke:

- Aufgabe 1: KLT visuell, $\theta_{\text{Leuchte}} = 30^\circ$, Darbietungszeit: 15s
- Aufgabe 2: KLT, auditiv, freier Blick, Darbietungszeit: 15s
- Aufgabe 3: KLT visuell, $\theta_{\text{Leuchte}} = 15^\circ$, Darbietungszeit: 15s
- Aufgabe 4: Punkt auf Monitor beobachten, $\theta_{\text{Leuchte}} = 15^\circ$, Darbietungszeit: 7s
- Aufgabe 5: kurzer Blick in die Leuchte, $\theta_{\text{Leuchte}} = 0^\circ$, Darbietungszeit: 7s

Die fünf Aufgabenblöcke wurden an zwei Untersuchungsterminen à 90 Minuten mit Zwischenpausen durchgeführt. Alle Probanden hatten einen Visus von mindestens 0,6 für die Entfernungen 0,5 m und 4,2 m. Es wurden insgesamt 30 Probanden (13 Frauen, 17 Männer) untersucht, davon sind 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).

Während der gesamten Untersuchung wurden die Blickbewegungen von einem Eyetracker mit Stereo-Kamerasystem aufgezeichnet (s. Abb. 3). Aufgrund des Eyetrackers konnten keine Brillenträger für die Untersuchung herangezogen werden. Acht Personen trugen Kontaktlinsen während der Untersuchung.



Abbildung 3: Probandin während Aufgabe 1. Die Probanden rechnen zunächst die beiden Zeilenergebnisse aus und subtrahieren anschließend das kleinere vom größeren Ergebnis. Oben im Bild ist die Blendquelle auf eine homogene Leuchtdichte von 8000 cd/m^2 eingestellt.

3 Ergebnisse

Zum Zeitpunkt der Abgabe des Papers lagen die Ergebnisse noch nicht vor. Diese werden auf der Tagung vorgestellt.

4 Literatur

- [1] Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.) (2003): Das UGR-Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen. Berlin: Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LiTG-Publikation 20).
- [2] International Commission on Illumination (Hrsg.) (2002): CIE collection on glare. 2002. Vienna: CIE Central Bureau (Technical report no. 146, 147).
- [3] Kasahara, Tappei et al. (2006): Discomfort Glare Caused by White LED Light Sources. *Journal of Light and Visual Environment* 30 (2), S. 49–57.
- [4] Lee, Chang-Mo; Kim, Hoon; Choi, Dai-Seub (2007): A Study on the Estimation of Discomfort Glare for LED Luminaires. CIE (Hrsg.): Proceedings of the 26th CIE Congress 2007. Proceedings of the 26th CIE Congress 2007. Beijing, China, 04. bis 07. Juli 2007. CIE, S. D3-33 - D3-36.
- [5] Hara, Naoya; Hasegawa, Sanae (2012): Study on Discomfort Glare Rating on the Luminaire with LED Array. *Journal of Illuminating Engineering Institute Japan* 96 (2), S. 81–88.
- [6] Eberbach, Klaus (1974): Der Einfluss der Leuchtdichtestruktur von Lichtquellen auf die Blendempfindung. *Lichttechnik* 6, S. 283–286.
- [7] Brickenkamp, Rolf; Brähler, Elmar; Holling, Heinz (2002): Brickenkamp Handbuch psychologischer und pädagogischer Tests, 2 Bde., Bd.1. 3. Aufl. s.l: Hogrefe Verlag. 1415 Seiten.

Lichtfarbenunterschiede auf leuchtenden Flächen

Karin Bieske, Sarah Homberg

Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

Tagung LICHT 2014, Den Haag, Tagungsband

Abstract

Ein einheitliches Erscheinungsbild für die Lichtfarbe innerhalb einer Leuchte und zwischen Leuchten ist mitentscheidend für die Nutzerakzeptanz von LED-Lichtlösungen. Dazu wird seitens der Hersteller eine Klasseneinteilung unter anderem für Lichtfarben weißer Lichtquellen vorgenommen. Dabei wird sich am ANSI-Standard C78-377 orientiert [1]. Da die Praxis gezeigt hat, dass diese Einteilung von annähernd 7-step-MacAdam-Ellipsen zu grob ist, ist eine Unterteilung in Subbin-Cluster üblich (z. B. nach [2], [3]). Zur Bewertung, ob die Vorauswahl anhand einer ANSI/16-Teilung ausreichend genau ist, wurden Untersuchungen zu Lichtfarbenunterschieden an LED-Leuchten durchgeführt, die mit LED der vier zentralen Bins bei einer Referenzlichtfarbe von CCT = 4000 K bestückt sind. 21 Probanden bewerteten die Lichtfarbenunterschiede innerhalb einer Leuchte und zwischen Leuchten. Es wurden Leuchtdichten von $L = 2100 \text{ cd/m}^2$ und $L = 4200 \text{ cd/m}^2$ betrachtet. Weitere Einflussgrößen waren der Beobachtungswinkel und der Leuchtenabstand.

Schlagwörter: Kombination von Lichtfarben, Lichtfarbenunterschiede bei Leuchten

1 Forschungsgegenstand

Leuchtdioden sind Lichtquellen, die im Bereich der Innenbeleuchtung eine immer größere Anwendung finden. Um Leuchten mit ausreichendem Lichtstrom zu fertigen, werden typischerweise mehrere LED in einer Leuchte verbaut. Toleranzen bei der Fertigung, thermische Einflüsse und unterschiedliche Alterungsprozesse können dazu führen, dass Lichtfarbenunterschiede auf der Leuchtenoberfläche innerhalb einer Leuchte und zwischen Leuchten erkennbar sind und von Nutzern zum Teil bemängelt werden. Eine Studie des Light Research Center zeigt, dass bei zufällig ausgewählten weißen LED gleicher Lichtfarbe Farbunterschiede bis 12-step-MacAdam-Ellipsen auftreten können [4]. Diese Unterschiede sind für die meisten lichttechnischen Anwendungen in der Innenbeleuchtung zu groß. Das Binning von LED ist ein Verfahren zur Klasseneinteilung mit dem beim Hersteller gesichert werden soll, dass nur LED mit ähnlichen Lichtfarben innerhalb einer Leuchte verbaut werden und damit störende Farbinhomogenitäten vermieden werden. Dabei wird sich am ANSI-Standard C78-377 orientiert [1]. Da die Praxis gezeigt hat, dass diese Einteilung von etwa 7-step-MacAdam-Ellipsen zu grob ist, ist eine Unterteilung in Subbin-Cluster üblich (z.B.

nach [2], [3]). Die durchgeführte Untersuchung geht der Frage nach, ob die Vorauswahl anhand einer ANSI/16-Teilung ausreichend genau für die Auslegung von Leuchten ist.

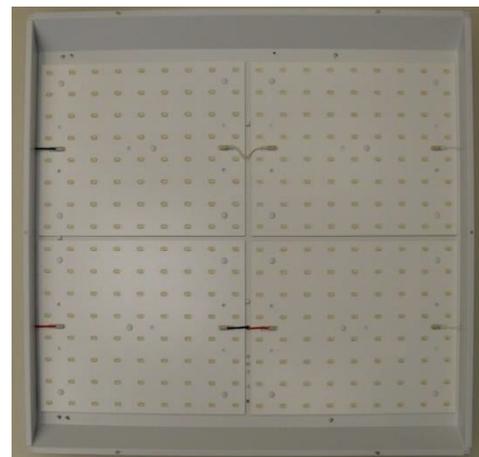
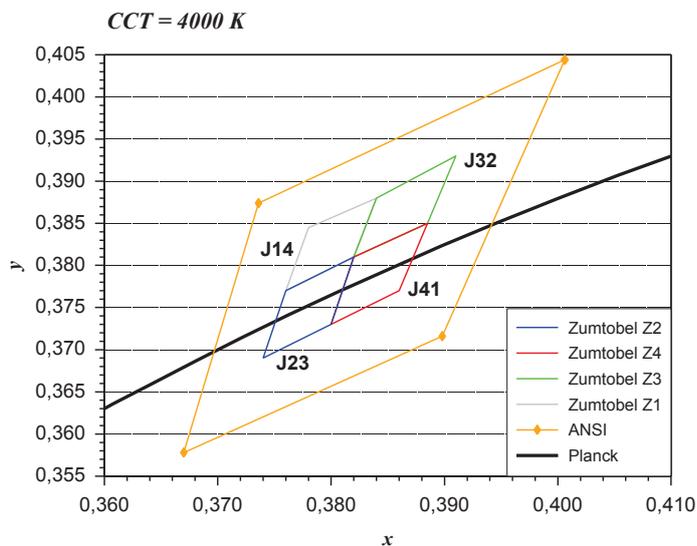
2 Stand der Wissenschaft

Erste Untersuchungen zur Farbunterscheidung von Lichtfarben gehen auf MACADAM zurück und definierten die MacAdam-Ellipsen [5]. Sie sind Basis für die heute üblichen Bewertungen von Farbenunterschieden. Nach NARENDRAN et al. werden 2-step-MacAdam-Ellipsen für Anwendungen empfohlen, bei denen weiße LED sichtbar nebeneinander platziert werden oder zur Beleuchtung achromatischer weißer Szenen dienen [6]. PHILIPS benutzt in seinem Optibin System eine Bingröße von 4-step-MacAdam-Ellipsen und platziert diese möglichst nah am Planckschen Kurvenzug. In Versuchen wurde festgestellt, dass Unterschiede von 1-step-Ellipsen nicht sichtbar sind, 2- bis 4-step-Ellipsen kaum oder gerade erkannt werden und ab einer Größe von 5-step-Ellipsen die Unterschiede deutlich gesehen werden [3]. OPSTELTEN und RINZEMA verwiesen mit ihren Untersuchungen auf den Einfluss der Spektralverteilung der Lichtquellen. Lampen mit verschiedenen Spektralverteilungen werden zwar auf dem gleichen Farbort abgebildet, visuell jedoch nicht gleich wahrgenommen. Daraus können sich Probleme bei der Anwendung von Schwellen- und Toleranzwerten basierend auf den MacAdam-Ellipsen ergeben [7].

3 Methode und Versuchsdesign

Für die Untersuchung wurden 15 Deckeneinbauleuchten der Firma Zumtobel aus der Baureihe Light Fields LED als Prototyp verwendet. Die Leuchten sind modular aufgebaut und bestehen aus je vier Modulen mit je 72 LED. Die Module wurden speziell mit LED bestückt, die aus den Subbins (ANSI/16) J14 (Z1), J23 (Z2), J32 (Z3) und J41 (Z4) stammen. Diese sind die zentralen Subbins bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von CCT = 4000 K (Abbildung 1).

Die Ansteuerung der Module erfolgte mit der DALI X TouchBox der Firma Tridonic, so dass Helligkeitsunterschiede ausgeglichen und Leuchtdichten eingestellt werden können. Für die Lichtmischung wurde eine dreischichtige MPO+ Mikropyramiden-Optik eingesetzt und zusätzlich eine matte diffuse Folie der Firma Konrad Hornschuch AG zur Vermeidung von Glanzeffekten auf die Abschlusscheibe aufgebracht. Abbildung 2 zeigt schematisch die Bestückung und Anordnung der verwendeten Testleuchten in der Rasterdecke. Die Leuchten A1 bis A3 bestehen jeweils aus 3 Modulen des Subbins Z1 und einem Modul, das aus je einen Subbins Z2 bis Z4 stammt. Die anderen Leuchten sind aus jeweils vier baugleichen Modulen der Subbins Z1 bis Z4 aufgebaut. Die Versuche wurden in einem abgetrennten Raumbereich der Größe (4m x 6,6m x 2,85m) durchgeführt, der über weiße Wände verfügt. Einen Eindruck der Versuchssituation vermittelt Abbildung 2 rechts.



Prototypenleuchten (600x600)

Abbildung 1: Verwendete Subbins für die Prototypenleuchte (links) und modularer Aufbau der Prototypenleuchte (rechts)

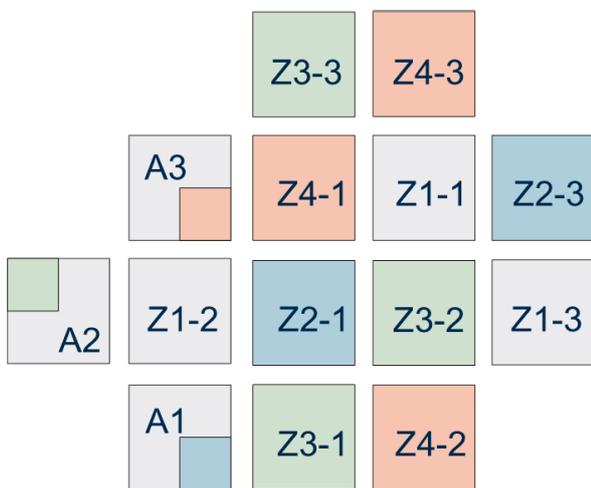


Abbildung 2: Bestückung und Anordnung der Leuchten im Testfeld (links) und Blick auf das Leuchtentestfeld (rechts, oben) und die Beobachterpositionen im Versuchsraum (rechts, unten)

An den Untersuchungen zur Wahrnehmung von Lichtfarbenunterschieden nahmen 21 farbtüchtige Testpersonen (darunter 7 Frauen, Alter 20 bis 54 Jahre, $\bar{\Delta} 29,1 \pm 10$ Jahre) teil. Die Testpersonen beobachteten die Leuchten sowohl unter 0° (senkrechte Beobachtung) als auch unter 60° bezogen auf die Flächennormale der Leuchten. Die Leuchten wurden bei mittleren Leuchtdichten von $L = 2100 \text{ cd/m}^2$ und $L = 4200^\circ \text{ cd/m}^2$ untersucht.

In einem ersten Versuchsdurchgang wurden die Leuchten (A1 bis A3 und Z1-2) einzeln dargeboten, die aus Modulen bestehen, die mit LED unterschiedlicher Subbins bestückt sind. Getestet wurde, ob Lichtfarbenunterschiede innerhalb einer Leuchte erkannt werden können und eine korrekte Benennung der Lage der Platine, die nicht mit LED aus dem Subbin J14 (Z1) bestückt ist, angegeben werden kann. Im zweiten Versuchsdurchgang wurden jeweils nebeneinander liegende Leuchten paarweise in unterschiedlichen Kombinationen bewertet. Anschließend wurden paarweise Leuchtenkombinationen gezeigt, die zwischen den Leuchten einen Abstand von einem Rasterfeld (60 cm) hatten. Die Probanden bewerteten die Lichtfarbenunterschiede zwischen den Leuchten. Die Versuchssituationen wurden randomisiert dargeboten und einige zufällig ausgewählten

Szenen wiederholt getestet. Am Ende der Versuche wurde das gesamte Leuchtenfeld zeitgleich eingeschaltet und untersucht, ob sich Leuchten auffällig von anderen unterscheiden. Dabei hatten die Probanden die Möglichkeit, sich frei im Raum zu bewegen und die Leuchten aus unterschiedlichen Blickpositionen zu betrachten.

Die Farbörter wurden mit dem Spektralradiometer CS-2000 der Firma Minolta und die Farbortverteilung sowie die mittlere Leuchte mit der LMK color der Firma TechnoTeam bestimmt [8], [9]. Auf Basis der Messwerte erfolgte die Bestimmung der Ansteuerwerte für die einzelnen Leuchten für gleiche mittlere Leuchtdichten sowie die Berechnung des Lichtfarbenunterschieds $\Delta u'v'$ zwischen Leuchtenkombinationen nach Gleichung (1):

$$(1) \quad \Delta u'v' = \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2}$$

Tabelle 1 fasst die ermittelten Lichtfarbenunterschiede $\Delta u'v'$ für unterschiedliche Leuchtenkombinationen zusammen.

Tabelle 1: Lichtfarbenunterschiede $\Delta u'v'$ für benachbarte Leuchten und innerhalb von Leuchten bei senkrechter Beobachtung (Bezeichnung nach Abbildung 3)

$\Delta u'v'$	4200 cd/m ²	2100 cd/m ²	$\Delta u'v'$	4200 cd/m ²	2100 cd/m ²
Z1-1 / Z2-3	0,0033	0,0041	Z3-2 / Z4-2	0,0023	0,0022
Z1-1 / Z3-2	0,0016	0,0017	Z3-1 / Z4-1	0,003	0,0029
Z1-1 / Z4-1	0,003	0,0032	A1 (Z1 / Z2)	0,0020	0,0028
Z2-1 / Z3-2	0,0023	0,0029	A2 (Z1 / Z3)	0,0012	0,0013
Z2-1 / Z4-1	0,0007	0,0007	A3 (Z1 / Z4)	0,0025	0,0025

Die Bewertung der Lichtfarbenunterschiede nahmen die Testpersonen anhand der Bewertungsskale nach Abbildung 3 vor.

0	1	2	3	4
kein Unterschied	gerade erkannt	deutlich gesehen	zunehmend störend	störend

Abbildung 3: Bewertungsskale für die Beurteilung der Lichtfarbenunterschiede innerhalb und zwischen Leuchten

Ein Proband wiederholte die Versuche an verschiedenen Tagen, sodass eine Abschätzung der Reproduzierbarkeit der Bewertungsergebnisse möglich ist. Die maximale Abweichung zwischen Bewertungen identischer Versuchssituationen beträgt 1. Im Mittel können Bewertungen auf $\pm 0,1$ Skaleneinheiten reproduziert werden. Die wurde auch für die Auswertung der wiederholt dargebotenen Versuchssituationen bestätigt.

4 Ergebnisse

4.1 Lichtfarbenunterschiede innerhalb der Leuchte

Die Testpersonen bewerteten die Lichtfarbe einer Flächenleuchte danach, ob sie Lichtfarbenunterschiede erkennen. Werden Unterschiede erkannt, erfolgt eine Zuordnung zu einem Leuchtenbereich. Stimmt diese mit der Lage der anders bestückten Platine überein,

wird dies als Treffer bewertet. Wird eine andere Region benannt, zählt dies als Fehler. Daraus ergibt sich die prozentuale Verteilung der Probandenantworten nach Tabelle 2.

Tabelle 2: Ergebnis der Bewertung der Lichtfarbenunterschiede innerhalb von Leuchten (Bezeichnung nach Abbildung 2)

4200 cd/m ²	A1 (Z1 / Z2)	A2 (Z1 / Z3)	A3 (Z1 / Z4)	2100 cd/m ²	A1 (Z1 / Z2)	A2 (Z1 / Z3)	A3 (Z1 / Z4)
$\Delta u'v'$	0,0020	0,0012	0,0025	$\Delta u'v'$	0,0028	0,0013	0,0025
Trefferquote	5%	24%	14%	Trefferquote	14%	29%	19%
Fehlerquote	19%	14%	10%	Fehlerquote	33%	10%	14%
kein Unterschied	76%	62%	76%	kein Unterschied	52%	62%	67%

Die Ergebnisse zeigen, dass die andersfarbige Platine in der Mehrheit der Fälle von den Probanden nicht erkannt wurde und die dargebotenen Lichtfarbenunterschiede im Schwellenbereich sind. Lichtfarbenunterschiede werden bei einer Leuchtdichte von $L = 2100 \text{ cd/m}^2$ eher wahrgenommen als bei einer Leuchtdichte von $L = 4200 \text{ cd/m}^2$. Werden Lichtfarbenunterschiede korrekt erkannt, betrifft dies am häufigsten die Identifikation der Platine des Subbin J32 (Z3), was jedoch nicht derjenige Lichtfarben-unterschied mit dem größten Wert $\Delta u'v'$ entspricht.

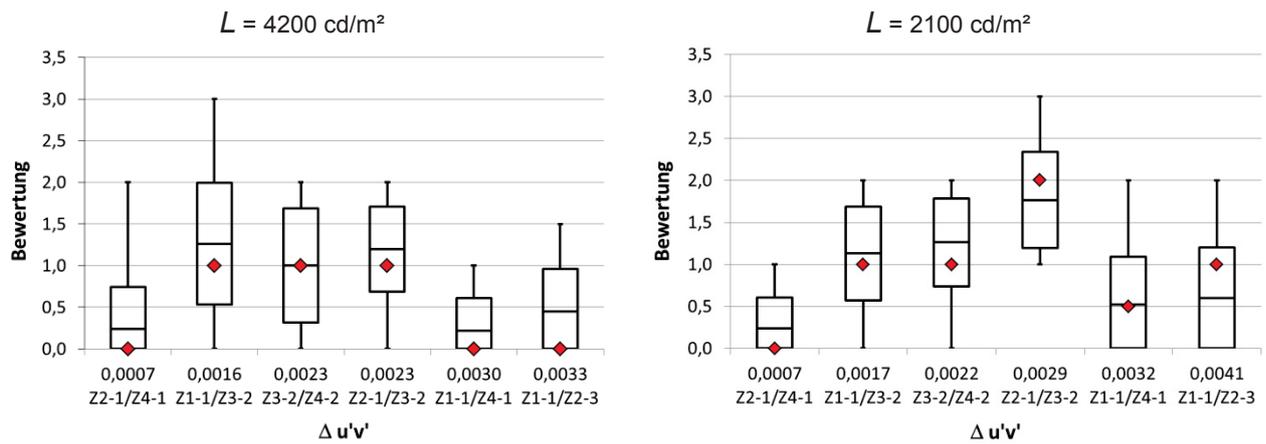
4.2 Lichtfarbenunterschiede zwischen Leuchten

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der Bewertung der Lichtfarbenunterschiede zwischen benachbarten Leuchten bei senkrechter Beobachtung. Erkennbar ist, dass alle Kombinationen mit Z3-Leuchten höher bewertet wurden, obwohl sie nicht der größten Farbunterschied $\Delta u'v'$ aufwiesen. Die Lichtfarbenunterschiede bei einer Leuchtdichte von $L = 2100 \text{ cd/m}^2$ wurden mehrheitlich höher bewertet als bei der Leuchtdichte von $L = 4200 \text{ cd/m}^2$. Es zeigen sich aber auch hier Widersprüche zwischen der Größe des Lichtfarbenunterschieds $\Delta u'v'$ und der subjektiven Bewertung durch die Probanden. Vergleichbare Ergebnisse werden auch bei der Auswertung der Bewertungen bei einem Beobachtungswinkel von 60° und bei einem Abstand zwischen den Leuchten von 60 cm beobachtet [10].

Beim Test des gesamten Leuchtenfeldes wurden folgende am häufigsten benannt:

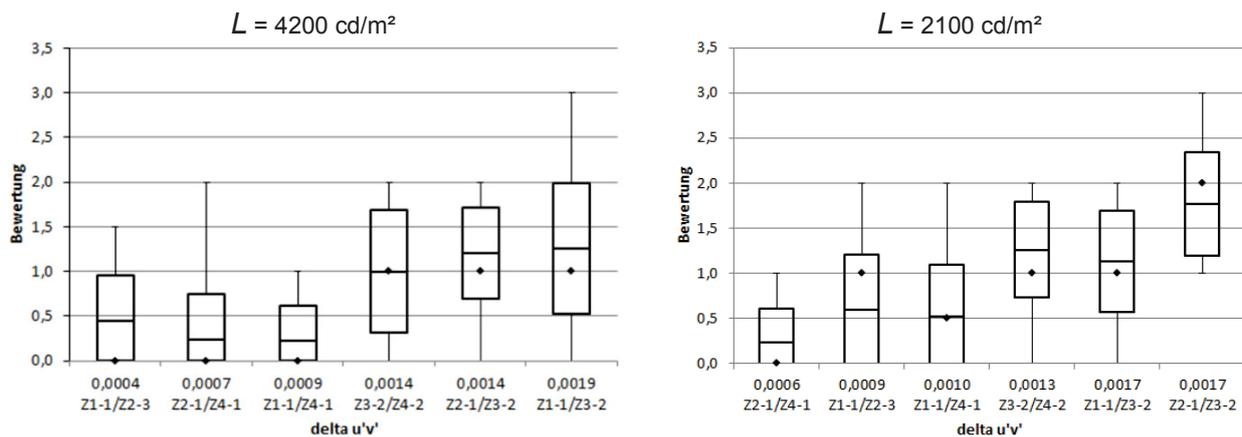
- Z3-2: 95,2 % (4200 cd/m^2 und 2100 cd/m^2)
- Z3-1: 85,7 % (4200 cd/m^2) / 90,5 % (2100 cd/m^2)
- Z3-3: 57,1 % (4200 cd/m^2) / 66,7 % (2100 cd/m^2)

Auffällig waren die Leuchten, die mit LED aus dem Subbin J32 (Z3) bestückt sind und in allen Versuchsreihen zu erhöhten Bewertungen führten. Für Leuchtdichten von $L = 2100 \text{ cd/m}^2$ war dies auffälliger als bei Leuchtdichten von $L = 4200 \text{ cd/m}^2$.



0	1	2	3	4
kein Unterschied	gerade erkannt	deutlich gesehen	zunehmend störend	störend

Abbildung 4: Bewertung von Lichtfarbenunterschieden zwischen benachbarten Leuchten bei senkrechter Beobachtung (Minimum, Mittelwert ± Standardabweichung, Maximum sowie Median (Raute))



0	1	2	3	4
kein Unterschied	gerade erkannt	deutlich gesehen	zunehmend störend	störend

Abbildung 5: Bewertung von Lichtfarbenunterschieden zwischen benachbarten Leuchten bei senkrechter Beobachtung bei Verwendung der Spektralwertfunktionen nach Polster [11] (Minimum, Mittelwert ± Standardabweichung, Maximum sowie Median (Raute))

Um die Widersprüche zwischen der subjektiven Bewertung und den auf der Basis der Normspektralwert (CIE 2°) bestimmten Lichtfarbenunterschieden $\Delta u'v'$ zu betrachten, wurden die spektralen Messwerte mit den 10°-Normspektralwertkurven (CIE 10°) bewertet und daraus die Lichtfarbenunterschiede $\Delta u'v'_{10^\circ}$ für die verschiedenen Versuchssituationen bestimmt. Jedoch zeigen sich auch bei diesen Betrachtungen ähnliche Widersprüche wie in Abbildung 4.

Werden die von POLSTER [11] vorgeschlagenen Spektralwertfunktionen verwendet, gelingt die Abbildung der subjektiven Bewertungen in Bezug zu den Lichtfarbenunterschieden $\Delta u'v'_{TUI10^\circ}$ (Abbildung 5).

5 Zusammenfassung

Für die Verwendung innerhalb einer Leuchte mit dem vorliegenden Aufbau sind die verwendeten Sortierungen fein genug. Die maximale Bewertung innerhalb der Befragungen lag bei 1 (*gerade erkannt*). Die Menge der Personen, die keinen Unterschied erkennen konnten, lag für alle Kombinationen bei > 50 %, meist sogar deutlich darüber. Dies mag damit zusammenhängen, dass sich die unterschiedlich bestückten Platinen in der Leuchte unmittelbar ohne Abgrenzung neben einander befanden. Damit ist eine Lichtmischung im Übergang möglich und die Lichtfarbenübergänge sind infolge des flachen Gradienten weniger auffällig.

Für Lichtfarbenunterschiede zwischen Leuchten wurden für die Leuchten mit den Subbinds J14 (Z1), J23 (Z2) und J41 (Z4) kleine Unterschiede erkennbar. Die Bewertung lag im Mittel maximal bei 1. Die sprunghaften Lichtfarbenübergänge zwischen den Leuchten sind auffälliger als bei Übergängen innerhalb einer Leuchte. Besonders deutlich fielen die Leuchten des Subbin J32 (Z3) auf, die immer zu höheren Bewertungen der Lichtfarbenunterschiede geführt haben und auch bei der gemeinschaftlichen Betrachtung aller Leuchten am meisten auffielen. Hier wird deutlich, dass die Auswahl der LED aus Clustern größer als ANSI/16 problematisch für ein einheitliches Erscheinungsbild zwischen Leuchten sein kann.

Die Untersuchung zeigte, dass Lichtfarbenunterschiede bei Leuchtdichten von $L = 4200 \text{ cd/m}^2$ weniger auffielen als bei Leuchtdichten von $L = 2100 \text{ cd/m}^2$. Das bedeutet die Empfindlichkeit sinkt mit dem Anstieg der Leuchtdichte der Flächenleuchte. Da zu erwarten ist, dass Leuchten, die für die Allgemeinbeleuchtung Anwendung finden, typischerweise höhere Leuchtdichten aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass Lichtfarbenunterschiede weniger auffällig sind.

Zur Reduzierung möglicher störender Lichtfarbenunterschiede ist grundsätzlich eine gute Lichtdurchmischung innerhalb der Leuchte zu realisieren. Außerdem können Materialien, die in der Leuchte zum Einsatz kommen, Einfluss auf die Lichtfarbe der Leuchte haben. Eine Kombination von LED aus benachbarten Subbins und die örtliche Durchmischung innerhalb einer Platine können störende Lichtfarbenunterschiede minimieren.

6 Literatur

- [1] American National Standard Lighting Group, (2008). C78-377: Specification for the chromaticity of Solid State Lighting Products
- [2] LG Innotek. 2013. Application Note Mid Power White LED PKG. 2013
- [3] Philips Color Kinetics, (2010) Optibin-Technology Overview - Color Consistency for Color and White-light LED, Burlington, Massachusetts, USA
- [4] Narendran, N., Deng, L., Pysar, R. M., Gu, Y., Yu, H., (2004) Performance characteristics of high-power light-emitting diodes, Third International Conference on Solid State Lighting, Proceedings of SPIE 5187: 267-275
- [5] MacAdam, D. L., (1942) Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight, Journal of the Optical Society of America 32(5), 247-273
- [6] Narendran, N., et al. (2004) Developing Color Tolerance Criteria for White LEDs, Report Lighting Research Center Troy, NY
- [7] Opstelten, J. J., Rinzema, G., (1987) New Insights in Chromaticity and Tolerance Areas of Fluorescent Lamps, Journal of the Illuminating Engineering, 16, 17-27

- [8] CS-2000 Datenblatt. abrufbar online unter <http://sensing.konicaminolta.asia/products/cs-2000-spectroradiometer/>, zuletzt aufgerufen Juni 2014
- [9] TechnoTeam, LMK color Produktinformationen, abrufbar online unter http://www.technoteam.de/produktuebersicht/lmk/produkte/index_ger.html zuletzt aufgerufen Juni 2014
- [10] Homberg, S., (2013) Untersuchung von Lichtfarbenunterschieden innerhalb und zwischen LED-Leuchten, Ilmenau: Masterarbeit TU Ilmenau
- [11] Polster, S., Bieske, K., (2013) Neue spektrale Empfindlichkeitsfunktionen zur Erfassung visueller Farbgleichheit bei LED-Spektren, Tagung Lux junior Dörnfeld

Kombination unterschiedlicher Lichtfarben im Raum: farbige Schatten

Karin Bieske, Tobias Fiebig
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

Tagung LICHT 2014, Den Haag, Tagungsband

Abstract

Werden unterschiedliche Beleuchtungssysteme gleichzeitig in einem Raum verwendet, die in ihrer Lichtfarbe variieren, können Lichtfarbenunterschiede zwischen Leuchten und zwischen Arbeitsbereichen auftreten. Je nach Ansteuerung und Anordnung der Leuchten im Raum kann dies zur Ausbildung farbiger Schatten führen, die sich störend im Arbeitsbereich bemerkbar machen können. Um Aussagen zu Schwellen- und Toleranzwerten für farbige Schatten ableiten zu können, erfolgten Untersuchungen in einem Versuchsraum. In einem ersten Schritt wurden systematische Messungen an einem Schattenobjekt zur Ausbildung von Farbunterschieden in Abhängigkeit von Lichtfarbenunterschieden zwischen den Leuchten und dem Leuchtenabstand durchgeführt. Für ausgewählte Lichtszenen erfolgten Bewertungen durch Probanden an einem Schattenobjekt und für Objekte in einer Büroszene sowie für Lichtfarbenunterschiede zwischen den Leuchten. Die Untersuchungen fanden mit 21 Probanden statt. Dabei wurde die Lichtfarbe der Leuchten zwischen $CCT = 2700\text{ K}$ und $CCT = 7500\text{ K}$ bei einem Beleuchtungsniveau auf der Bewertungsfläche von $E = 725\text{ lx}$ variiert. Als Referenz diente eine Lichtfarbe mit einer ähnlichsten Lichtfarben von $CCT = 5100\text{ K}$. Es zeigte sich, dass Lichtfarbenunterschiede zwischen Leuchten kritischer bewertet wurden als farbige Schatten an Objekten. Werden ähnliche Lichtfarben innerhalb eines Arbeitsbereichs verwendet, sind störende Effekte vermeidbar.

Schlagwörter: *Kombination von Lichtfarben, Farbige Schatten*

1 Forschungsgegenstand

Die Entwicklung von LED (Licht emittierende Dioden) bietet Möglichkeiten für die Umsetzung neuer Beleuchtungskonzepte. Vor dem Hintergrund chronobiologischer Lichtwirkungen und energieeffizienter Beleuchtung in Verbindung mit Tageslicht kann es sinnvoll sein, Beleuchtungssysteme in verschiedenen Lichtfarben und variabel bezüglich Lichtstrom und Lichtverteilung auszulegen. Werden Leuchten mit variablen Lichtfarben innerhalb eines Raumes installiert, können Unterschiede in der Lichtfarbe zwischen den Leuchten und zwischen Arbeitsbereichen auftreten. Je nach Ansteuerung und Anordnung

der Leuchten im Raum kann dies zur Ausbildung farbiger Schatten führen, die sich störend im Arbeitsbereich bemerkbar machen können. Kenntnisse darüber, welche Unterschiede bei farbigen Schatten und bei Lichtfarbenunterschieden zwischen Leuchten erkennbar sind und wann störende Effekte auftreten sind wichtig für die lichttechnische Gestaltung innerhalb von Raumbereichen, für die Wahl der Lichtfarbe in angrenzenden Räumlichkeiten und für die Auslegung von farbdynamischen Beleuchtungssystemen.

2 Stand der Wissenschaft

MARKYTAN führte Untersuchungen zur Kombination von Lichtfarben im Arbeitsbereich durch [1], [2]. Betrachtet wurde eine Mehrkomponentenbeleuchtung an einem Büroarbeitsplatz. Parameter waren neben der Teilflächengröße und dem erforderlichen Beleuchtungsniveau die Lichtfarbenkombination. Bei der Untersuchung wurden verschiedene Lichtfarben im Arbeitsbereich (CCT : 2700 K, 3000 K, 4000 K) mit unterschiedlichen Lichtfarben der raumbezogenen Beleuchtung (CCT : 3000 K, 4000 K und 6500 K) kombiniert und bei Beleuchtungsniveaus von $E = 600$ lx und $E = 1500$ lx hinsichtlich ihrer Akzeptanz verglichen. 20 Probanden bewerteten die dargebotenen Lichtszenen. Im Ergebnis zeigte sich, dass im Arbeitsbereich neutralweiße Lichtfarben besser akzeptiert werden als warmweiße Lichtfarben und dass unabhängig vom Beleuchtungsniveau keine großen Unterschiede in der Lichtfarbe zwischen arbeitsplatzbezogener und raumbezogener Beleuchtung gewünscht werden. Die Kombination (2700 K/6500 K) wird im Vergleich zu anderen Kombinationen aufgrund der hohen Farbkontraste durch die Probanden deutlich negativer bewertet.

LUCKNER und BEYER untersuchten in einem Laborraum die Kombination von Lichtfarben zwischen Leuchten und die Ausbildung von farbigen Schatten an einem Schattenobjekt [3], [4]. Dazu wurden Leuchten mit neutralweißen und farbigen Leuchtstofflampen bestückt und schrittweise in der Lichtfarbe bei konstantem Beleuchtungsniveau ($L = 9300$ cd/m²) variiert. Ausgehend von einer Lichtfarbe von $CCT = 4000$ K wurde sie in Richtung Rot, Grün und Blau verändert. 25 Probanden bewerteten sowohl die Lichtfarbenunterschiede zwischen Leuchten als auch die Ausbildung farbiger Schatten. Im Ergebnis dieser Untersuchung zeigte sich, dass farbige Schatten kritischer bewertet wurden, als der Lichtfarbenunterschied zwischen den Leuchten. Lichtfarbenunterschiede zwischen Leuchten wurden je nach Variationsrichtung von den Probanden bei Medianwerten von $\Delta u'v' = 0,0016$ (Richtung grün), $\Delta u'v' = 0,0024$ (Richtung rot) und $\Delta u'v' = 0,0041$ (Richtung blau) gerade erkannt. Toleranzwerte lagen bei Medianwerten von $\Delta u'v' = 0,0090$ (Richtung grün), $\Delta u'v' = 0,0198$ (Richtung rot) und $\Delta u'v' = 0,0302$ (Richtung blau).

BIESKE variierte in ihren Untersuchungen die Lichtfarbe entlang des Planckschen Kurvenzuges und bestimmte Schwellen- und Toleranzwerte für die Wahrnehmung von Lichtfarbenunterschieden für sprunghafte Lichtfarbenänderungen [5]. Dabei zeigte sich keine Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke im Bereich von $E = 300$ lx bis $E = 1000$ lx, jedoch wurden die Ergebnisse von der Ausgangslichtfarbe beeinflusst. Mit steigender Farbtemperatur nahmen auch die Schwellen- und Toleranzwerte $\Delta u'v'$ zu. Diese Untersuchungen zeigen auch, dass Variationen entlang der Juddschen Geraden im Vergleich zu Variationen entlang des Planckschen Kurvenzuges zu kritischeren Bewertungen führen.

3 Methode und Versuchsdesign

Die Untersuchungen wurden in einem Laborraum der Größe 6,60 m x 4,2 m x 2,8 m mit neutraler Raumgestaltung durchgeführt. Die Reflexionsgrade von Wänden, Boden und Decke betragen $\rho_{\text{Wand}} = 0,7$, $\rho_{\text{Boden}} = 0,1$, $\rho_{\text{Decke}} = 0,7$. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsraums und die Anordnung der Leuchten. Fünf Reihen mit je drei Leuchten sind in einer Rasterdecke integriert. Es wurden Leuchten der Firma Philips SmartForm TBS473 mit einer leuchtenden Fläche von 55,5 cm x 55,5 cm verwendet. Sie sind für sechs T5 Leuchtstofflampen ausgelegt und verfügen über elektronische Vorschaltgeräte mit DALI-Schnittstelle. Die Abschlusscheibe ist in OLC-Microlinsenoptik ausgelegt, die die Lichtmischung realisiert. Verwendet wurden je Leuchte zwei Lampen Phillips Master T5 HO 827 24 W und vier Lampen Phillips Master T5 HO Activiva Natural 24 W. Für die Ansteuerung wurde die DALI X TouchBox der Firma Tridonic eingesetzt. Über die Definition von Gruppen und Szenen wurden Helligkeit und Lichtfarbe der Leuchten für die Versuchsszenen definiert. Für die Untersuchung mit Versuchspersonen wurden je zwei Leuchtenreihen zu einer Gruppe zusammengefasst. Mit der Leuchtengruppe 1 wurden ähnlichste Farbtemperaturen von $CCT = 2700\text{ K}$ bis $CCT = 5100\text{ K}$ realisiert. Leuchtengruppe 2 ermöglichte Einstellungen mit ähnlichsten Farbtemperaturen von $CCT = 5100\text{ K}$ bis $CCT = 7500\text{ K}$. Um hohe ähnlichste Farbtemperaturen CCT zu realisieren, wurden die Leuchten der Leuchtengruppe 2 zusätzlich mit blauen Filtern (LEE 203) versehen. Das Beleuchtungsniveau im Untersuchungsbereich betrug konstant $E = 725\text{ lx}$. Abbildung 1 (rechts) gibt einen Überblick über die realisierten Versuchsszenen und deren Lichtfarben.

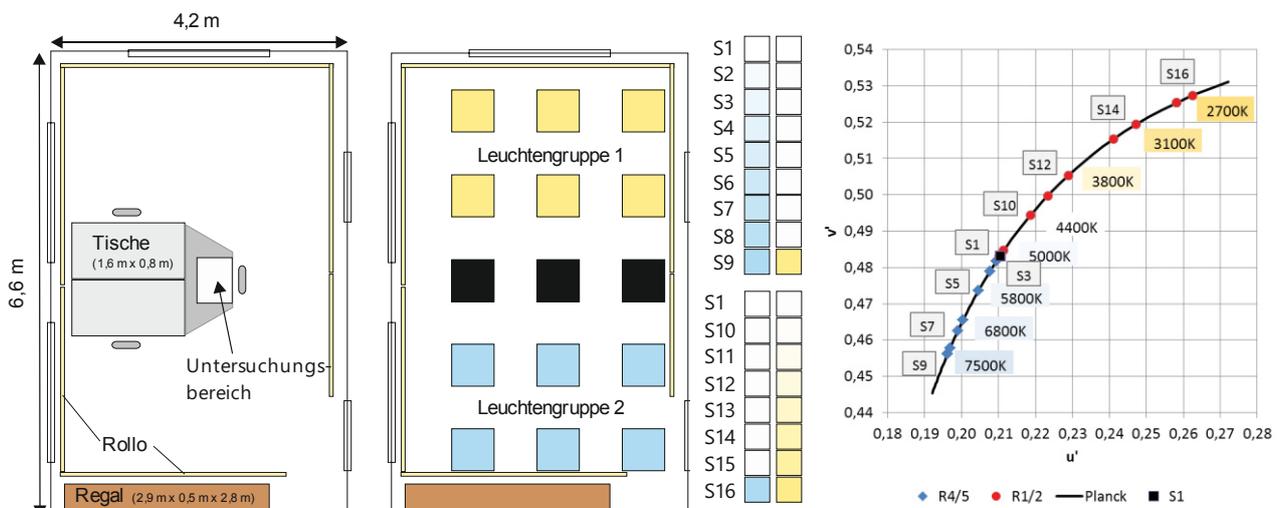


Abbildung 1: Skizze des Versuchsraums und der Leuchtenanordnung (links) und schematische Darstellung und Lichtfarben der Versuchsszenen S1 bis S16 (rechts)

Für die einzelnen Versuchsszenen S1 bis S16 wurden die lichttechnischen und farbmetrischen Parameter für die farbigen Schatten an den Objekten und für Lichtfarbenunterschiede zwischen den Leuchten bestimmt. Abbildung 2 zeigt das Messprinzip. Gemessen wurde spektral mit dem Spektralradiometer Specbos 1211 [6] und ortsaufgelöst mit der Leuchtdichtemesskamera LMKcolor 4-98 [7].

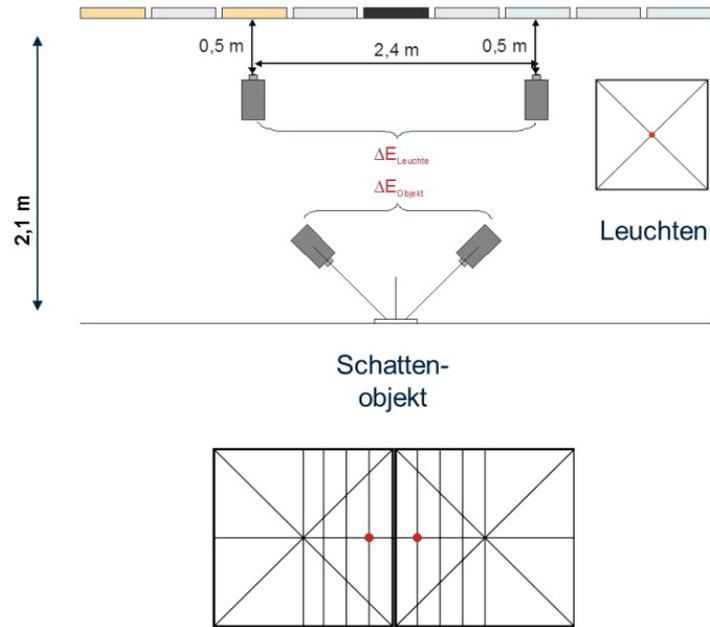


Abbildung 2: Darstellung des Messaufbaus im Versuchsraum zur Erfassung der Lichtfarbenunterschiede zwischen Leuchten und der Farbunterschiede auf dem Schattenobjekt

Aus den Messdaten wurde der Farbunterschied $\Delta u'v'$ zwischen Leuchten der Leuchtengruppe 1 und Leuchtengruppe 2 beziehungsweise zwischen den Schatten links und rechts von Objekten nach Gleichung (1) berechnet:

$$(1) \quad \Delta u'v' = \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2}$$

Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang zwischen Lichtfarbenunterschied zwischen den Leuchten und den gemessenen Farbunterschieden $\Delta u'v'$ auf dem Schattenobjekt und in der untersuchten realen Büroszene.

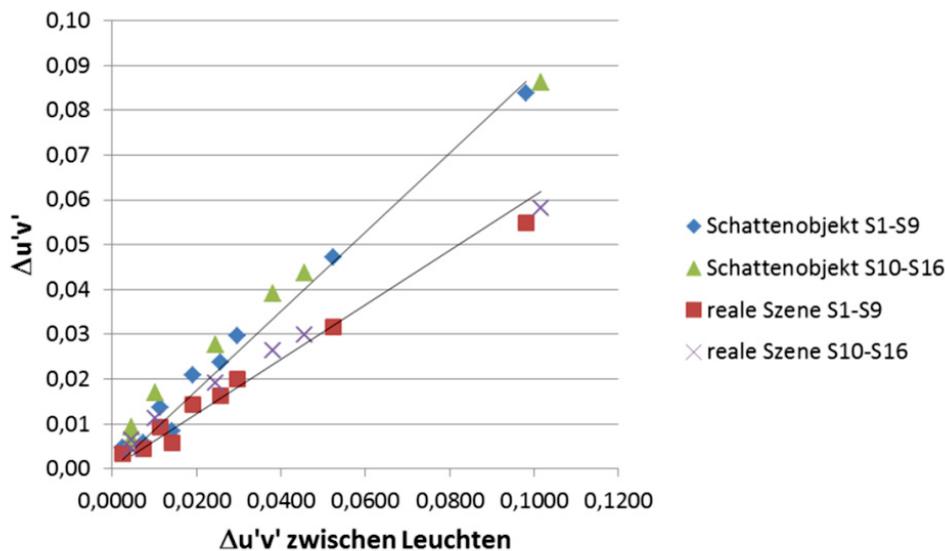
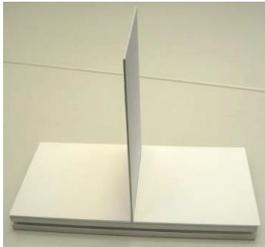


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Lichtfarbenunterschied zwischen den Leuchten und den gemessenen Farbunterschieden $\Delta u'v'$ auf dem Schattenobjekt und in der untersuchten realen Büroszene

Die Versuchsszenen wurden in den Untersuchungen 21 farbtüchtige Probanden (davon 10 Frauen, Alter: 20 bis 56 Jahre, $\bar{\Delta} 34 \pm 12$ Jahre) in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Die Testpersonen bewerteten in einem ersten Durchgang farbige Schatten an einem Schattenobjekt, in einer zweiten Versuchsreihe farbige Schatten an realen Objekten für eine Bürosituation und abschließend die Lichtfarbenunterschiede zwischen den Leuchten. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die verwendeten Versuchsobjekte.

1. Schattenobjekt



zwei Grundflächen von 20 cm x 20 cm, die durch eine senkrecht stehende Fläche mit einer Dicke von 2 mm gleicher Größe getrennt sind, weiß bezogen

2. Objekte in einer Bürosituation



3. Leuchten

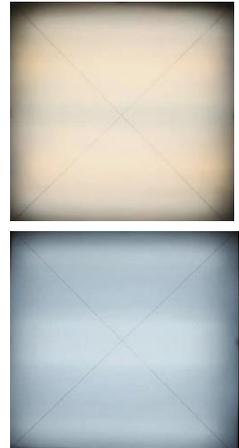


Abbildung 4: Überblick über die verwendeten Versuchsobjekte in den einzelnen Versuchsdurchgängen

Für jede Versuchssituation wurden drei Bewertungen abgegeben. Die Kriterien für die Bewertung von farbigen Schatten und Lichtfarbenunterschieden waren:

0	1	2	3
keine gesehen	gerade erkannt	deutlich erkennbar, jedoch nicht störend	störend empfunden

Abbildung 5: Bewertungsskale für die Bewertung von farbigen Schatten und Lichtfarbenunterschieden

4 Ergebnisse

Abbildung 5 fasst die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung zusammen. Dargestellt sind die subjektiven Bewertungen der 21 Probanden für farbige Schatten am Schattenobjekt sowie für Objekte in einer Bürosituation und für wahrgenommene Lichtfarbenunterschiede zwischen den Leuchten in Abhängigkeit vom Lichtfarben-unterschied zwischen den Leuchten $\Delta u'v'$.

Danach wird der Lichtfarbenunterschied zwischen Leuchten in einem Raum kritischer bewertet als die Ausbildung farbiger Schatten an Objekten. In realen Situationen sind farbige Schatten weniger auffällig als am Schattenobjekt, das mit seiner Höhe von 20 cm einen deutlicheren Schattenwurf auf seiner homogenen weißen Oberfläche verursacht als typische Gebrauchsgegenstände in einer Bürosituation.

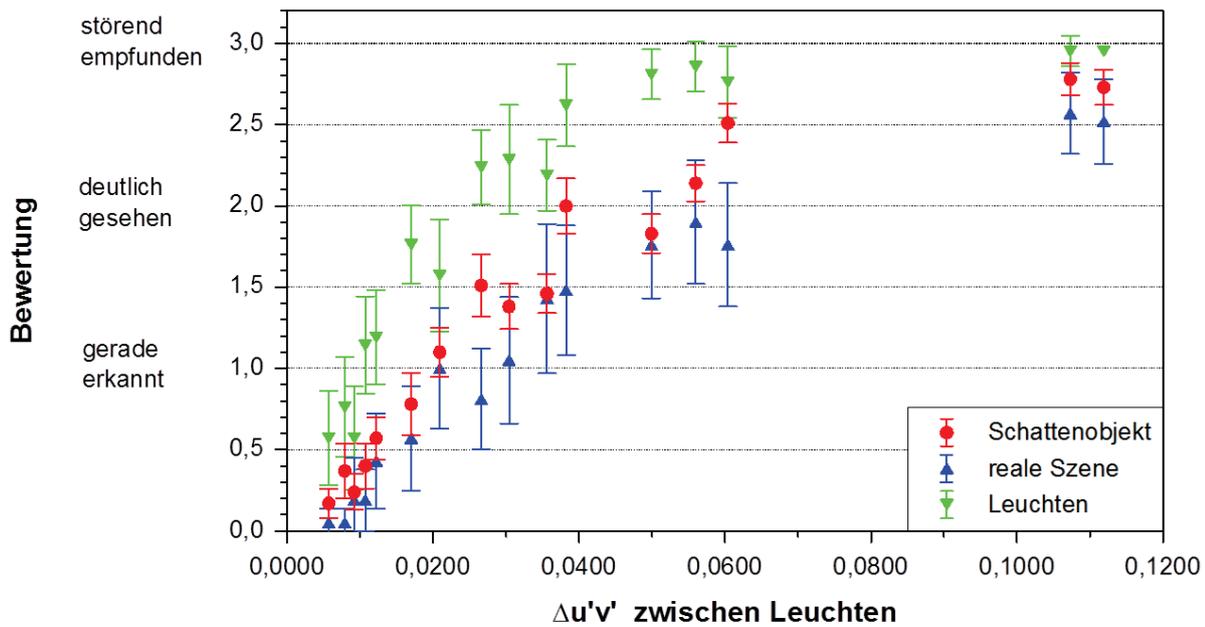


Abbildung 6: Subjektive Bewertung für farbige Schatten am Schattenobjekt, für Objekte in einer Bürosituation und für den Lichtfarbenunterschied zwischen den Leuchten (Mittelwert ± Standardabweichung)

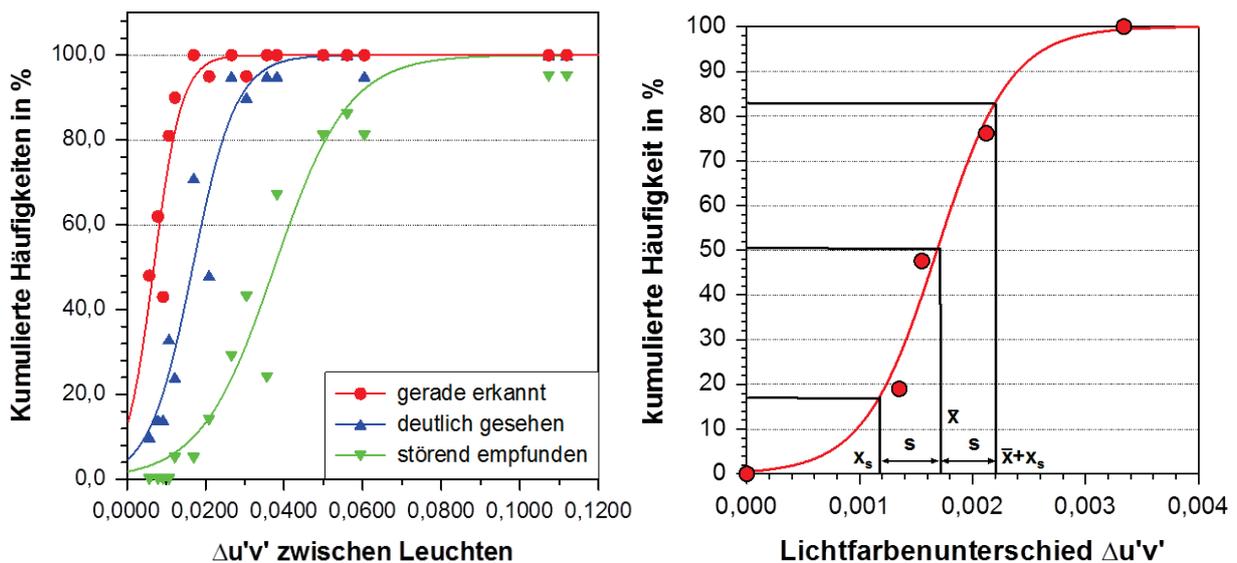


Abbildung 7: Kumulierte Häufigkeit für die Bewertung des Lichtfarbenunterschieds zwischen Leuchten für die Kriterien *gerade erkannt* (Bewertung ≥ 1) *deutlich gesehen* (Bewertung ≥ 2) und *störend empfunden* (Bewertung = 3) (links) und Prinzip der Methode zur Datenbestimmung (rechts)

Für die weitere Auswertung wurden die kumulierte Häufigkeitsverteilung für die verschiedenen Versuchsreihen und Kriterien ermittelt. Daraus erfolgte für die logistische Funktion nach Gleichung (2) die Berechnung der Parameter a und b durch eine nicht-lineare Regression (Abbildung 6). Mit diesen Parametern kann der Mittelwert \bar{x} und die Standardabweichung s bestimmt werden (Gleichungen 3 und 4).

$$(2) \quad f(x) = \frac{100}{1 + e^{-\frac{a-x}{b}}} \quad (3) \quad f(\bar{x}) = \frac{100}{1 + e^{-\frac{a-\bar{x}}{b}}} = 50 \quad (4) \quad f(x_s) = \frac{100}{1 + e^{-\frac{a-x_s}{b}}} = \frac{1}{6} \cdot 100$$

folgt $\bar{x} = a$ folgt $s = |\bar{x} - x_s| = b \cdot \ln 5$

Die Ergebnisse der nichtlinearen Regression sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Schwellen- und Toleranzwerte (Mittelwerte \pm Standardabweichung)

Kriterium/ $\Delta u'v'$	zwischen Leuchten	am Schattenobjekt	an realen Objekten
<i>gerade gesehen</i>	0,0069 +/- 0,0023	0,0114 +/- 0,0026	0,0128 +/- 0,0034
<i>deutlich erkannt</i>	0,0167 +/- 0,0036	0,0275 +/- 0,0050	0,0235 +/- 0,0048
<i>störend empfunden</i>	0,0375 +/- 0,0062	0,0514 +/- 0,0015	0,0589 +/- 0,0103

Für die Beleuchtungssituation im Versuchsraum wurden ausgehend von einer ähnlichsten Farbtemperatur von $CCT = 5100$ K im Mittel Lichtfarbenunterschiede mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von $\Delta CCT = 300$ K *gerade erkannt*, Unterschiede von $\Delta CCT = 700$ K *deutlich gesehen* und von $\Delta CCT = 1600$ K *störend empfunden*.

5 Diskussion und Zusammenfassung

Im Vergleich zur Schattenbildung an dem in der Untersuchung verwendeten Schattenobjekt sind farbige Schatten an realen Objekten weniger auffällig, da diese maßgeblich durch die Objekthöhe beeinflusst werden. In der durchgeführten Untersuchung wurde von einem Worst-Case-Szenario ausgegangen, in dem sich die Lichtfarben zweigeteilt im Raum unterscheiden und sich der Beobachter im Bereich des sprunghaften Übergangs befindet. Es ist zu erwarten, dass in einer realen Umgebung die Allgemeinbeleuchtung Bezug zum Arbeitsbereich hat und die Arbeitsfläche selbst eher inhomogen bezüglich Leuchtdichte und Farbe ist. Es ist zu vermuten, dass farbige Schatten dadurch weniger auffällig sind. Außerdem ist zu erwarten, dass durch Tageslicht die Lichtfarbe im Arbeitsbereich zusätzlich beeinflusst wird und Übergänge der Lichtfarbe nicht sprunghaft erfolgen.

Nach BIESKE werden Schwellen- und Toleranzwerte maßgeblich von der Ausgangslichtfarbe beeinflusst [5]. Das mag eine der Ursachen dafür sein, dass im Vergleich zur Untersuchung von LUCKNER bei $CCT = 4000$ K größere Schwellen- und Toleranzwerte bestimmt wurden [3]. Außerdem erfolgte die Variation der Lichtfarbe in der in diesem Beitrag dargestellten Untersuchung orientiert am Verlauf der Planckschen Kurve. Nach BIESKE sind diese Lichtfarbenänderungen weniger kritisch als Variationen in Richtung oberhalb oder unterhalb des Planckschen Kurvenzuges [3]. Die in der Untersuchung verwendeten Leuchten wiesen auf der leuchtenden Fläche Inhomogenitäten auf, die durch die Anordnung der Lampen und die nicht perfekte Lichtmischung bedingt sind. Die Erkennung von Unterschieden wird dadurch erschwert.

Farbige Schatten sollten in der Praxis keine Störungen verursachen, da Lichtfarbenunterschiede zwischen den Leuchten kritischer bewertet werden. Werden ähnliche Lichtfarben im Arbeitsbereich verwendet, können störende Einflüsse vermieden werden.

6 Literatur

- [1] Markytan, A., (2001) Untersuchungen der Mehrkomponenten-Beleuchtung am Bildschirmarbeitsplatz, Ilmenau: Forschungsbericht TU Ilmenau,
- [2] Markytan, A., (2007) Untersuchungen zur flächenbezogenen Beleuchtung in Büroräumen, Tönning, Lübeck und Marburg: Der Andere Verlag, 163 Seiten
- [3] Luckner, H., (2006) Zulässige Farbtoleranzen zwischen Leuchten, Ilmenau: Projektarbeit TU Ilmenau
- [4] Beyer, E., (2006) Lichtfarbenübergänge und farbige Schatten, Ilmenau: Projektarbeit TU Ilmenau
- [5] Bieske, K., (2010) Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme, Tönning, Lübeck und Marburg: Der Andere Verlag, 143 Seiten
- [6] Specbos 1211 Datenblatt. abrufbar online unter http://www.jeti.com/cms/images/jeti_com/down/data_sheets/instruments/scb1211.pdf zuletzt aufgerufen Juni 2014
- [7] TechnoTeam, LMK color Produktinformationen, abrufbar online unter http://www.technoteam.de/produktuebersicht/lmk/produkte/index_ger.html zuletzt aufgerufen Juni 2014

Steuerkonzepte für dynamische Beleuchtungssysteme: Variation des Beleuchtungsniveaus

*Karin Bieske, Andreas Dommaschk
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik*

Tagung LICHT 2014, Den Haag, Tagungsband

Abstract

Neben der Variation der Lichtfarbe ist die Änderung des Beleuchtungsniveaus ein wesentlicher Parameter dynamischer Beleuchtungssysteme. In früheren Arbeiten wurde bereits die Variation der Lichtfarbe untersucht und Empfehlungen für die Steuerung abgeleitet [1]. In diesem Betrag wird auf Untersuchungen zur Änderung der Beleuchtungsstärke eingegangen. In Probandenversuchen wurden Schwellen- und Toleranzwerte für die sprunghafte Änderung der Beleuchtungsstärke im Bereich zwischen $E = 300 \text{ lx}$ und $E = 1000 \text{ lx}$ für eine mit LED-Leuchten ausgestattete Bürosituation in einem Versuchsraum bestimmt. Betrachtet wurde der Einfluss von Lichtfarbe, Variationsrichtung und Ausgangsbeleuchtungsniveau. Der Schwellenwert für die Wahrnehmung von relativen Beleuchtungsstärkeänderungen liegt bei Werten von $\Delta E/E_{\text{Ausgangswert}} < 5 \%$. Änderungen von $\Delta E/E_{\text{Ausgangswert}} = 15 \%$ bis 20% wurden von den Probanden noch toleriert. Die Wahrnehmung von Änderungen der Beleuchtungsstärke ist unabhängig von der Lichtfarbe im Bereich zwischen $\text{CCT} = 3000 \text{ K}$ und $\text{CCT} = 6000 \text{ K}$ und wird nicht von der Variationsrichtung und der Ausgangsbeleuchtungsstärke beeinflusst. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden Lichtszenarien als Kombination von Änderungen in Beleuchtungsstärke und Lichtfarbe entwickelt und mit Versuchspersonen getestet. Als angenehm wurden Änderungen beider Parameter im Bereich der Wahrnehmungsschwelle bewertet.

Schlagwörter: Dynamische Beleuchtung, Variation der Beleuchtungsstärke

1 Forschungsgegenstand

Die Entwicklung von LED (Licht emittierende Dioden) bietet Möglichkeiten für die Umsetzung neuer Beleuchtungskonzepte. Vor dem Hintergrund chronobiologischer Lichtwirkungen und energieeffizienter Beleuchtung in Verbindung mit Tageslicht kann es sinnvoll sein, Beleuchtungssysteme in verschiedenen Lichtfarben und variabel bezüglich Lichtstrom und Lichtverteilung auszulegen. Dynamische Beleuchtungssysteme sind zeitlich veränderlich hinsichtlich Beleuchtungsniveau, örtlicher und spektraler Lichtverteilung (Lichtfarbe). In früheren Untersuchungen wurden Anforderungen an die situative Änderung

der Lichtfarbe untersucht und Empfehlungen erarbeitet [1]. Nicht betrachtet wurde bisher in diesem Zusammenhang die Veränderung der Beleuchtungsstärke. Dabei steht die Frage der Änderung von einer Beleuchtungsstärke zu einer anderen und nicht die Variation im Tagesverlauf im Vordergrund. Für die Ableitung von Anforderungen für Steuerstrategien sind folgende Arbeitsschritte erforderlich:

- Festlegung des Dynamikbereichs für Beleuchtungsstärke und Lichtfarbe
- Bestimmung von Schwellen- und Toleranzwerten für sprunghafte Änderungen der Beleuchtungsstärke und Untersuchung der Einflussgrößen
- Untersuchung dynamischer Veränderungen

2 Stand der Wissenschaft und Forschungshypothesen

Für die Entwicklung von Steuerstrategien für dynamische Beleuchtungssysteme ist zu klären, ob es eine Verkopplung von Parametern gibt und damit die Veränderung eines Parameters abhängig von einem anderen Parameter ist oder ob die Änderungen unabhängig voneinander erfolgen können. Bezüglich des Zusammenhangs zwischen Beleuchtungsstärke und bevorzugter Lichtfarbe sind in der Literatur widersprüchliche Aussagen zu finden. Nach KRUITHOF besteht ein Zusammenhang. Danach werden warme Lichtfarben bei niedrigen Beleuchtungsstärken und kalte Lichtfarben bei hohen Beleuchtungsstärken bevorzugt [2]. Andere Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, dass die bevorzugte Beleuchtungsstärke unabhängig von der Lichtfarbe ist [3] bis [6]. BIESKE zeigt bei Untersuchungen an einer Versuchskabine, dass es keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und bevorzugter Lichtfarbe gibt [1]. Diese Ergebnisse konnten in späteren Untersuchungen für eine Bürosituation in einem Versuchsraum bestätigt werden [7]. Für die Wahrnehmung von Lichtfarbenunterschieden wurde der Einfluss der Beleuchtungsstärke auf die Schwellen- und Toleranzwerte für die sprunghafte Änderung untersucht [1]. Für Beleuchtungsstärken zwischen $E = 300 \text{ lx}$ und $E = 1000 \text{ lx}$ konnte kein Einfluss auf die Empfindung von Farbveränderungen weißer Lichtfarben festgestellt werden. Das führt zur umgekehrten Hypothese, dass die Empfindung von Änderungen in der Beleuchtungsstärke nicht von der Lichtfarbe beeinflusst wird.

Die Anpassung des Auges an unterschiedliche Beleuchtungsniveaus ist mit Adaptationsvorgängen verbunden. Dabei sind unterschiedliche Mechanismen beteiligt, die verschiedene Anpassungszeiten benötigen. Der Übergang von einem höheren zu einem niedrigeren Beleuchtungsniveau dauert länger als umgekehrt [8]. Es kann angenommen werden, dass die Variationsrichtung und das Ausgangsbeleuchtungsniveau einen möglichen Einfluss auf die Empfindung von Änderungen in der Beleuchtungsstärke haben. Je größer der Reizunterschied ist und je schneller Änderungen erfolgen, umso größer ist der Einfluss zu vermuten. Eine Begrenzung des Variationsumfangs für einen Änderungszyklus kann daher sinnvoll sein.

3 Methode und Versuchsdesign

Die Untersuchungen erfolgten in einem Versuchsraum der Größe $6,60 \text{ m} \times 4,2 \text{ m} \times 2,8 \text{ m}$, der eine Bürosituation simuliert. Tageslicht wurde über Jalousien ausgeschlossen. Verwendet wurden 14 Zumtobel LED Panos Infinity Tunable White Leuchten, die in eine Rasterdecke eingebaut wurden. Beleuchtungsniveau und Lichtfarbe sind über ein DALI-Protokoll mit dem Emotion Touchpanel variierbar. Die Anordnung der Leuchten erfolgte auf der Grundlage einer DIALUX-Simulation so, dass eine Beleuchtungsstärke von mindestens

E = 1000 lx auf der Tischfläche realisiert werden konnte. Orientiert wurde sich dabei an gängigen Empfehlungen und normativen Vorgaben [9], [10]. Systembedingt lässt sich die Lichtfarbe zwischen CCT = 2700 K und CCT = 6500 K ändern und sind Einstellungen für die Beleuchtungsstärken zwischen 1 % und 100 % möglich, wobei die Änderung logarithmisch erfolgt. Abbildung 1 zeigt eine Skizze des Versuchsraums mit der Leuchtenanordnung.

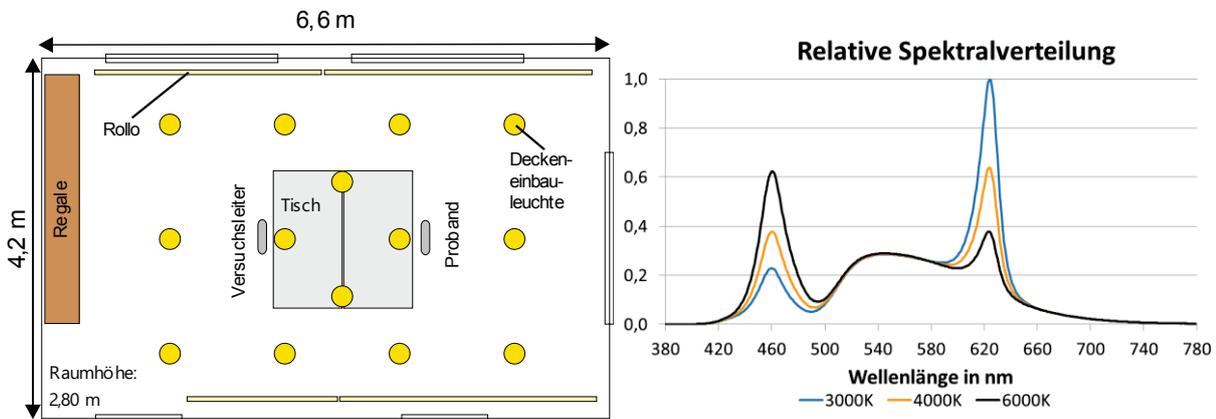


Abbildung 1: Skizze des Versuchsraums (links), die Kreise symbolisieren die Leuchtenanordnung und relative spektrale Verteilung für verschiedene Lichtfarben (rechts)

Die Untersuchungen erfolgten in zwei Versuchsreihen. In der ersten Versuchsreihe wurde die sprunghafte Änderung der Beleuchtungsstärke ΔE untersucht. Gegenstand der zweiten Versuchsreihe waren Beleuchtungsszenarien, in denen sich die Lichtfarbe und die Beleuchtungsstärke veränderten. Die Zeit zwischen den Wechseln der einzelnen Lichtsituationen (Haltezeit t) betrug dabei $t = 1$ s und bestimmte damit die Änderungsgeschwindigkeit für die Variation der Lichtfarbe und der Beleuchtungsstärke. In Anschluss an die Versuche aus [1] wurde zunächst die Variation der Lichtfarbe bei konstanter Beleuchtungsstärke $E = 1000$ lx untersucht. Die Lichtfarbe änderte sich dabei in Anlehnung an Gleichung (1):

$$(1) \quad \Delta CCT = 6,0 \cdot 10^{-7} \cdot CCT^{2,231} \quad [1]$$

Zwischen CCT = 2700 K und CCT = 6500 K wurden 54 Schritte realisiert, wobei die Schrittweite ΔCCT nach Gleichung 1 für niedrige ähnlichste Farbtemperaturen kleiner war als für höhere ähnlichste Farbtemperaturen. Die mittlere Änderungsgeschwindigkeit für die Variation der Lichtfarbe betrug $\overline{v_{\Delta CCT}} = 70$ K/s. In weiteren Tests änderten sich Lichtfarbe und die Beleuchtungsstärke zeitgleich. Für die Änderung der Beleuchtungsstärke wurden die kleinstmöglichen Schrittweiten des Systems von $\Delta E \approx 5$ % verwendet. Damit ergibt sich bei 54 Schritte eine mittlere Änderungsgeschwindigkeit für die Variation der Beleuchtungsstärke von $v_{\Delta E} = 13$ lx/s. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Versuchsparameter.

Tabelle 1: Versuchsparameter der Versuchsreihe 1 (links) und der Versuchsreihe 2 (rechts)

Versuchsreihe	1. Sprunghafte Änderung ΔE	2. Dynamik																								
Probanden	22 Probanden, je 11 Frauen und Männer, 31 ± 11 Jahre, getestet auf Farbtüchtigkeit und Kontrastsehen (Farblegetest nach Lanthony [11] und Vistech Contrast Sensitivity Test [12])	10 Probanden, je 5 Frauen und Männer, $30 \pm 6,5$ Jahre, getestet auf Farbtüchtigkeit und Kontrastsehen (Farblegetest nach Lanthony [11] und Vistech Contrast Sensitivity Test [12])																								
Parameter	<p>Lichtfarbe CCT: 3000 K, 4000 K, 6000 K Richtung/ Ausgangsbeleuchtungsstärke: $E = 300 \text{ lx} \rightarrow E = 500 \text{ lx}$, $E = 500 \text{ lx} \rightarrow E = 300 \text{ lx}$ $E = 500 \text{ lx} \rightarrow E = 1000 \text{ lx}$ $E = 1000 \text{ lx} \rightarrow E = 500 \text{ lx}$, $E = 300 \text{ lx} \rightarrow E = 1000 \text{ lx}$ $E = 1000 \text{ lx} \rightarrow E = 1000 \text{ lx}$</p> <p>Die Sprünge ΔE wurden in zufälliger Reihenfolge gezeigt und bewertet, wobei jede Situation dreimal dargeboten wurde. Je nach Versuchsdurchlauf wurden 11 bis 26 unterschiedliche Sprünge ΔE gezeigt. Nach jedem Sprung erfolgte die Rückkehr in das Ausgangsniveau zur Aufrechterhaltung der Adaptation.</p>	<p>Lichtfarbe CCT: $CCT = 2700 \text{ K} \rightarrow CCT = 6500 \text{ K}$, $CCT = 6500 \text{ K} \rightarrow CCT = 2700 \text{ K}$ $\Delta CCT = 6,0 \cdot 10^{-7} \cdot CCT^{2,231}$</p> <p>Beleuchtungsstärke E: $E = 300 \text{ lx} \rightarrow 1000 \text{ lx}$ $E = 1000 \text{ lx} \rightarrow 300 \text{ lx}$ $\Delta E \approx 5 \%$ Haltezeit $t: t = 1 \text{ s}$ Versuchsreihen:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>VR 1</th> <th>VR 2</th> <th>VR 3</th> <th>VR 4</th> <th>VR 5</th> <th>VR 6</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2700K → 6500K Glg. 1 & E=1000lx</td> <td>6500K → 2700K Glg. 1 & E=1000lx</td> <td>2700K → 6500K Glg. 1 & 1000lx → 300lx ΔE -5%</td> <td>6500K → 2700K Glg. 1 & 1000lx → 300lx ΔE -5%</td> <td>2700K → 6500K Glg. 1 & 300lx → 1000lx ΔE +5%</td> <td>6500K → 2700K Glg. 1 & 300lx → 1000lx ΔE +5%</td> </tr> </tbody> </table>	VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6	2700K → 6500K Glg. 1 & E=1000lx	6500K → 2700K Glg. 1 & E=1000lx	2700K → 6500K Glg. 1 & 1000lx → 300lx ΔE -5%	6500K → 2700K Glg. 1 & 1000lx → 300lx ΔE -5%	2700K → 6500K Glg. 1 & 300lx → 1000lx ΔE +5%	6500K → 2700K Glg. 1 & 300lx → 1000lx ΔE +5%												
VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 5	VR 6																					
2700K → 6500K Glg. 1 & E=1000lx	6500K → 2700K Glg. 1 & E=1000lx	2700K → 6500K Glg. 1 & 1000lx → 300lx ΔE -5%	6500K → 2700K Glg. 1 & 1000lx → 300lx ΔE -5%	2700K → 6500K Glg. 1 & 300lx → 1000lx ΔE +5%	6500K → 2700K Glg. 1 & 300lx → 1000lx ΔE +5%																					
Bewertungs- skala	<table border="1"> <thead> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>nicht wahr-nehmbar</td> <td>gerade wahr-nehmbar</td> <td>sicher wahr-nehmbar</td> <td>zunehmend störend</td> <td>störend</td> <td>zunehmend unerträglich</td> <td>unerträglich</td> </tr> </tbody> </table>	1	2	3	4	5	6	7	nicht wahr-nehmbar	gerade wahr-nehmbar	sicher wahr-nehmbar	zunehmend störend	störend	zunehmend unerträglich	unerträglich	<table border="1"> <thead> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>angenehm</td> <td>vorwiegend angenehm</td> <td>neutral</td> <td>zunehmend störend</td> <td>störend</td> </tr> </tbody> </table>	1	2	3	4	5	angenehm	vorwiegend angenehm	neutral	zunehmend störend	störend
1	2	3	4	5	6	7																				
nicht wahr-nehmbar	gerade wahr-nehmbar	sicher wahr-nehmbar	zunehmend störend	störend	zunehmend unerträglich	unerträglich																				
1	2	3	4	5																						
angenehm	vorwiegend angenehm	neutral	zunehmend störend	störend																						

4 Ergebnisse

4.1 Einfluss der Lichtfarbe

Nach WEBER hängt die Wahrnehmung eines Reizunterschiedes vom Absolutwert ab [13]. Daher wurden für die Bewertungen relative Werte $\Delta E/E_{\text{Ausgangswert}}$ betrachtet. Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Bewertung der Änderung der Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit von der ähnlichsten Farbtemperatur CCT für die Variation von $E = 300 \text{ lx}$ (links) und von $E = 500 \text{ lx}$ (rechts). Dabei konnte kein signifikanter Einfluss der Lichtfarbe zwischen $CCT = 3000 \text{ K}$ und $CCT = 6000 \text{ K}$ nachgewiesen werden. Dieses Resultat steht in Analogie zu den Ergebnissen von BIESKE in [1]: Die subjektive Empfindung von Lichtfarbenunterschieden im Bereich von $E = 300 \text{ lx}$ bis $E = 1000 \text{ lx}$ wird nicht durch die Beleuchtungsstärke beeinflusst. Damit sind lichtfarbenunabhängige Steuerung für Veränderungen der Beleuchtungsstärke möglich.

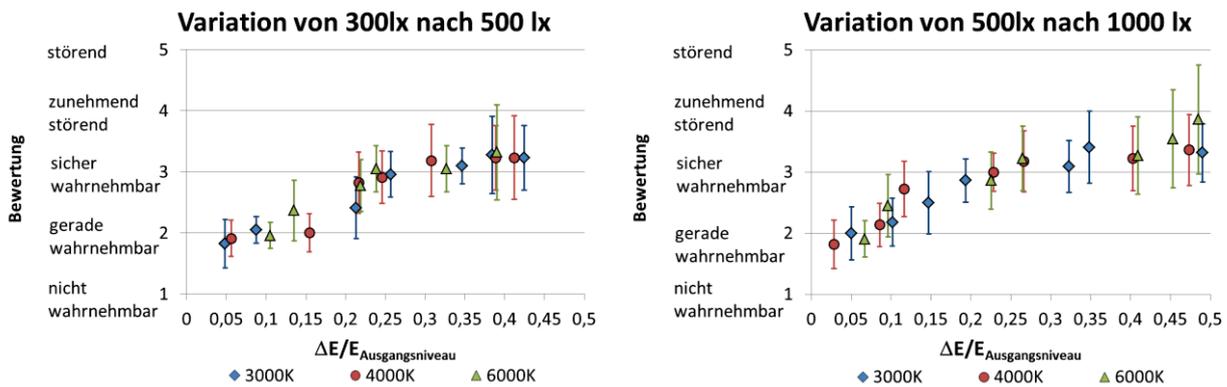


Abbildung 2: Bewertung der Änderung der Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit von der Lichtfarbe (Mittelwert \pm Standardabweichung)

4.2 Einfluss der Variationsrichtung und des Ausgangsbeleuchtungslevel

Aufgrund der Unabhängigkeit von der Lichtfarbe wurden für die weiteren Auswertungen die Daten zusammengefasst. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Variationsrichtung für die Bewertung der relativen Änderung des Beleuchtungslevel keine Bedeutung hat. Damit ist eine richtungsunabhängige Steuerung des Beleuchtungslevel möglich.

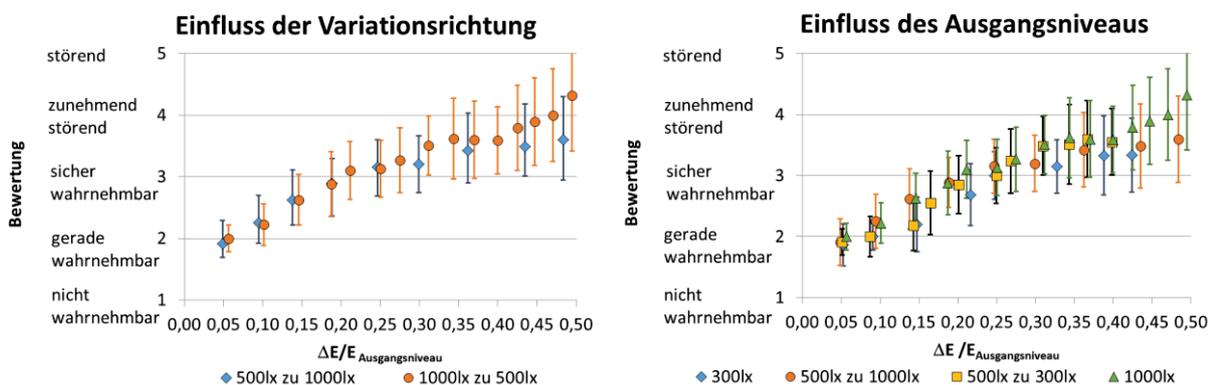


Abbildung 3: Einfluss der Variationsrichtung (links) und Einfluss der Ausgangsbeleuchtungsstärke (rechts), (Mittelwert \pm Standardabweichung)

Wird der Einfluss der Ausgangsbeleuchtungsstärke betrachtet (Abbildung 3 rechts) ist eine starke Überlappung der Bewertungsbereiche für die einzelnen Beleuchtungsstärken erkennbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass im Bereich zwischen $E = 300 \text{ lx}$ und $E = 1000 \text{ lx}$ der Einfluss des Ausgangswerts gering ist.

4.3 Bestimmung von Schwellen- und Toleranzwerten

Werden alle Versuchsreihen betrachtet, ergibt sich, dass bereits die kleinsten mit dem Versuchsbeleuchtungssystem darbietbaren Änderungen der Beleuchtungsstärke für die Mehrheit der Probanden gerade wahrnehmbar sind ($\Delta E/E_{\text{Ausgangswert}} = 3 \%$ bis 5%). Die mittlere Bewertung liegen bei $\geq 1,82 \pm 0,4$ in einem Wertebereich von 1 (nicht wahrnehmbar) bis 3 (deutlich wahrnehmbar). Entsprechend liegt der Schwellenwert bei Werten kleiner $\Delta E/E_{\text{Ausgangswert}} = 5 \%$ Änderung der Beleuchtungsstärke. Für die Bestimmung der

Toleranzwerte wurden kritische Bewertungen zwischen 4 (zunehmend störend) und 7 (nicht akzeptabel) betrachtet. Hierfür wurden die kumulierten Häufigkeiten in Abhängigkeit von den dargebotenen relativen Änderungen der Beleuchtungsstärke für die einzelnen Versuchsreihen ermittelt. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis.

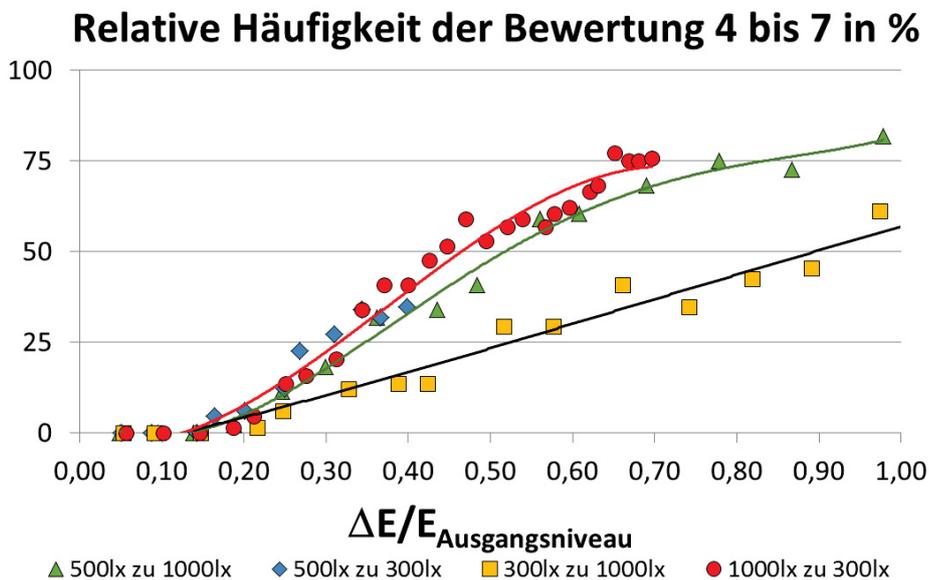


Abbildung 4: Relative Häufigkeit der Bewertungen zwischen 4 (zunehmend störend) und 7 (unzumutbar) in Abhängigkeit von der relativen Änderung der Beleuchtungsstärke

Änderungen zwischen $\Delta E/E_{\text{Ausgangswert}} = 15\%$ bis 20% bewerteten die Probanden zunehmend störend. Um störende Effekte zu vermeiden, ergibt sich ein Toleranzwert für sprunghafte Änderungen des Beleuchtungsniveaus von $\Delta E/E_{\text{Ausgangswert}} = 15\%$. Zu erkennen ist auch, dass die Versuchsreihen ähnlich bewertet werden. Die Variation $E = 300\text{ lx}$ zu $E = 1000\text{ lx}$ wurde jedoch weniger kritisch beurteilt. Das kann damit zusammenhängen, dass in dieser Versuchsreihe die Veränderung in Richtung der präferierten höheren Beleuchtungsstärke erfolgt, da das Beleuchtungsniveau von $E = 300\text{ lx}$ zum Teil als zu dunkel für die Bürosituation empfunden wurde.

4.4 Dynamische Untersuchungen

DOMMASCHK [14] testete die in [1] erarbeiteten Vorgabewerte für die Steuerung der Lichtfarbe für einen realen Raum und bestätigte die Ergebnisse von BIESKE [1]. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen der Untersuchungen zur sprunghaften Variation der Beleuchtungsstärke und unter Einbeziehung der Steuerungsvorgaben für die Variation der Lichtfarbe von Bieske [1] wurden Lichtszenenabläufe entworfen. Dabei wurde die Lichtfarbe zwischen $\text{CCT} = 2700\text{ K}$ und $\text{CCT} = 6500\text{ K}$ variiert und die Beleuchtungsstärke zwischen $E = 300\text{ lx}$ und $E = 1000\text{ lx}$ verändert. Die Parameter sind in Tabelle 1 rechts zu entnehmen. Abbildung 5 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

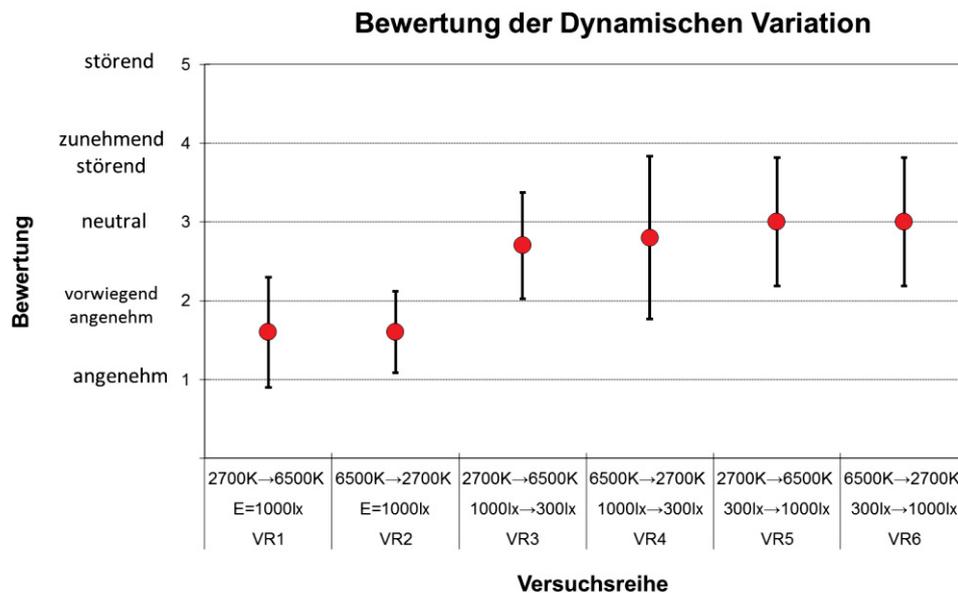


Abbildung 5: Bewertung der dynamischen Versuchsreihen aus Tabelle 1, rechts (Mittelwert \pm Standardabweichung)

Wird die Lichtfarbe bei konstantem Beleuchtungsniveau variiert, liegen die Bewertungen der Probanden im Mittel bei 1,6 zwischen angenehm und vorwiegend angenehm. Grundsätzlich werden die dargebotenen Schrittweiten, die sich an den Schwellwerten orientieren, für die Änderung der Lichtfarbe akzeptiert. Die Ergebnisse früherer Untersuchungen [1] wurden damit für einen realen Raum bestätigt. Im Vergleich zu den Resultaten aus [1] wären eine geringere Änderungsgeschwindigkeit oder eine Begrenzung des Variationsumfangs zu empfehlen, um Probleme, die sich aus der Farbadaptation ergeben können, zu vermeiden. BIESKE schlägt im Bereich zwischen CCT = 3000 K und CCT = 8000 K eine mittlere Änderungsgeschwindigkeit von $v_{\Delta CCT} = 12$ K/s vor.

Werden die Änderung der Lichtfarbe und die Änderung der Beleuchtungsstärke miteinander kombiniert, steigt die mittlere Bewertung der Probanden im Mittel auf 2,7 bis 3. Das bedeutet, dass die zeitgleiche Änderungen beider Parameter zu kritischeren Bewertungen führen. Änderungen der Lichtverhältnisse ziehen immer Adaptationsvorgänge nach sich. Es ist zu erwarten, dass sie in der Kombination von Parametern kritischer sind. Der Einfluss der Änderungsgeschwindigkeit ist in diesem Zusammenhang entscheidend. Auch erscheint eine Begrenzung des Variationsumfangs für einen Zyklus sinnvoll. Dies ist in weiterführenden Untersuchungen zu klären.

5 Zusammenfassung

Aus den in den Untersuchungen gewonnen Erkenntnissen lassen sich Steuerstrategien begründen, wie Übergänge zwischen Beleuchtungsniveaus bei dynamischen Beleuchtungssystemen ausgelegt werden können. Letztlich entscheiden die konkrete Anwendung, und die Berücksichtigung chronobiologische Lichtwirkungen über die Wahl der Parameter und die zeitliche Auslegung.

6 Literatur

- [1] Bieske, K., (2010) Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme, Tönning, Lübeck und Marburg: Der Andere Verlag, 143 Seiten
- [2] Kruithof, A. A., (1941) Röhrenlampen mit Leuchtstoffen für Allgemeine Beleuchtungszwecke, *Philips' Technische Rundschau*, 6 (3), 65-96
- [3] Bodmann, H. W., (1963) Kriterien für optimale Beleuchtungsniveaus, *Lichttechnik*, 15 (1), 24-26
- [4] Boyce, P. R., Cuttle, C., (1990) Effect of correlated colour temperature on the perception of interior and colour discrimination performance, *Lighting Research & Technology*, 22 (1), 19-36
- [5] Han, S., Boyce, P., (2003) Illuminance, CCT, décor and the Kruithof curve, In: *Proceedings - 25th Session of the CIE San Diego (USA)*, 3 - 178ff
- [6] Schwarzer, K., Gottsche, J., Jellinghaus, S., (2006) Was will der Nutzer? Teil 2: Nutzerbefragung, Ergebnisse und Diskussion. *Licht*, 58 (9): 862-867
- [7] Spira, S., (2013) Untersuchung von Lichtfarbenpräferenz und Einfluss des Raumes auf die Farbwiedergabe, Ilmenau: Projektarbeit TU Ilmenau
- [8] Boyton, R. M., (1967) Visibility losses caused by sudden luminance changes, CIE-Proc., Washington, 1-12
- [9] DIN (Deutsches Institut für Normung), (2011), Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten in Innenräumen, DIN EN 12464 Teil 1: 2011, Berlin: Beuth Verlag
- [10] Technischen Regeln für Arbeitsstätten ASR, (2011), Beleuchtung, A3.4: 2011
- [11] Lanthony, P., (1978) The Desaturated Panel D-15, *Dokumenta Ophthalmologica*, 46(1), 185-189
- [12] Ginsburg, A. P., (1984) A New Contrast Sensitivity Vision Test Chart, *American Journal of Optometry & Physiological Optics*, 61(6), 403-407
- [13] Gescheider, G. A., (1985) Psychophysics, London: Lawrence Erlbaum Associates, 2nd Edition
- [14] Dommaschk, A., (2014) Untersuchungen zur Variation von Lichtfarbe und Beleuchtungsniveau bei farbdynamischer Beleuchtung, Ilmenau: Diplomarbeit TU Ilmenau

Lichtfarbenpräferenz unter realen Bedingungen

Karin Bieske, Susanne Spira

Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

Unveröffentlichtes Manuskript

Abstract

Im vorliegenden Beitrag wurde untersucht, welche Lichtfarbe von Probanden bei der Arbeit am Schreibtisch präferiert wird. Dabei wurde sich an frühere Untersuchungen in einem Laboraufbau von BIESKE [1] orientiert. Die Versuchsreihen wurden in einem realen Büroraum für Beleuchtungsstärken von $E = 300$ lx, $E = 500$ lx und $E = 1000$ lx ohne Tageslichteinfluss durchgeführt. Für die Befragungen wurden als ähnlichste Farbtemperaturen für die Ausgangssituation $CCT = 3000$ K, $CCT = 5100$ K und $CCT = 8100$ K verwendet. Probanden wählten für eine Beleuchtungssituation diejenige Lichtfarbe aus, die ihnen am besten gefiel. Im Ergebnis wurden die Resultate von BIESKE für reale Räume bestätigt: Die bevorzugte Lichtfarbe ist unabhängig von der Beleuchtungsstärke im Bereich zwischen $E = 300$ lx und $E = 1000$ lx, jedoch bestimmt die Ausgangsfarbtemperatur die Wahl der präferierten Lichtfarbe.

Schlagwörter: *Bevorzugte Lichtfarbe, Zusammenhang Lichtfarbe und Beleuchtungsniveau*

1 Forschungsgegenstand

Wichtige Parameter bei der Auslegung von Beleuchtungssystemen sind das Beleuchtungsniveau und die Lichtfarbe. In der Literatur sind widersprüchliche Aussagen darüber zu finden, ob es eine Verkopplung beider Größen gibt. Es stellt sich die Frage, ob die Wahl eines Parameters abhängig von der Wahl des anderen Parameters ist oder ob die Auswahl unabhängig voneinander erfolgen kann. Eine Aussage dazu ist wichtig sowohl für die lichttechnische Gestaltung von Innenräumen als auch für die Auslegung von farbdynamischen Beleuchtungssystemen.

2 Stand der Wissenschaft

In der Literatur sind widersprüchliche Aussagen bezüglich des Zusammenhangs zwischen Beleuchtungsstärke und bevorzugter Lichtfarbe zu finden. Nach KRUIITHOF gibt es einen Zusammenhang. Warme Lichtfarben werden danach bei niedrigen Beleuchtungsstärken und kalte Lichtfarben bei hohen Beleuchtungsstärken bevorzugt [2]. Diese Ansicht ist im Bereich der Beleuchtungsplanung international akzeptiert und finden sich in nationalen Richtlinien und Empfehlungen [3], [4]. Andere Untersuchungen zeigen, dass die bevorzugte

Beleuchtungsstärke unabhängig von der Wahl der Lichtfarbe ist [5] bis [8]. Eine Untersuchung von BIESKE an einer Versuchskabine zur Lichtfarbenpräferenz kommt zu dem Ergebnis, dass es keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und bevorzugter Lichtfarbe gibt. Sie zeigte aber auch, dass die Wahl der bevorzugten Lichtfarbe von der Ausgangslichtfarbe und damit von den Adaptationsbedingungen stark beeinflusst wird [1]. Zusätzlich untersuchte BIESKE für die Wahrnehmung von Lichtfarbenunterschieden den Einfluss der Beleuchtungsstärke auf die Schwellen- und Toleranzwerte für die sprunghafte Änderung. Auch hier konnte für Beleuchtungsstärken zwischen $E = 300 \text{ lx}$ und $E = 1000 \text{ lx}$ kein Einfluss auf die Empfindung von Farbveränderungen weißer Lichtfarben festgestellt werden [1].

Basierend auf diesen Ergebnissen leiten sich folgende Forschungshypothesen ab:

- Die Wahl der bevorzugten Lichtfarbe ist unabhängig von der Beleuchtungsstärke.
- Die Ausgangslichtfarbe beeinflusst die präferierte Lichtfarbe so, dass nicht zu große Unterschiede akzeptiert werden.

3 Methode und Versuchsdesign

Die Untersuchung wurde in einem Büroraum der Größe $6,60 \text{ m} \times 4,2 \text{ m} \times 2,8 \text{ m}$ durchgeführt. Die Reflexionsgrade von Wänden, Boden und Decke betragen $\rho_{\text{Wand}} = 0,7$, $\rho_{\text{Boden}} = 0,1$, $\rho_{\text{Decke}} = 0,7$. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsraums und die Anordnung der Leuchten in der Rasterdecke. Abbildung 2 verdeutlicht die Situation im Versuchsraum.

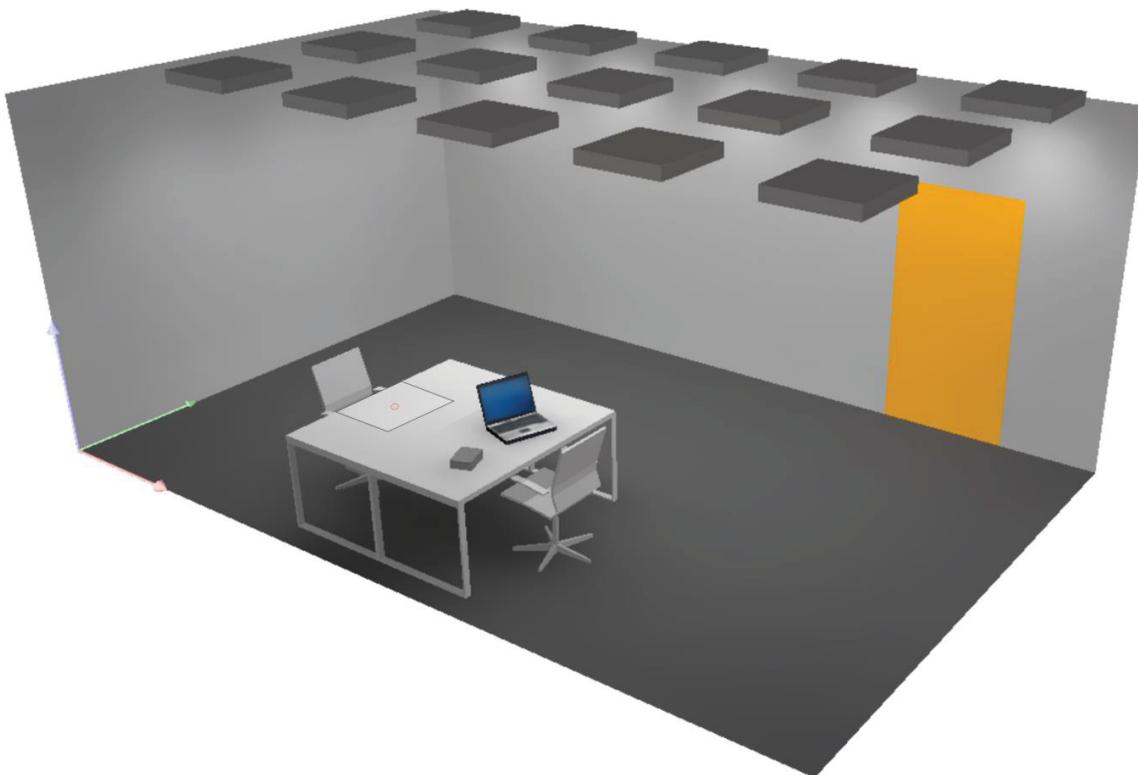


Abbildung 1: Skizze des Versuchsraums, der Bewertungsfläche und der Leuchtenanordnung



Position der Versuchsleiterin



Anordnung der Leuchten im Deckenraster

Blick auf die Bewertungsfläche der Probanden

Abbildung 2: Fotos des Versuchsraums

Fünf Reihen mit je drei Leuchten sind in einer Rasterdecke integriert. Es wurden Leuchten der Firma Philips SmartForm TBS473 mit einer leuchtenden Fläche von 55,5 cm x 55,5 cm verwendet. Sie sind für sechs T5 Leuchtstofflampen ausgelegt und verfügen über elektronische Vorschaltgeräte mit DALI-Schnittstelle. Die Abschlusscheibe ist in OLC-Microlinsenoptik ausgelegt, die die Lichtmischung realisiert. Um hohe ähnlichste Farbtemperaturen CCT zu erzeugen, wurden die Leuchten zusätzlich mit blauen Filtern (LEE 203) versehen. Verwendet wurden je Leuchte zwei Lampen Phillips Master T5 HO 827 24 W und vier Lampen Philips Master T5 HO Activiva Natural 24 W. Für die Ansteuerung wurde die DALI X Touchbox der Firma Tridonic eingesetzt. Abbildung 3 zeigt das Prinzip der Steuerung der Leuchten sowie den Aufbau der Flächenleuchten.

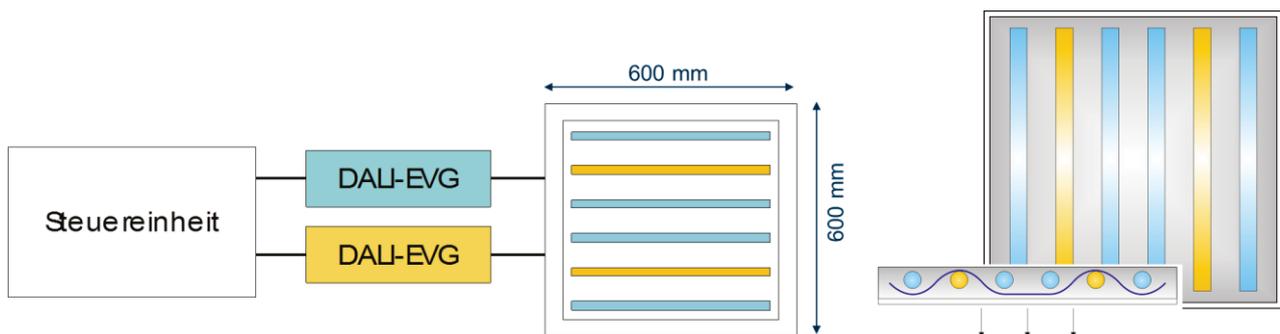


Abbildung 3: Prinzip der Ansteuerung der Flächenleuchten (links) Platzierung des Filters LEE 203 (rechts)

Über die Definition von Gruppen und Szenen wurden Helligkeit und Lichtfarbe der Leuchten für die Versuchsszenen S1 bis S16 definiert. Die Lichtfarbe wurde zwischen ähnlichsten Farbtemperaturen von $CCT = 3000$ K bis $CCT = 8100$ K mit einer Schrittweite von $\Delta CCT = 300$ K variiert. Der allgemeine Farbwiedergabeindex veränderte sich dabei nur gering zwischen Werten von $R_a = 80$ bis $R_a = 90$.

Die Untersuchung erfolgte für Beleuchtungsstärken von $E = 300$ lx, $E = 500$ lx und $E = 1000$ lx. Dabei wurde sich an normativen Vorgaben und Empfehlungen orientiert [9], [10]. Die Variation der Lichtfarben erfolgte beginnend bei $CCT_{adapt} = 3000$ K,

$CCT_{adapt} = 5100\text{ K}$ und $CCT_{adapt} = 8100\text{ K}$. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die realisierten Versuchsszenen, deren Farbörter und ähnlichsten Farbtemperaturen.

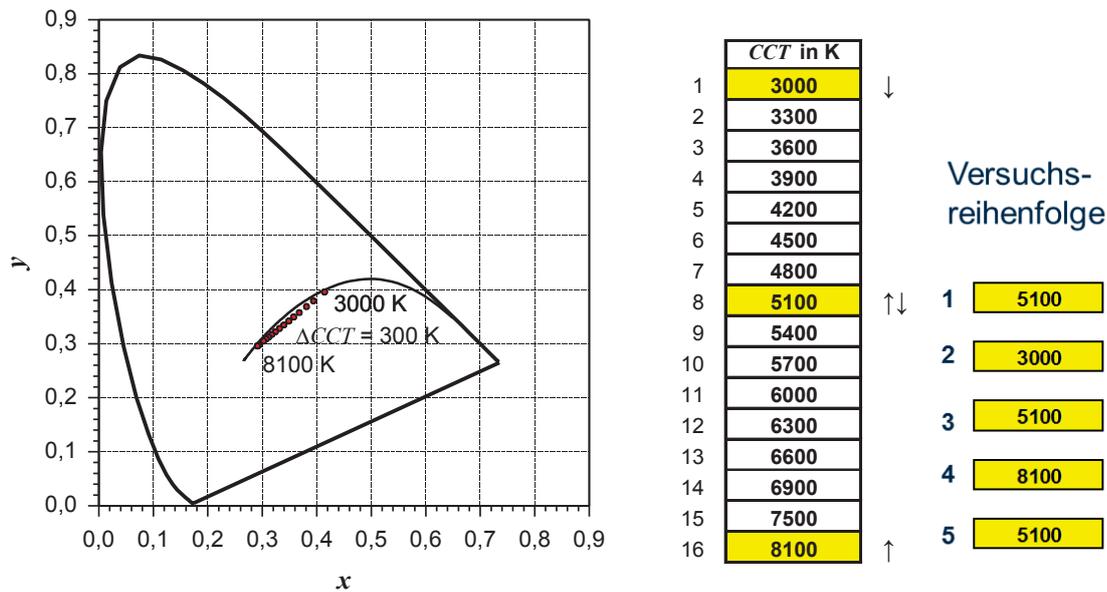


Abbildung 4: Farbörter und ähnlichste Farbtemperaturen für die Versuchsszenen S1 bis S16

Für die einzelnen Versuchsszenen S1 bis S16 wurden die lichttechnischen und farbmetrischen Parameter in der Bewertungsebene bestimmt. Gemessen wurde spektral mit dem Spektralradiometer Specbos 1211 [11] und orts aufgelöst mit der Leuchtdichtemesskamera LMKcolor 4-98 [12].

Als Untersuchungsmethode wurde ein physiologisches Verfahren eingesetzt, bei dem die optimale Lichtfarbe bei gegebener Beleuchtungsstärke und Ausgangslichtfarbe für eine Bürosituation bestimmt wurde. Probanden wählten diejenige Lichtfarbe für eine Beleuchtungssituation ($f(E), f(CCT_{adapt})$) in einer Büroatmosphäre, die ihnen am besten gefällt aus. Jede Versuchssituation wurde dabei dreimal bewertet. Abbildung 5 zeigt den Versuchsablauf schematisch.



Abbildung 5: Versuchsablauf (links) und Test auf Farbtüchtigkeit mit Tafeln zur Prüfung des Farbsinns und Farblegetest von Lanthony (rechts)

Für die statistische Auswertung wurden allgemeine Angaben für die Testperson erhoben. Erfragt wurden Alter, Geschlecht und Präferenzen für Beleuchtung in der Bürosituation. Eignungstests wurden zur Überprüfung der Farbtüchtigkeit der Probanden durchgeführt. Dabei wurden die Tafeln zur Prüfung des Farbsinns [13] und der LANTHONY's desaturated

15 Hue Test [14] verwendet (Abbildung 5 rechts). In der Anlernphase wurden die Probanden über die Aufgabe und Rahmenbedingungen des Versuchs informiert und verschiedene Beleuchtungssituationen gezeigt. Nach einer Adaptationsphase von mindestens 5 Minuten wurden die Versuchsdurchläufe gestartet, die je Beleuchtungsstärke etwa 45 Minuten dauerten.

An der Untersuchung nahmen insgesamt 30 farbtüchtige Probanden (davon 11 Frauen), im Alter zwischen 10 Jahre und 49 Jahre ($\bar{x} 27 \pm 9$ Jahre) teil, wobei jeweils 20 Probanden für jede Beleuchtungsstärke getestet wurden.

4 Ergebnisse

Abbildung 6 fasst die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung zusammen. Dargestellt sind die subjektiven Bewertungen von jeweils 20 Probanden für die bevorzugte Lichtfarbe in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke E und der Ausgangsfarbttemperatur CCT_{adapt} als Ergebnis von jeweils 60 Urteilen.

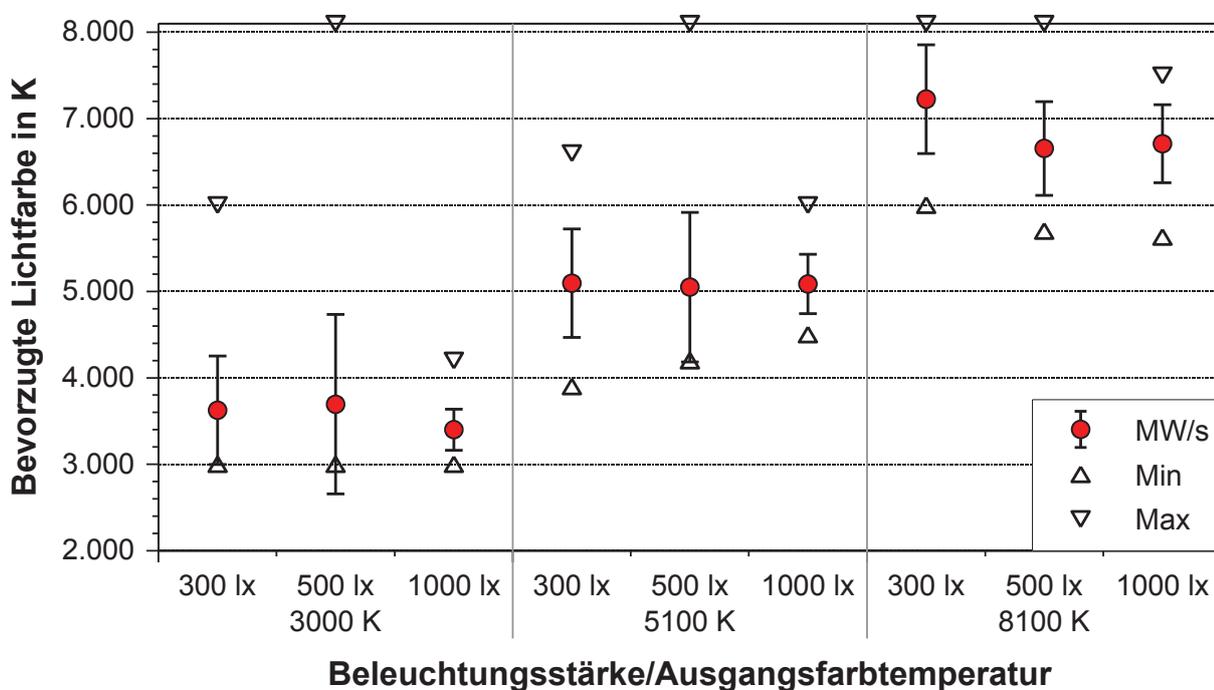


Abbildung 6: Subjektive Bewertungen von jeweils 20 Probanden für die bevorzugte Lichtfarbe in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke und der Ausgangsfarbttemperatur als Ergebnis von jeweils 60 Urteilen (Mittelwert \pm Standardabweichung, Minimum und Maximum)

Zu erkennen ist, dass sich die Bewertungen für verschiedene Beleuchtungsstärken nicht unterscheiden und dass für verschiedenen Ausgangslichtfarben unterschiedlichen Lichtfarben bevorzugt werden. Erfolgt die Adaptation bei niedriger ähnlichster Farbttemperatur ($CCT_{\text{adapt}} = 3000$ K) werden eher warme Lichtfarben präferiert. Die Mittelwerte lagen dabei im Bereich zwischen $CCT = 3400$ K bis $CCT = 3500$ K. Hat die Ausgangslichtfarbe eine hohe ähnlichste Farbttemperatur ($CCT_{\text{adapt}} = 8100$ K) werden eher kältere Lichtfarben gewählt. Diese lagen im Mittel im Bereich zwischen $CCT = 6800$ K und $CCT = 7200$ K. Für neutrale Lichtfarben ($CCT = 5100$ K) liegt die Präferenz auch in diesem Bereich mit mittleren Werten zwischen $CCT = 4950$ K und $CCT = 5050$ K.

Die Versuchsdaten wurden mit dem Verfahren der multivariaten Varianzanalyse im Statistikprogramm SPSS 20.0 analysiert. Die statistische Auswertung ergab die Unabhängigkeit der Messwiederholung ($p = 0,957$) für die jeweils drei Urteile einer Testperson je Versuchssituation, die Unabhängigkeit von der Beleuchtungsstärke ($p = 0,073$) und die Abhängigkeit von der Ausgangslichtfarbe ($p = 0,005$). Damit wurden die im Laborversuch von BIESKE gefundenen Ergebnisse für einen realen Büroraum bestätigt.

Zusätzlich wurden die Daten auf einen Einfluss von Alter und Geschlecht getestet. Dabei zeigte sich kein signifikanter Einfluss. Jüngere Probanden, im Alter bis 25 Jahre, wählen keine anderen Lichtfarben als ältere Testpersonen ($p = 0,728$). Frauen bevorzugen die gleichen Lichtfarben wie Männer ($p = 0,537$) [15]. In Auswertung der individuellen Präferenz sprachen sich die Probanden klar für eine Beleuchtungsstärke von $E = 1000$ lx aus. 18 von 20 Probanden wählten eine neutrale Lichtfarbe von $CCT = 5100$ K als angenehm für eine Bürotätigkeit aus [15].

5 Diskussion und Zusammenfassung

Die Untersuchung zeigt, dass es keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke und der bevorzugten Lichtfarbe gibt. Die Erkenntnisse von KRUTHOF, wonach bei niedrigen Beleuchtungsstärken niedrigere Farbtemperaturen bevorzugt werden und bei höheren Beleuchtungsstärken höhere Farbtemperaturen angenehmer sind, konnten nicht bestätigt werden [2].

Die Resultate stimmen jedoch mit den Aussagen anderer Untersuchungen überein. HAN und BOYCE untersuchten den Zusammenhang zwischen Beleuchtungsniveau und Lichtfarbe an einem 1:12-Modell eines Büroraums. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass im Bereich zwischen $CCT = 3000$ K und $CCT = 6500$ K die akzeptierten Beleuchtungsstärken stabil zwischen $E = 300$ lx und $E = 900$ lx liegen und die Akzeptanz der Lichtfarbe unabhängig vom Beleuchtungsstärke ist [7].

BOYCE und CUTTLE untersuchten Beleuchtungsstärken von $E = 30$ lx bis $E = 600$ lx und Lichtfarben zwischen $CCT = 2700$ K und $CCT = 6300$ K bei ähnlichen Farbwiedergabeeigenschaften in einem realen Raum. Sie kamen zu dem Schluss, dass für die Beurteilung des Raumeindrucks das Beleuchtungsniveau entscheidend ist, die Lichtfarbe jedoch kaum Einfluss auf die Bewertung hat, sobald sich die Probanden ausreichend an die Lichtfarbe gewöhnt haben. Der Verzicht auf hohe ähnlichste Farbtemperaturen bei geringen Beleuchtungsstärken ist nach Ansicht von BOYCE und CUTTLE nicht nachvollziehbar und nicht sinnvoll [6].

POLLE und PICKELEIN untersuchten den Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke ($E = 100$ lx bis $E = 2000$ lx) und Lichtfarbe ($CCT = 2500$ K bis $CCT = 15000$ K) in einem Büroraum für simulierte Tag- und Nachtsituationen bei indirekter Beleuchtung [16]. Sowohl für die Tag- als auch für die Nachtsituation wurden bei allen untersuchten Beleuchtungsstärken die Lichtfarben $CCT = 4000$ K und $CCT = 6000$ K hinsichtlich des Wohlbefindens am besten bewertet. Warme Lichtfarben ($CCT \leq 3000$ K) wurden deutlich schlechter beurteilt. Hier zeigt sich ebenfalls ein Widerspruch zu den Erkenntnissen von KRUTHOF.

Mit den vorliegenden Untersuchungsergebnissen zur bevorzugten Lichtfarbe wird die Unabhängigkeit von Beleuchtungsstärke und Lichtfarbe bestätigt. Dies bedeutet, dass bei der Beleuchtungsplanung die Parameter Beleuchtungsstärke und Lichtfarbe unabhängig voneinander gewählt werden können. Auch bei der Auslegung dynamischer Beleuchtungssysteme kann die Steuerung unabhängig voneinander erfolgen.

Die durchgeführte Untersuchung zeigt jedoch auch, dass die Wahl der bevorzugten Lichtfarbe stark von der Ausgangslichtfarbe beeinflusst wird. Damit lässt sich für die

bevorzugte Lichtfarbe kein einzelner Wert angeben. Lichtfarben zwischen $CCT = 3000\text{ K}$ bis $CCT = 8100\text{ K}$ wurden im Rahmen der Untersuchungen von den Probanden akzeptiert.

Auf Grundlage der Arbeiten von BIESKE [1] und HANISCH und TRALAU [17] wurde ein Zusammenhang der Wahl der bevorzugten Lichtfarbe und der Ausgangsfarbttemperatur bestimmt. Abbildung 6 links zeigt diesen Zusammenhang ergänzt durch die Ergebnisse der vorgestellten Untersuchung. Zu erkennen ist, dass die Untersuchung zur Lichtfarbenpräferenz im realen Büroraum zu ähnlichen Resultaten wie bei früheren Untersuchungen führt.

Basierend auf diesen Daten kann der Änderungswunsch als Differenz zwischen der Ausgangsfarbttemperatur und der bevorzugten Farbtemperatur bestimmt werden. Abbildung 7 rechts stellt diesen Sachverhalt nach BIESKE [1] dar. Danach ist der Änderungswunsch im Bereich neutraler Lichtfarben am geringsten.

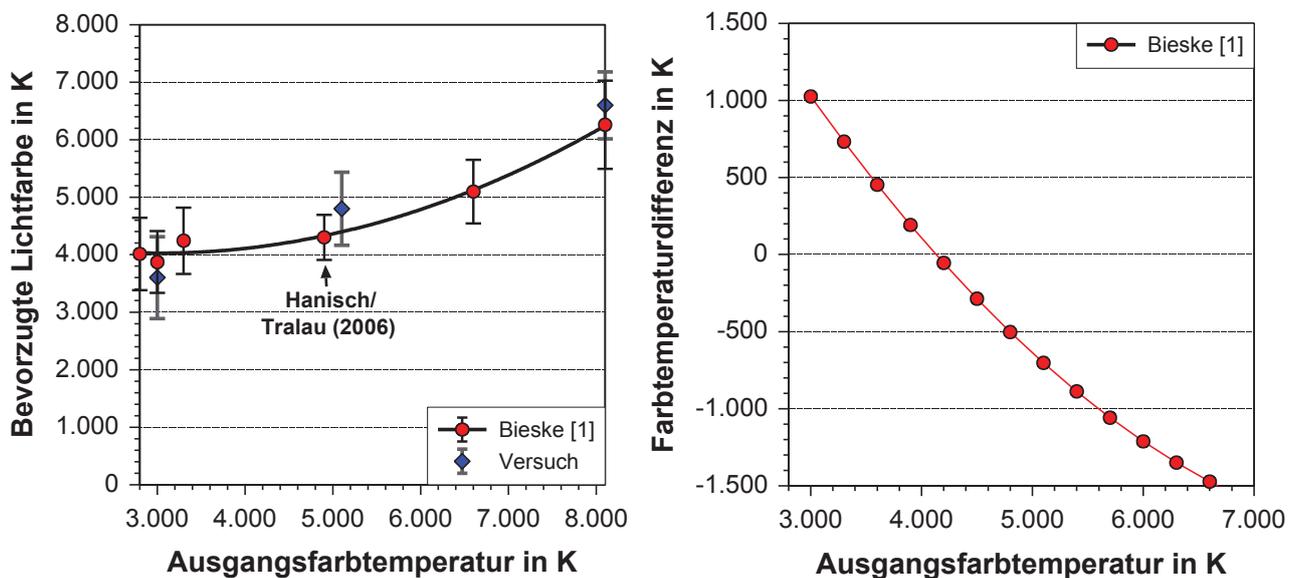


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen der bevorzugten Lichtfarbe und der Ausgangslichtfarbe auf Basis der Untersuchungen von BIESKE [1] (Diss. KB), HANISCH und TRALAU [15] sowie des in diesem Beitrag beschriebenen Versuchs (Versuch) (Mittelwert \pm Standardabweichung)

6 Literatur

- [1] Bieske, K., (2010) Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme, Tönning, Lübeck und Marburg: Der Andere Verlag, 143 Seiten
- [2] Kruithof, A. A., (1941) Röhrenlampen mit Leuchtstoffen für Allgemeine Beleuchtungszwecke, *Philips' Technische Rundschau*, 6 (3), 65-96
- [3] Kramer, A., (2001) Krankenhaus- und Praxishygiene. München: Urban & Fischer Verlag, 1. Auflage, 160 Seiten
- [4] Rietz, A. (Hrsg.) (2007) Kompetenzzentrum „Kostengünstig qualitätsbewusstes Bauen im IEMB), Gesundes Wohnen, Meckenheim: DCM Druck Center
- [5] Bodmann, H. W., (1963) Kriterien für optimale Beleuchtungsniveaus, *Lichttechnik*, 15 (1), 24-26
- [6] Boyce, P. R., Cuttle, C., (1990) Effect of correlated colour temperature on the perception of interior and colour discrimination performance, *Lighting Research & Technology*, 22 (1), 19-36
- [7] Han, S., Boyce, P., (2003) Illuminance, CCT, décor and the Kruithof curve, In: *Proceedings - 25th Session of the CIE San Diego (USA)*, 3 - 178ff
- [8] Schwarzer, K., Gottsche, J., Jellinghaus, S., (2006) Was will der Nutzer? Teil 2: Nutzerbefragung, Ergebnisse und Diskussion. *Licht*, 58 (9): 862-867
- [9] DIN (Deutsches Institut für Normung), (2011), Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten in Innenräumen, DIN EN 12464 Teil 1: 2011, Berlin: Beuth Verlag
- [10] Technischen Regeln für Arbeitsstätten ASR, (2011), Beleuchtung, A3.4: 2011
- [11] Specbos 1211 Datenblatt. abrufbar online unter http://www.jeti.com/cms/images/jeti_com/down/data_sheets/instruments/scb1211.pdf zuletzt aufgerufen Juni 2014
- [12] TechnoTeam, LMK color Produktinformationen, abrufbar online unter http://www.technoteam.de/produktuebersicht/lmk/produkte/index_ger.html zuletzt aufgerufen Juni 2014
- [13] Broschmann, D., Kuchenbecker, J. (Hrsg.), (2011) Tafeln zur Prüfung des Farbensinnes, 34., überarbeitete Auflage, Stuttgart: Thieme, 64 Seiten
- [14] Lanthony, P., (1978) The Desaturated Panel D-15, *Dokumenta Ophthalmologica*, 46(1), 185-189
- [15] Spira, S., (2013) Untersuchung von Lichtfarbenpräferenz und Einfluss des Raumes auf die Farbwiedergabe, Ilmenau: Projektarbeit TU Ilmenau
- [16] Polle, D., Picklein, A., (2005) Beleuchtungsniveau und Lichtfarbe, In: *Proceedings LUX Europa*. Berlin, 379-381
- [17] Hanisch, M., Tralau, B. (2006) Subjektive Bewertung von Beleuchtungssituationen mit einer Hybridlampe. Ilmenau: Medienprojekt TU Ilmenau

Bestimmung eines Reflexionsnormals für Kontrastwiedergabe-Messungen

*Carsten Funke, Michael Deter, Christoph Hupe, Robert Skoczowsky, Christoph Schierz
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik*

Tagung LICHT 2014, Den Haag, Tagungsband

Abstract

Bei Büroarbeitsplätzen spielt die Kontrastwiedergabe eine wichtige Rolle. Zur Beschreibung der Kontrastwiedergabe wurde in den 80er Jahren das CRF-Verfahren entwickelt. Mit der ortsauflösenden Leuchtdichtemesstechnik ist es mittlerweile möglich, auch CRF-Messungen orts aufgelöst durchzuführen. Dafür wird ein hinreichend großes Reflexionsnormal benötigt, welches die heute typischen Sehaufgaben am Arbeitsplatz repräsentiert. Um ein derartiges Normal bestimmen zu können, wurde zunächst eine Umfrage online unter Büroangestellten durchgeführt und ausgewertet. Aus dieser Umfrage ging erwartungsgemäß hervor, dass es sich beim meistgenutzten Papier im Büro und Kopierpapier mit 80 g/m² handelt. Weiterhin werden in erster Linie Laseraufdrucke verwendet, gefolgt von Kugelschreiber und Tintenaufdrucke. Neben den beleuchteten Sehaufgaben spielen selbstleuchtende Geräte (z.B. Smartphones, Tablets) eine immer größere Rolle. Die Anforderungen an das Normal müssen sich daran orientieren.

Um diese Werte lichttechnisch zu erfassen, wurden zwei Messverfahren eingesetzt. Bei dem ersten Prinzip handelt es sich um einen Goniometeraufbau mit Spektralradiometer, ähnlich dem klassischen CRF-Verfahren [1]. Beim zweiten Prinzip wurde eine ortsaufgelöst messende Leuchtdichtemesskamera (LMK) eingesetzt. Beiden Aufbauten wurde eine bewegliche Lichtquelle (Halogenleuchtstofflampe) hinzugefügt, sodass verschiedene Beleuchtungswinkel einstellbar sind. Aus den Messungen werden die Leuchtdichtefaktoren für verschiedene Proben bestimmt.

Für vorwiegend diffus reflektierende Proben konnte eine gute Übereinstimmung von punktueller Leuchtdichtemessung (Spektralradiometer) und ortsaufgelöster Leuchtdichtemessung (LMK) erreicht werden. Bei vorwiegend glänzenden Oberflächen (Glanzpapier, Tablet) weichen die Messergebnisse aber stark voneinander ab, sodass die Messaufbauten hinsichtlich Präzision und Stabilität für eine exakte Messung noch optimiert werden müssen, um Anforderungen für ein Kontrastwiedergabenormal definieren zu können.

Schlagwörter: CRF, Reflexblendung, Contrast Rendering Factor, Kontrastwiedergabe

1 Einleitung

In der Innenraumbeleuchtung spielt neben der Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche die Wiedergabe von Kontrasten eine entscheidende Rolle. Der Kontrast wird aus den Leuchtdichten von Sehdetail L_o und dessen unmittelbarer Umgebung L_u bestimmt:

$$C = \frac{L_u - L_o}{L_u} \quad (1)$$

Abhängig von der Lichteinfallrichtung auf die Sehaufgabe kann der Kontrast unterschiedlich wiedergegeben werden. Zur Beschreibung der Kontrastwiedergabe wurde in der LiTG-Publikation Nr. 13 [1] wurde mit dem Kontrastwiedergabefaktor CRF (Contrast Rendering Factor) ein Gütemerkmal angegeben:

$$CRF = \frac{C}{C_0} \quad (2)$$

In dieser Gleichung ist C der Kontrast der Sehaufgabe bei der aktuellen Beleuchtung und C_0 der Kontrast bei einer vollkommen diffusen Beleuchtung. Der CRF-Wert korreliert sehr gut mit der empfundenen Kontrastwahrnehmung bei verschiedenen Beleuchtungssituationen [2]. Jedoch hat sich das Verfahren in der Praxis nicht durchgesetzt, da beim bisherigen Messvorgang auf der Tischplatte 112 Punkte einzeln mit einem Leuchtdichtemesskopf vermessen werden mussten. In vorangegangenen Untersuchungen [3; 4] konnte gezeigt werden, dass das CRF-Verfahren auch mit einer Leuchtdichtemesskamera (LMK) anstatt des Brüel & Kjaer-Leuchtdichte-Messgeräts durchgeführt werden kann. Um den gesamten aktiven Bereich mit einem Bild messen zu können, benötigt man jedoch ein ausreichend großes Reflexionsnormal, mit welchem man die Kontrastwiedergabe für verschiedene Sehaufgaben ableiten kann. Derartige Reflexionsnormale sind derzeit nicht am Markt verfügbar.

In dieser Untersuchung wurden zunächst typische Sehaufgaben mit einer Umfrage unter Büroangestellten ermittelt und daraus die notwendigen Eigenschaften für die Reflexionsnormale abgeleitet. In diversen Versuchen wurden dann mehrere Reflexionsplatten hergestellt, um die geforderten Eigenschaften zu erreichen.

2 Umfrage: Typische Sehaufgaben im Bürobereich

In der Umfrage wurden neben der allgemeinen Arbeitsplatzgestaltung (Größe und Beschaffenheit der Schreibtischfläche, Größe und Ausrichtung des Monitors, etc.) vor allem die Eigenschaften der typischen Sehaufgaben während eines Arbeitstages abgefragt. Zu den Sehaufgaben gehören Computeranwendungen, die Tastatur, verschiedene Papiersorten sowie deren Aufdrucke. Die Umfrage wurde online an verschiedenen Büroarbeitsplätzen durchgeführt. Im Wesentlichen handelte es sich hier um Universitätsbüros der Technischen Universität Ilmenau (wobei zwischen Lehre/Forschung und Verwaltung unterschieden wird), Büros in Handels-, Dienstleistungs- und Industrieunternehmen und in der öffentlichen Verwaltung (vgl. Abb. 1). Insgesamt wurden 207 Personen befragt, davon 112 Frauen und 95 Männer (Altersdurchschnitt ca. 40 Jahre, vgl. Abb. 2)

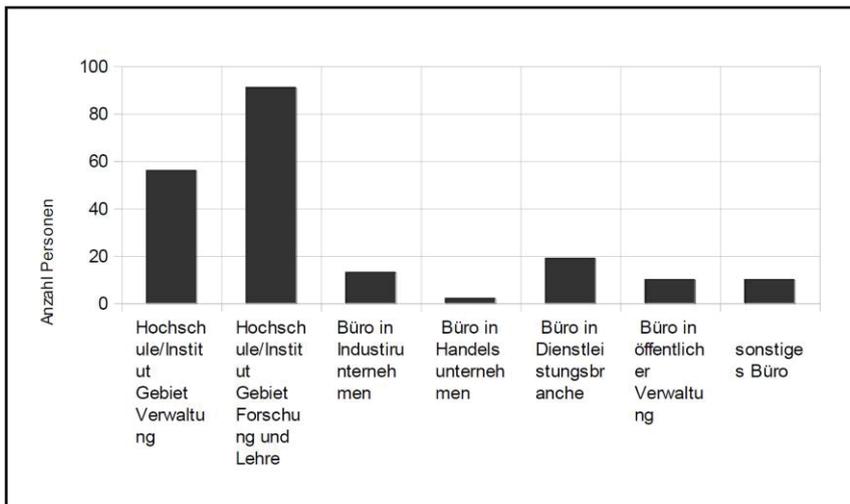


Abbildung 1: Berufsgruppen der Umfrageteilnehmer.

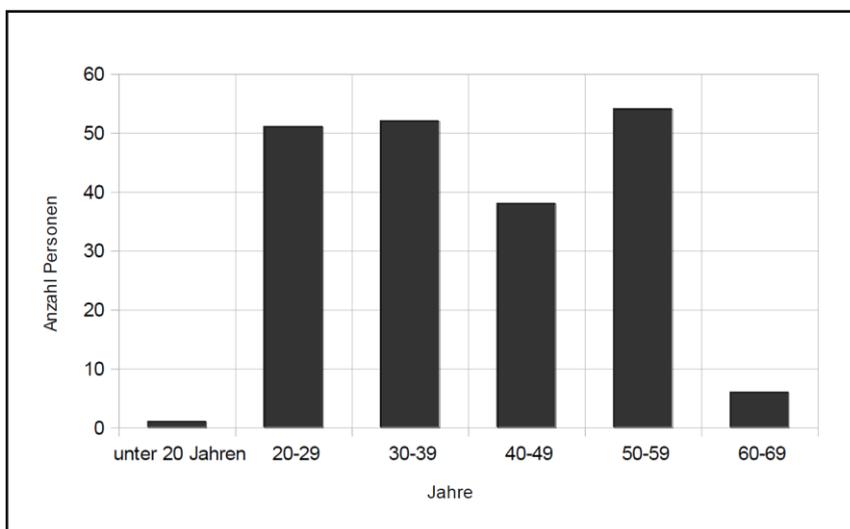


Abbildung 2: Altersstruktur der Umfrageteilnehmer.

Aus der Abb. 3 ist zu erkennen, dass die am häufigsten verwendete Papiersorte weißes Druckerpapier ist, denn ca. 60 % der befragten Personen verwenden dieses sehr häufig. Weiter verwenden 50 % der Befragten Klebezettel regelmäßig bis sehr häufig. Von noch ca. 25 % der Befragten wird kariertes bzw. liniertes Schreibpapier verwendet. Glänzende Papiersorten wurden von den Befragten eher selten verwendet. Bei den Aufdrucken (vgl. Abb. 4) verwendeten 60 % der Befragten sehr häufig schwarze und farbige Aufdrucke mittels Laserdrucker. Weitere 30 % verwenden diese noch regelmäßig bis häufig. Der Kugelschreiber wird von 60 % der Befragten regelmäßig bis sehr häufig verwendet. Auch Tablet-PCs werden immer häufiger eingesetzt. Über 80 % der 207 befragten Personen gaben an, Tablet-PCs durchschnittlich eine Stunde pro Tag am Arbeitsplatz zu benutzen.

Folglich müssen Reflexionsnormale für den Bürobereich sowohl für Standard- (Kopierpapier mit Laseraufdruck) als auch hochglänzende Anwendungen geschaffen werden. Die Größe eines Reflexionsnormals soll 420 x 300 mm betragen (vgl. [1]).

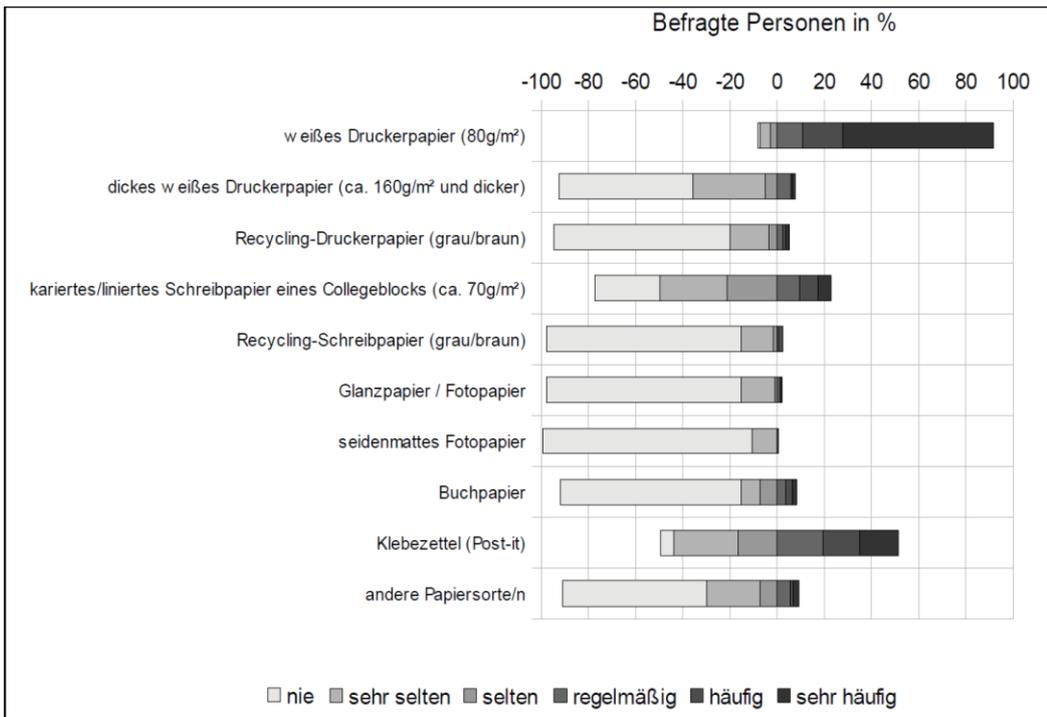


Abbildung 3: Häufigkeit der eingesetzten Papiersorten (von durchschnittlich 180 befragten Personen)

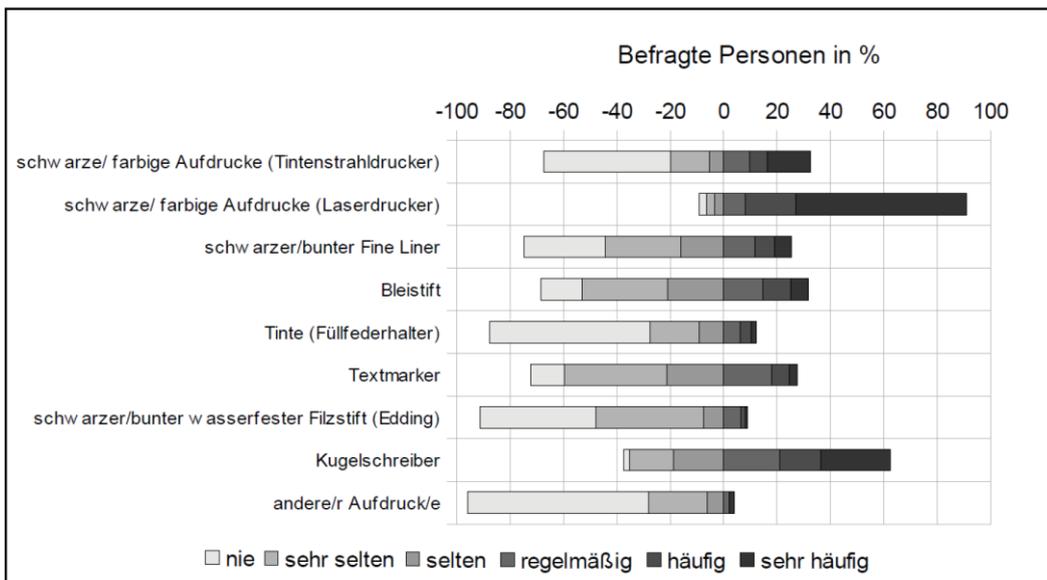


Abbildung 4: Häufigkeit der verwendeten Aufdrucke (von durchschnittlich 170 befragten Papiersorten)

3 Messmethode und -aufbau

Die zur Anwendung kommenden Messprinzipien beruhen in allen Fällen auf einer Leuchtdichtemessung auf der Probenoberfläche. Dafür werden verschiedene Messungen durchgeführt und daraus der Leuchtdichtefaktor für die jeweilige Probe bestimmt. Die Bestimmung des Leuchtdichtefaktors geschieht, um die Proben miteinander vergleichen zu können. Sind die Leuchtdichtefaktoren für die jeweiligen Beobachtungs-, wie Beleuchtungswinkel gleich, bzw. sehr ähnlich, kann darauf geschlossen werden, dass auch der erzielte CRF-Wert identisch ist. Auf diese Weise wird versucht Materialkombinationen zu finden, welche als Reflexionsnormal dienen können.

Der Leuchtdichtefaktor berechnet sich wie folgt:

$$\beta_{vp}(\gamma) = \frac{L_{vp}(\gamma)}{L_{vw}} \quad (3)$$

L_{vp} und L_{vw} sind die jeweiligen Leuchtdichten von Probe und vollkommen mattweißer Referenz. Als Referenz diente eine mattweiße Keramikoberfläche. Insgesamt wurden 25 schwarze und weiße Proben mit unterschiedlichem Glanzgrad vermessen.

Das Messprinzip mit dem JETI Specbos 1201 ist ähnlich aufgebaut wie das Gerät von Brüel & Kjaer [1]. Allerdings sind Beleuchtung und Messgerät voneinander getrennt verstellbar und erlauben so verschiedene Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel. Die entsprechenden Winkelbereiche wurden in entsprechender Auflösung einzeln nacheinander eingestellt und die Proben vermessen werden (s. Abb. 5). Für jede Probe wurden die Leuchtdichten für die Beobachtungswinkel 5° , 25° , 45° und für die Beleuchtungswinkel im Winkelbereich von 0° bis 80° aufgenommen. Der Beleuchtungswinkel wird dabei in 10° -Schritten abgefahren, analog dem in [1] beschriebenen Vorgehen.

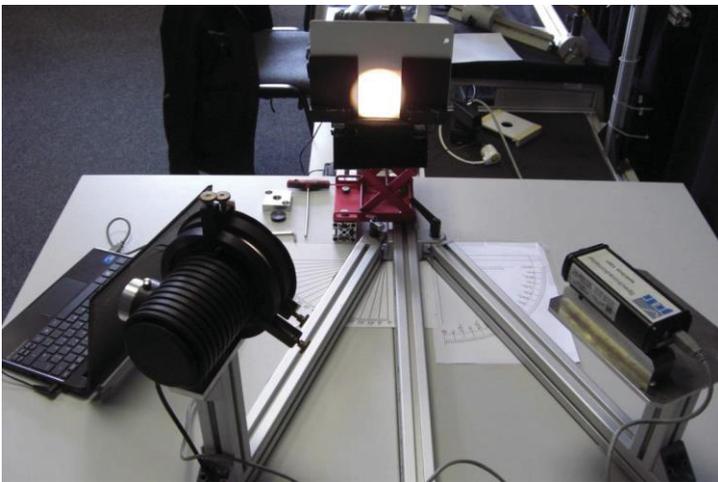


Abbildung 5: Messaufbau mit Spektralradiometer und Beleuchtung

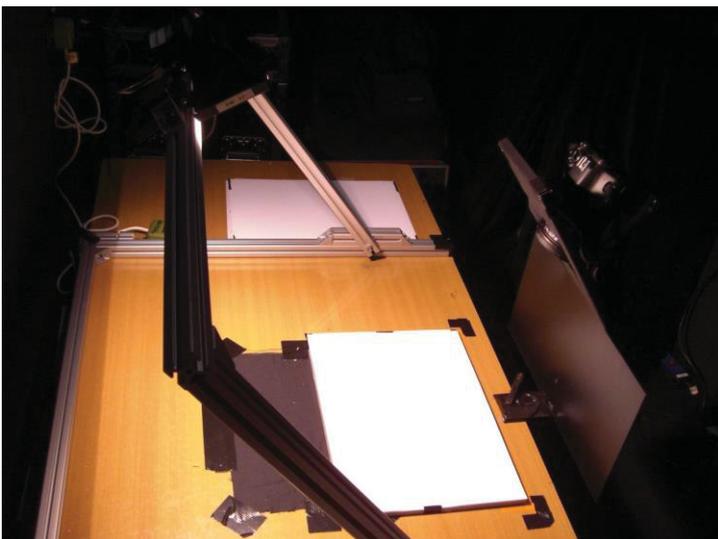


Abbildung 6: Messaufbau mit LMK und Beleuchtung

Der Messaufbau mit der Leuchtdichtemesskamera LMK mobile basiert im Wesentlichen auf dem Messplatzaufbau des Unternehmens Zumtobel [4]. Die dort genannten Anforderungen wurden übernommen. Dazu zählen etwa Kompaktheit und die Möglichkeit den Messaufbau auch in realen Büros außerhalb des Labors nutzen zu können. Daher wird die Leuchtdichtemesskamera auf einem Gestell aus Aluminiumprofilen am Tisch befestigt. Weiter zählt zum Aufbau ein Normabschattkörper, welcher in seiner Dimensionierung eine vor dem Bewertungsfeld sitzende Person nachbilden soll (vgl. [1]). Zusätzlich wird auf dem Tisch ein Gestell positioniert, das ebenfalls aus Aluminiumprofilen besteht und einen 100 W Halogenstrahler trägt. Dieser Strahler kann durch das Gestell um die Querachse des Bewertungsfeldes gedreht werden, womit verschiedene Licht-einfallswinkel realisiert werden können (s. Abb. 6).

4 Ergebnisse

Für matte Proben konnten gute Übereinstimmungen zwischen Spektralradiometer-messung und Leuchtdichtemesskamera erreicht werden, unabhängig davon ob es sich um weiße oder schwarze Proben handelt (vgl. Abb. 7, Zumtobel schwarz). Je höher jedoch der gerichtete Anteil der Reflexion auf der Probenoberfläche ist, desto größere Unterschiede ergaben sich zwischen der ‚konventionellen‘ und der orts aufgelösten Messung (vgl. Abb. 7, Fotogloss / Glas).

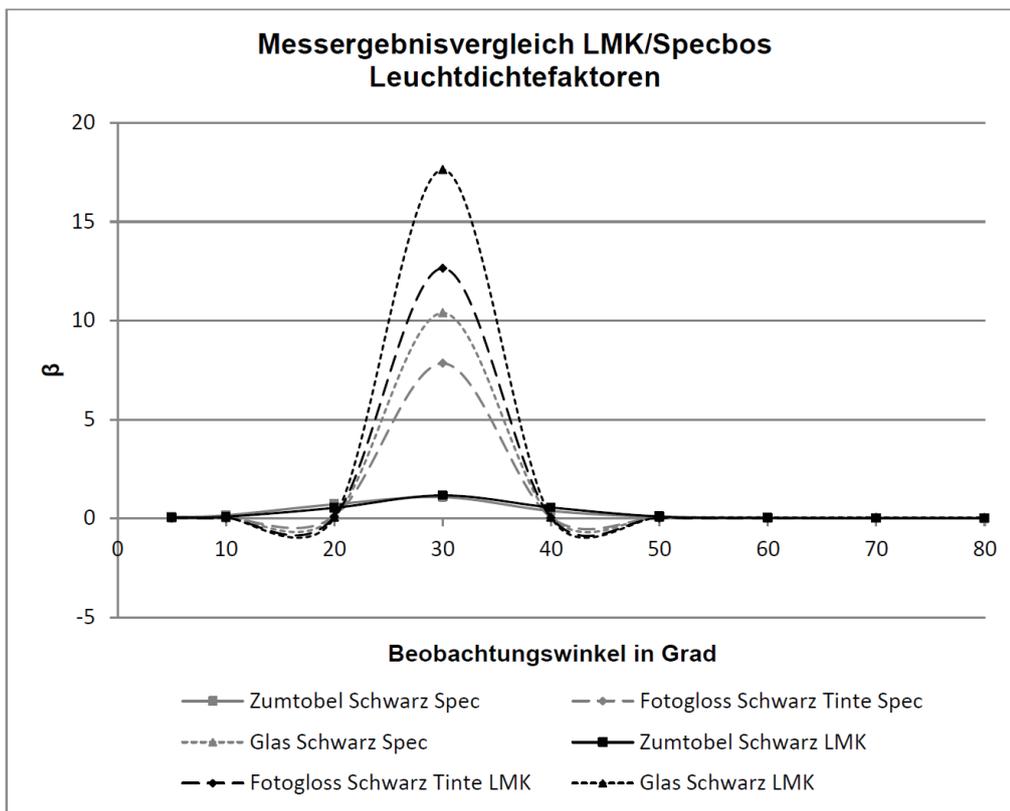


Abbildung 7: Vergleich der Messergebnisse für ausgewählte schwarze Proben. Zumtobel Schwarz ist ein matt pulverbeschichtetes Aluminiumblech, Fotogloss Schwarz ist schwarz bedrucktes hochglänzendes Papier und Glas Schwarz ist Floatglas auf mattschwarzem Papier (Simulation „dunkles Tablet“).

Um diese Messunterschiede zu beseitigen, wurden verschiedene Untersuchungen für ausgewählte Proben unternommen. Unter anderem wurden die Messgeräte und die Messaufbauten getauscht, die elastischen Proben auf stabile Trägerplatten aufgeklebt und

die Messgeometrien überprüft. Trotz dieser Verbesserungen konnte noch keine hinreichende Übereinstimmung erzielt werden.

Für die Standardanwendung (Laserdruck auf Kopierpapier) konnte ein pulverbeschichtetes schwarzes Aluminiumblech hergestellt werden (vgl. Abb. 8), welches sowohl die Reflexionseigenschaften eines Laseraufdrucks hinreichend nachbildet, als auch hinsichtlich Langzeitstabilität, Verfügbarkeit und Herstellungskosten für orts aufgelöste CRF-Messungen geeignet ist. Eine geeignete weiße Probe konnte noch nicht gefunden werden.

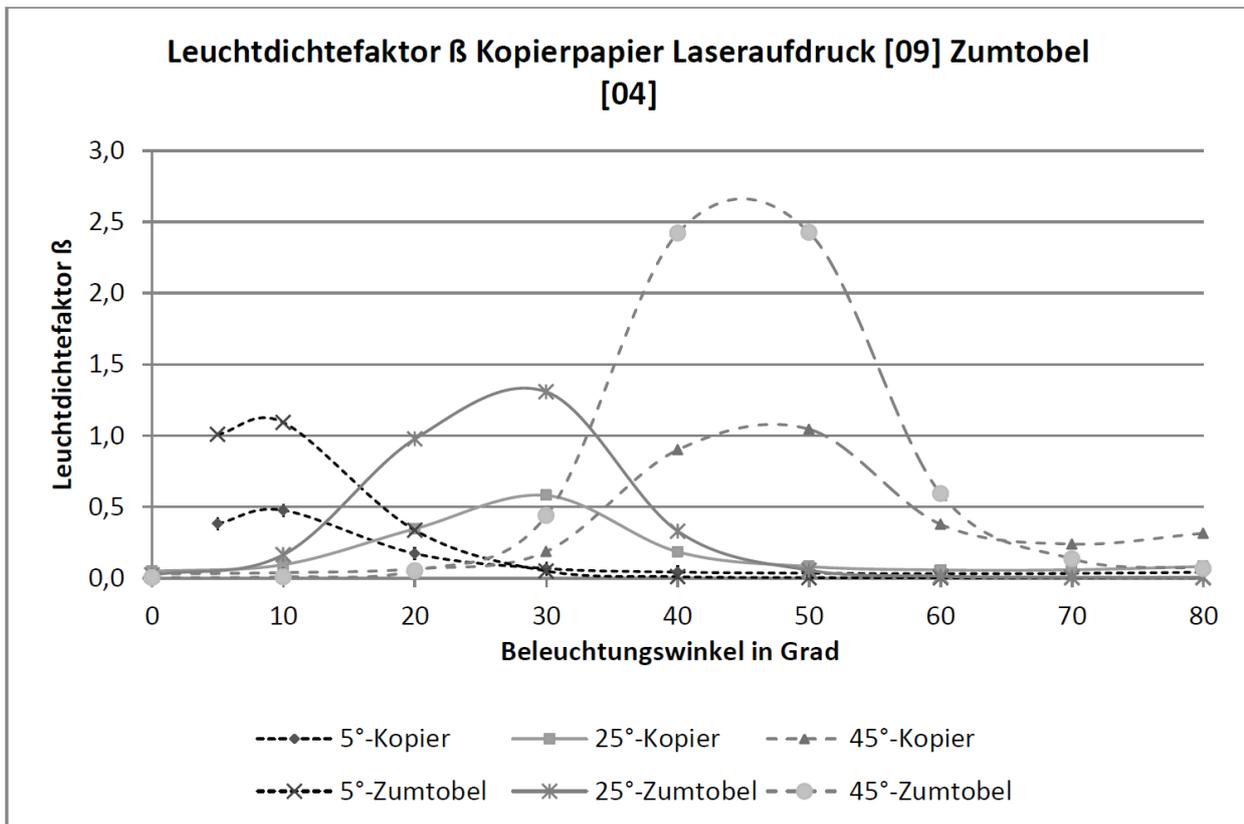


Abbildung 8: Vergleich der Messergebnisse des Spektralradiometers für schwarzen Laseraufdruck auf Kopierpapier und ein mattschwarz pulverbeschichtetes Aluminiumblech. 5°, 25° und 45° stellen jeweils die Beobachtungswinkel dar.

5 Diskussion und Ausblick

Die Messunterschiede zwischen der punktuellen Messung mit Spektralradiometer und Leuchtdichtemesskamera könnten nach Ansicht der Autoren darauf zurückzuführen sein, dass besonders im Bereich Einfallswinkel = Ausfallswinkel bei hochglänzenden Proben auch kleinste geometrische Abweichungen zu erheblichen Messfehlern führen. Dieser Einfluss wird in einer nachfolgenden Untersuchung mit feineren Winkelschritten in diesem Bereich näher betrachtet.

Sobald die Messabweichungen beseitigt sind, können Reflexionsnormale für hochglänzende Sehaufgaben definiert werden. Anschließend soll mit psychometrischen Untersuchungen überprüft werden, inwiefern die gemessenen CRF-Werte des neuen Reflexionsnormals mit den Probandenurteilen übereinstimmen. Neben der Lesbarkeit sollen die Testpersonen auch die Störung durch Reflexionen von LED-Matrix-Leuchten auf der Arbeitsfläche bewerten.

6 Literatur

- [1] Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.) (1991): Der Kontrastwiedergabefaktor CRF - ein Gütemerkmal der Innenraumbeleuchtung. Berlin: Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LiTG-Publikation 13).
- [2] Jentsch, Jürgen; Schmits, Paul W.; Stolzenberg, Klaus (1984): Subjektive Bewertung von Beleuchtungsanlagen und Kontrastwiedergabe. Teil 2. In: Licht-Forschung 6 (2), S. 87–91.
- [3] Wolf, Stefan; Löffler, Karin; Gall, Dietrich (1996): Ermittlung von CRF-Werten mittels bildaufgelöster Leuchtdichtemessung. In: Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.): Licht 96. 12. Gemeinschaftstagung, 2. bis 4. Oktober 1996, Leipzig ; Tagungsband.
- [4] Junghans, Bert (2012): CRF – „Wiederbelebung eines Messverfahrens“. Vortrag bei der 22. Mitgliederversammlung des Vereins zu Förderung des Fachgebiets Lichttechnik an der TU Ilmenau am 19.10.2012 in Ilmenau

Neukonzipierter Lichtsimulator im Fachgebiet Lichttechnik an der Technischen Universität Berlin

Raphael Kirsch, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

Zeitschrift LICHT 5/2013, pp. 68-70

1 Einleitung

Aufgrund der exakten Lichtlenkung sind mit LEDs prinzipiell völlig neue Lichtverteilungen und Beleuchtungskonzepte vorstellbar, die aber von bestehender Normung nicht vollständig abgedeckt werden. In der DIN EN 12464-1:2011 werden Mindestbeleuchtungsstärken auf Raumbegrenzungsflächen und in Arbeitsbereichen vorgegeben. Insbesondere die Mindestbeleuchtungsstärken auf Wänden und Decke können mit konventioneller Beleuchtung kaum unterschritten werden. Mit an die Beleuchtungsaufgabe angepassten LED-Leuchten ist eine genaue Einhaltung der Mindestwerte jedoch ohne weiteres möglich. Die Helligkeit und Helligkeitsverteilung der Flächen im Gesichtsfeld hat aber erheblichen Einfluss auf die Qualität der Beleuchtung.

Diese Problematik ist Gegenstand des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojekt „UNILED“. Im Rahmen des dazugehörigen Teilprojektes Energieeffizienz am Fachgebiet Lichttechnik der TU Berlin werden klassische Güte-kriterien der Beleuchtung aufgearbeitet und auf ihre Relevanz für Solid-State-Lighting überprüft.

Die Wirkung verschiedener Lichtverteilungen ist oft nur aus Lichtsimulationsprogrammen und von Bildern bekannt, die eine wahrgenommene Lichtumgebung nicht vollständig wiedergeben können und damit für eine subjektive Bewertung der Beleuchtungssituation nicht optimal sind.

2 Forschungsstand

Schon seit einigen Jahrzehnten werden Lichtumgebungen in Probandenversuchen hinsichtlich ihres Einflusses auf die empfundene Beleuchtungsqualität untersucht. Bisherige Versuchsaufbauten und Licht-Simulatoren sind aber in ihrer Funktion oft eingeschränkt, da Lichtverteilungen nicht völlig frei gestaltet und angepasst werden können. Im Folgenden werden einige Beispiele genannt, die Schwierigkeiten und Probleme bisheriger Versuchsaufbauten hinsichtlich der Trennung unabhängiger wissenschaftlicher Variablen aufzeigen.

Pellegrino führte in einem Büro-Aufbau Studien zur Nutzerakzeptanz verschiedener Lichtlösungen durch [1]. Im Versuchsraum, ausgestattet mit zwei Leuchtenbändern, wurden drei Beleuchtungssituationen dargeboten, die von Probanden bewertet wurden. Die drei Lichtszenen unterschieden sich in der Lichtverteilung der Leuchten (direkt, direkt/indirekt, indirekt). Im Ergebnis der Studie wurde eine rein direkte Beleuchtung besser („good“) bewertet als die direkt/indirekte („acceptable“) bzw. rein direkte Lösung („acceptable“). Diese Bewertung lässt sich jedoch nicht auf einzelne Variablen zurückführen, da sich in allen drei Szenen sämtliche Parameter wie Leuchtdichte- und Beleuchtungsstärkeverteilungen ändern. So waren für die rein direkte Beleuchtungs-szenen Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke des Schreibtisches um ca. 35 % höher als in den anderen Szenen, was einen erheblichen Einfluss auf den Helligkeitseindruck haben kann. Damit wurde in der Studie nicht allgemeingültig die Akzeptanz der drei Beleuchtungsarten bewertet, sondern nur Aussagen über diesen konkreten Beleuchtungs-fall gewonnen, die nicht ohne weiteres auf andere Szenarios übertragbar sind.

Shepherd [2] verwendete für die Evaluierung subjektiver Lichtqualität einen Versuchsraum mit 12 direktstrahlenden Deckenanbauleuchten und fünf Wallwashern in drei Reihen. In den drei dargebotenen Lichtszenen wurden bei konstanter direkter Beleuchtungskomponente unterschiedliche Wand- und Deckenleuchtdichten eingestellt. Die einzelnen Szenen wurden von Probanden mittels Fragbogen bewertet. Allerdings änderten sich neben Wand- und Deckenleuchtdichteänderten sich auch die Leuchtdichten in den Arbeitsbereichen um bis zu 85 %. Auch hier können nur Aussagen über den Spezialfall getroffen werden, allgemeingültige Ergebnisse gibt es nicht.

Collins und Plant [3] verwendeten ein Modell im Maßstab 1:12, bei dem bei gleicher Beleuchtung die Reflexionsgrade der Wände durch Hineinschieben unterschiedlicher Papiere verändert wurden. Eine Trennung der horizontalen und vertikalen Leuchtdichte- und Beleuchtungsstärkeverteilungen war in diesem Versuchsaufbau annähernd möglich, allerdings konnte durch den kleinen Maßstab die Lichtsituation nicht innerhalb des Raumes erlebt werden, da die Probanden von außerhalb in den Aufbau hineinschauten.

Tenner et al. [4] führten Probandenbefragungen in einem Versuchsraum durch, der durch Tageslicht und Kunstlicht beleuchtet wurde. Es wurden Präferenzen für bestimmte Beleuchtungsstärken im Arbeitsbereich herausgefunden. Durch die stark variierende Beleuchtung änderten sich aber vermutlich auch vertikale Leuchtdichten auf den Raumbegrenzungsflächen. Diese werden in der Versuchsauswertung aber nicht berücksichtigt und konnten auch nicht unabhängig variiert werden. Die Ergebnisse der Akzeptanzuntersuchung ausschließlich auf den Einfluss der Beleuchtungsstärke zurückzuführen ist also nicht möglich.

Es wird klar, dass durch die Beleuchtung mit verschiedenen Leuchtentypen die Lichtsituation zwar geändert werden kann, da sich aber meist sämtliche wahrnehmungsrelevante Parameter ändern, ist es schwierig, Änderungen in Präferenz und Akzeptanz direkt auf eine Variable zurückzuführen um allgemeine Aussagen zu treffen.

Ein Beispiel für kontrollierte wissenschaftliche Variablen ist der Aufbau von van Ooyen et al. [5], bei dem drei identische Büroräume mit verschiedenen Leuchten ausgestattet wurden. Die Raumbegrenzungsflächen wurden mit Farben mit unterschiedlichen Reflexionsgraden gestrichen, die Schreibtischoberflächen konnten durch verschiedene Materialien verändert werden. Leuchten und Reflexionsgrade wurden angepasst, so dass die Beleuchtungsstärke auf der horizontalen Nutzebene in allen drei Räumen konstant war. Variiert wurde nur die mittlere Leuchtdichte der Wände (12-92 cd/m²) und der Schreibtische (20-200 cd/m²).

Die Variabilität dieses Aufbaus ist jedoch auf eine Auswahl von Leuchten begrenzt, beliebige Änderungen der Lichtverteilung sind nicht oder nur mit erheblichem Aufwand möglich. Insbesondere komplexere Leuchtdichteverteilungen, wie sie mit LED Leuchten erreicht werden können sind nicht über einen Wandanstrich zu realisieren.

Um diese Lücke zu schließen und eine Rückführung von Akzeptanzstudien auf einzelne Beleuchtungsparameter zu ermöglichen, wurde am FG Lichttechnik ein neuartiger frei konfigurierbarer Lichtsimulator in Form eines Doppelbüroarbeitsplatzes aufgebaut.

3 Konzept

Im neukonzipierten Lichtsimulator können beliebige Lichtverteilungen unabhängig von Leuchten im Raum dargestellt werden. Wichtig ist dabei eine saubere Trennung lichttechnischer Variablen wie Leuchtdichteverteilung auf den Raumbooberflächen und Beleuchtungsstärkeverteilung in der Nutzebene. Ein möglichst großes einstellbares Intervall dieser Größen bietet die Grundlage für zukünftige Versuche. Sämtliche Verteilungen können unabhängig voneinander und örtlich wie zeitlich aufgelöst eingestellt werden. So kann beispielsweise die Beleuchtungsstärke auf einer Nutzebene variiert werden, während alle Leuchtdichten auf Raumbegrenzungsflächen durch Nachregeln konstant gehalten werden. Im umgekehrten Fall können Leuchtdichten auf den Wänden variiert werden, ohne die horizontale Beleuchtungsstärkeverteilung im Raum zu ändern.

Dem „Raum-im-Raum“-Prinzip folgend wurde im Großraumlabor des FG Lichttechnik ein Versuchsraum mit den Abmessungen 5 m x 4 m x 2,8 m aufgebaut. Wände und höhenverstellbare Decke sind mit ca. 1500 einzeln ansteuerbaren LED-Panels und insgesamt über 50000 LEDs ausgestattet. Die Hinterleuchtung durch ein stark streuendes Acrylglas ermöglicht die Einstellung eines örtlich fein aufgelösten Leuchtdichtebereichs auf den Raumbegrenzungsflächen von 0-1000 cd/m² in 255 Stufen, ohne dass einzelne Lichtpunkte wahrgenommen werden. Sechs Hochleistungsprojektoren ermöglichen beliebige Beleuchtungsstärkeverteilungen auf horizontalen Nutzebenen und Arbeitsbereichen unterschiedlicher Höhe. Ähnlich dem aus der Veranstaltungstechnik bekannten projection-mapping wird ein zusammengesetztes Graustufenbild des Raumes mit verschiedenen Lichtverteilungen auf die jeweils eingestellte Nutzebene projiziert. Über einen Videosever kann mithilfe einstellbarer Projektionsfenster die Beleuchtungsstärkeverteilung auf die horizontale Nutzebene beschränkt werden, Streulicht auf den anderen Raumbegrenzungsflächen wird weitestgehend vermieden und kann darüber hinaus durch Dimmung der Wandpanele ausgeglichen werden.

Durch vorhandene Lichtmesstechnik kann eine pixelgenaue Anpassung auf beliebige Verteilung der Beleuchtungsstärke bei verschiedenen Wand- und Deckenleuchtdichten vorgenommen werden. Auch die Positionen von Probanden und Mobiliar im Raum können angepasst werden. Die Einstellung der verschiedenen Lichtverteilungen erfolgt über einen Lichtsteuercomputer, der LED-Panels und Videosever zu verschiedenen Lichtszenen zusammenschaltet und diese speichert. Alle Szenen können über einen Tablet-Computer aufgerufen werden. Für Probandenversuche mit Fragebögen wurde eigens ein Programm entwickelt, welches die Einweisung der Probanden in den Versuch übernimmt, Fragebögen randomisiert oder in der gewünschten Reihenfolge abfragt und die Lichtszenen dem Versuchsablauf entsprechend aufruft. Neben dem Vorteil des „papierlosen Fragebogens“ werden durch den immer gleichen, von Probanden und Präsentierenden unabhängigen Ablauf typische Einflüsse auf das Ergebnis („experimenter's bias“) systembedingt ausgeschlossen.

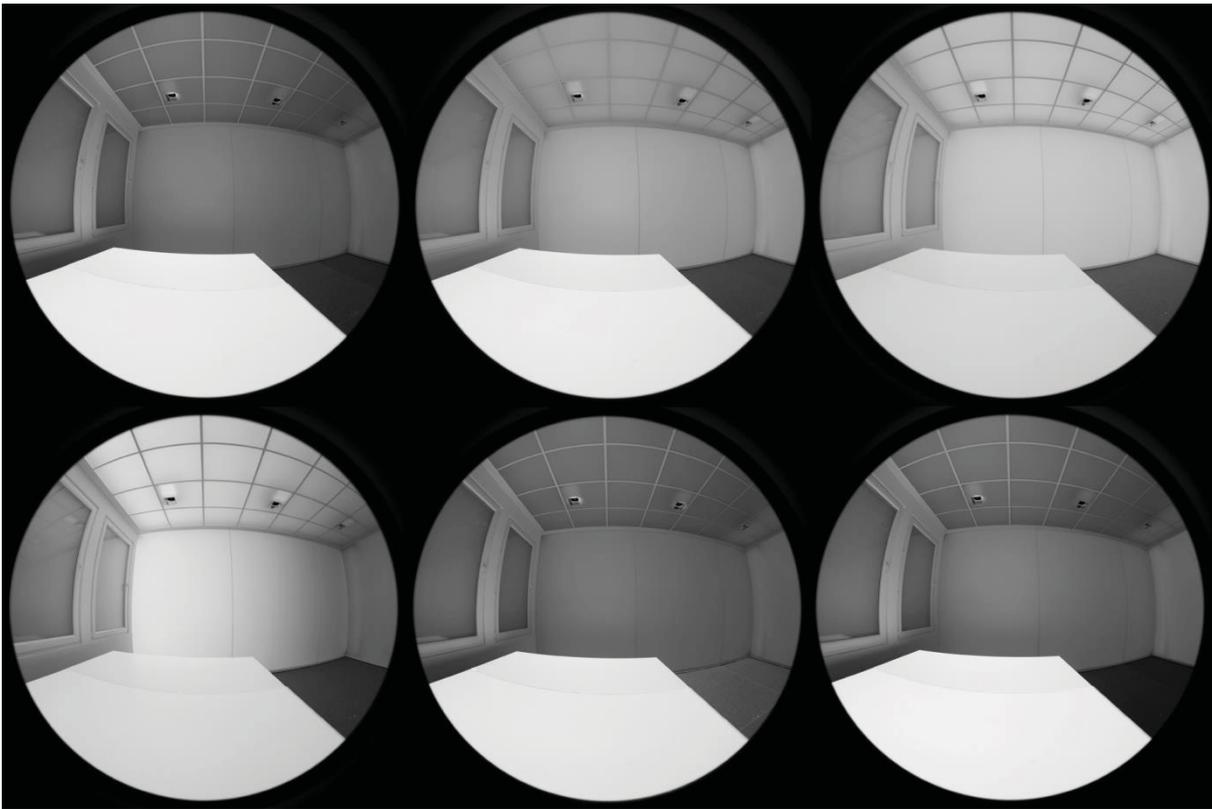


Abbildung 1: Fisheye-Aufnahmen verschiedener Lichtszenen. Lichttechnische Variablen wie Leuchtdichtverteilung im Gesichtsfeld und Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Nutzebene können unabhängig voneinander eingestellt werden.

In den Probandenversuchen im Rahmen des „UNILED“ Projektes werden verschiedene Lichtverteilungen im Gesichtsfeld und auf der Nutzebene in einer Büroanordnung auf ihren Einfluss auf die subjektive Akzeptanz hin überprüft. Die Ergebnisse können helfen, durch optimierte Lichtverteilungen einen wichtigen Aspekt der Qualität der Beleuchtung energieeffizient zu verbessern.

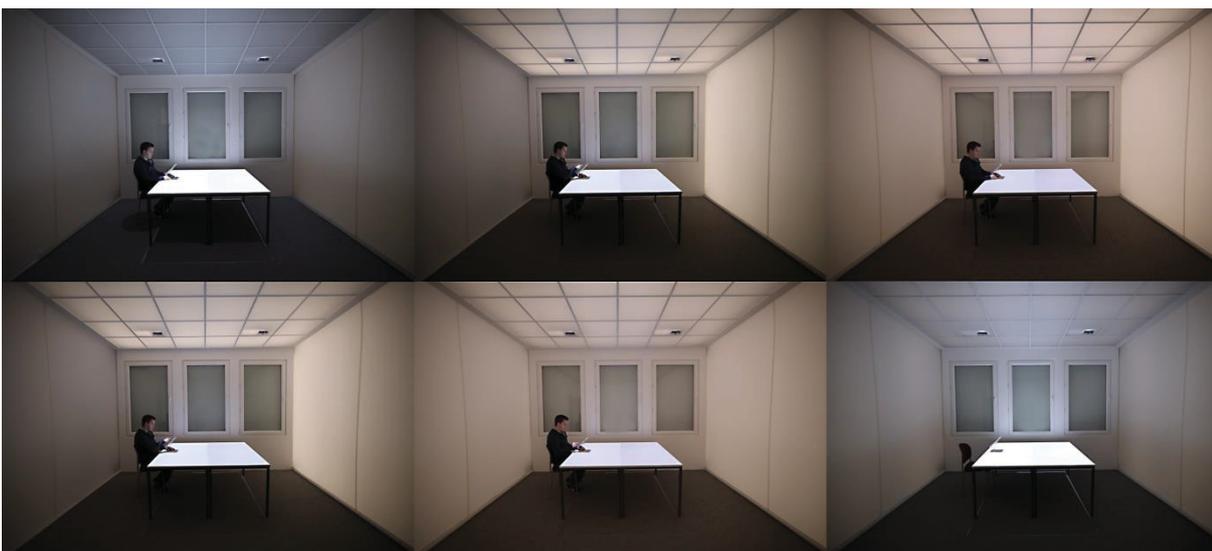


Abbildung 2: Verschiedene Lichtszenen werden einem Probanden dargeboten und von diesem bewertet. Die Ergebnisse ermöglichen ein besseres Verständnis des Einflusses verschiedener Lichtverteilungen auf Raumflächen auf die subjektiv empfundene Beleuchtungsqualität.

4 Ausblick

Das System ist beliebig durch Sensorik und weitere Messtechnik erweiterbar, so dass es auch für zukünftige Versuche angepasst und verwendet werden kann.

Nach der Nutzung für „UNILED“ kann der Versuchsraum für weitere Probandenversuche und Studien zu Lichtverteilung, Lichtrichtung, Lichtqualität und Nutzerakzeptanz eingesetzt werden. Insbesondere die speziellen Eigenschaften und mögliche Lichtverteilungen zukünftiger LED Leuchten können hinsichtlich ihrer Nutzerakzeptanz bewertet werden. In der Lehre entsteht ein Anschauungsobjekt, mit dem in spielerischer Weise Licht erfahrbar gemacht wird. Unterschiedliche Lichtverteilungen und Beleuchtungssituationen können direkt im Raum eingestellt und erlebt werden.

5 Literatur

- [1] A. Pellegrino. Assessment of artificial lighting parameters in a visual comfort perspective. *Lighting Research and Technology*. 1999 31: 107
- [2] A.J. Shepherd, W.G. Julian and A.T. Purcell. Measuring appearance: Parameters indicated from gloom studies. *Lighting Research and Technology* 1992 24: 203
- [3] J.B. Collins and C.G.H. Plant. Preferred luminance distribution in windowless spaces. *Lighting Research and Technology*. 1971 3: 219
- [4] Tenner AD, Begemann SHA, van den Beld GJ. Acceptance and preference of illuminance in offices. *Proceedings Lux Europa*. 1997:130-143.
- [5] MHF Van Ooyen, JAC Van De Weijgert, SHA Begemann. Preferred luminances in offices. *Journal of the Illuminating Engineering Society* 1987: 152-156

Lighting Quality Versus Energy Efficiency

Raphael Kirsch, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

Proceedings of the CIE Centenary Conference Paris 2013, S. 895-902

Abstract

This paper reviews recommendations of EN 12464-1 for office lighting and their relevance for new lighting technologies regarding energy efficiency and perceived lighting quality. In a subject experiment the influence of different illuminances in surrounding areas on perceived lighting quality is examined in a special lighting simulator room. A second survey aims to optimize luminance distributions in the visual field. Expected outcomes can help to find lighting conditions for office spaces that enhance subjective lighting quality and concurrently increase energy efficiency.

Keywords: Lighting Quality, Energy Efficiency, Luminance Distribution, Subject Experiment

1 Introduction

Lighting systems in office buildings can use up to 50% of the building's total electricity consumption (Schmidt, 2010). Therefore the energy efficiency of lighting systems in office buildings seems to be an effective way to save energy. The European guideline Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) and its national and European implications EN 15193 and DIN V 18599 (EN 15193, 2005), (DIN V 18599, 2011) define calculation methods to determine the energy demands of a given lighting installation. To ensure an appropriate lighting quality at all times, both standards refer to the European norm EN 12464-1 "lighting of interior workplaces" (EN 12464-1, 2011) as a minimum requirement for the quality of light. EN 12464-1 provides minimum values for horizontal, vertical and cylindrical illuminances on different room surfaces and in different areas as well as minimum requirements for glare rating, modelling and colour rendering. In lighting design practice due to an increasing demand for energy efficiency these values are often tried to be met as accurately as possible. Until recently, lighting employing fluorescent tubes and compact fluorescent lamps has been state of the art. The relatively large extend of these light sources inhibits highly accurate optical systems. Even with the latest high-efficacy reflector technology a certain amount of stray light is always spilled into the space. A lighting designer usually optimizes the lighting installation to meet the requirements for horizontal illuminances in the task area and thereby almost certainly exceeds the minimum illuminances on other room surfaces. Since the brightness of the background according to current research (Veitch, 2010),

(Tralau, 2010) is a quality criterion for a lighting installation improving with higher luminances, stray light in this case can help to improve overall lighting quality.

Within the last years an increasing amount of lighting installations based on LEDs have been established in office spaces. Effectively a point light source, LEDs allow for new optical systems with higher accuracy, better direction of light and less stray light compared to conventional reflector technology. Luminous intensity distribution curves (LID) can be shaped with a higher variance, guiding light exclusively to the desired surfaces. Theoretically, an LED lighting system adapted to and optimized for a certain office space could meet all minimum requirements of EN 12464-1 exactly, leading to a completely standard-conformable installation using the least possible amount of energy within the compliances of the European norm. Bearing a high potential to reduce energy consumption, it still remains to be seen if such an installation can be regarded as energy efficient.

2 Literature review

2.1 Energy efficiency

Recent research is providing different definitions and approaches to energy efficiency.

Veitch (Veitch, 2010) defines three intersecting domains of a lighting installation: economics, architecture and individual well-being. The intersection of all domains is described as lighting quality making energy efficiency a subset of lighting quality and vice-versa.

Loe (Loe, 2009) describes important factors to be considered for an energy efficient lighting installation. Besides many typical energy related features such as efficacy of lamps and gear, an equal amount of aspects influencing energy efficiency describes human factors like amenity and health. In this approach a required visual effectiveness defines the amount of energy needed to reach a certain level of lighting quality. Thus, energy efficient lighting systems do not compromise lighting quality but must meet all quality aspects with the use of efficient lamps, gear and control systems.

The consideration of the visual effectiveness of a lit environment is also mentioned by Goodman (Goodman, 2009) for the determination of the energy efficiency of lamps and lighting.

EN 12464-1 connects lighting quality and energy efficiency: "A lighting installation should meet the lighting requirements of a particular space without waste of energy. However, it is important not to compromise the visual aspects of a lighting installation simply to reduce energy consumption. This requires the consideration of appropriate lighting systems, equipment, controls and the use of available daylight." (EN 12464-1, 2011).

In summary most authors and standards agree on the fact that energy efficiency can only be achieved regarding the overall lighting quality and human factors. By definition energy efficiency differs from simply reducing energy consumption. To decide whether an office lighting installation according to EN 12464-1 can be energy efficient if all minimum requirements are met exactly it is necessary to further investigate the overall lighting quality achieved by such an installation.

2.2 Lighting quality in office spaces

Requirements for horizontal and vertical illuminances in a standard workstation with display screen equipment according to EN 12464-1 are:

Table 1: Lighting requirements

	Task area	Surrounding area	Walls	Ceiling
Illuminance	500 lux	300 lux	75 lux	50 lux
Uniformity U₀	0.6	0.4	0.1	0.1

2.2.1 Task area illuminance

A task area illuminance of 500 lux is recommended by most current standards such as IESNA RP-1 (IESNA, 2004) and EN 12464-1. Osterhaus (Osterhaus, 1993) states an increase of illuminance recommendations in task areas by 25 to 50% since 1973. General lighting levels, especially for computer visual display units, “will most likely be reduced further in exchange for a more efficient design [...]”.

This indicates that an illuminance level of 500 lux in the task area is generally accepted and in some cases more than sufficient.

2.2.2 Surrounding area illuminance

According to EN 12464-1 the illuminance in the surrounding areas must be related to the task area illuminance to “provide adequate adaptation luminance” and “provide a well-balanced luminance distribution in the visual field”. Increasing the illuminance in the surrounding area will result in higher luminances in the visual field. Increased floor-luminance and reflected light on other surfaces contribute to a change in adaptation luminance. However, the visual effectiveness of illuminance on the work plane and floor is low. Low reflectance 20 %, small changes in luminance levels, most light absorbed, only used once.

Research by Houser et al (Houser, 2002), Loe (Loe, 1991) and Flynn (Flynn, 1977) also indicates, that the correlation of brightness perception of the floor with the perception of overall room brightness is significantly lower than for other room surfaces. This suggests that a decreased illuminance on the work plane, especially in the surrounding area, and a concurrent increase of wall and ceiling luminance can be visually more effective.

2.2.3 Brightness of the walls /background

Typical reflectances of room surfaces are 70/50/20% for ceiling/walls/floor including furniture and other obstructions. Conventional wall and ceiling reflectances can nearly be described by lambertian reflectance where luminance results from illuminance according to (1).

$$L = \rho \times \frac{E}{\pi} \tag{1}$$

where

- L is the luminance of a surface;
- E is the illuminance on this surface;
- ρ is the reflectance of this surface.

This results in wall and ceiling luminances of 11 to 12 cd/m² for illuminances of 70 lux and 50 lux.

Loe (Loe, 1994) concluded that “a point where it could be assumed that the assessment changes from generally dim to generally bright corresponds to a value of approximately 30 cd/m² [...]”. Newsham et al. (Newsham, 2005) refer to the same research: “[...] for ‘visual lightness’ the preferred average luminance in a horizontal band 40° wide should be >=30 cd/m².” The luminance of the 40° band described includes the weighted luminances of the far walls, desk and computer screen. Veitch and Newsham (Veitch, 2000a) investigated a

preferred median luminance of 39,2 cd/m² in the same band. Houser et al. (Houser, 2002) suggest that the brightness of walls and ceiling significantly influences the brightness perception of the whole space.

A different approach to this topic is the subjective measurement of gloom. Gloom is a phenomenon where occupants judge an interior to be underlit even though the illuminance in the task area fulfils the standards. Shepherd (Shepherd, 1992) concludes that gloom occurs in lighting conditions with low peripheral luminances. Gloom perception can be amplified by a combination of high task area luminances in combination with low luminances in non-task areas. This effect results from a relatively high adaptation level in a relatively dark surrounding.

Thus, research indicates that a luminance level as low as 12 cd/m² can negatively influence perceived lighting quality. It becomes clear that the minimum demands of EN 12464-1 do not ensure a sufficient level of lighting quality. Therefore, a lighting installation matching the requirements exactly should not be described as energy efficient.

3 Hypotheses:

This research focuses on optimizing lighting quality and energy efficiency by seeking for an optimal luminous distribution in office spaces. Lighting quality is investigated via the “appraisal path” (Boyce, 2003) that does not necessary have an impact on visual performance. The luminous conditions affect appraisal and mood and thereby the occupants’ well-being and visual comfort. Office workers finding a space more attractive are found to be more satisfied and comfortable with their working environment. Included in the survey are aspects of lighting quality related to luminance distribution and perceived brightness that are all correlated to light distributions on different surfaces of the space. There are far more characteristics of an installation directly affecting perceived quality of light such as flicker, modelling and spectral quality. However, this paper focuses exclusively on luminance distributions.

Dependent measures include architectural integration, acceptance and perceived lighting quality that can be summarized as subjective evaluation of lighting quality. These measures are integral to the hypotheses of this experiment:

- A decreased illuminance level in surrounding areas does not affect perceived lighting quality if wall and ceiling luminance is increased.
- Different wall/ceiling luminous distributions (with a fixed average luminance) lead to different subjective levels of acceptance.
- Appropriate luminance distributions in a room can increase subjective lighting quality without increasing energy consumption
- Appropriate luminance distributions can decrease energy consumption without decreasing subjective lighting quality
- Optimizing the luminance distribution in the field of view and lowering the illuminance in surrounding areas will save energy and increase perceived lighting quality.

4 Methods

4.1 Experimental set-up

Lighting Quality can be investigated best in subject experiments. To assign a certain outcome of the experiments to a defined measure a strict separation of independent variables is necessary. This research takes place in a unique custom made mock-up of a cell office aiming to an exact isolation of independent variables. Diffuse acrylic, backlit by over 1300 controllable LED panels make up three walls and ceiling to control luminance distributions in the visual field. The fourth wall contains a simulated window with adjustable CCT. Six high-resolution projectors in the ceiling provide defined illuminance distributions on the work plane. Since the projectors have almost no stray light the provided illuminance is restricted to the work plane. All components can be balanced to provide the exact distribution needed independently from each other.

The test room contains a double desk to enable subjects to evaluate various lighting conditions from an occupant's point of view.

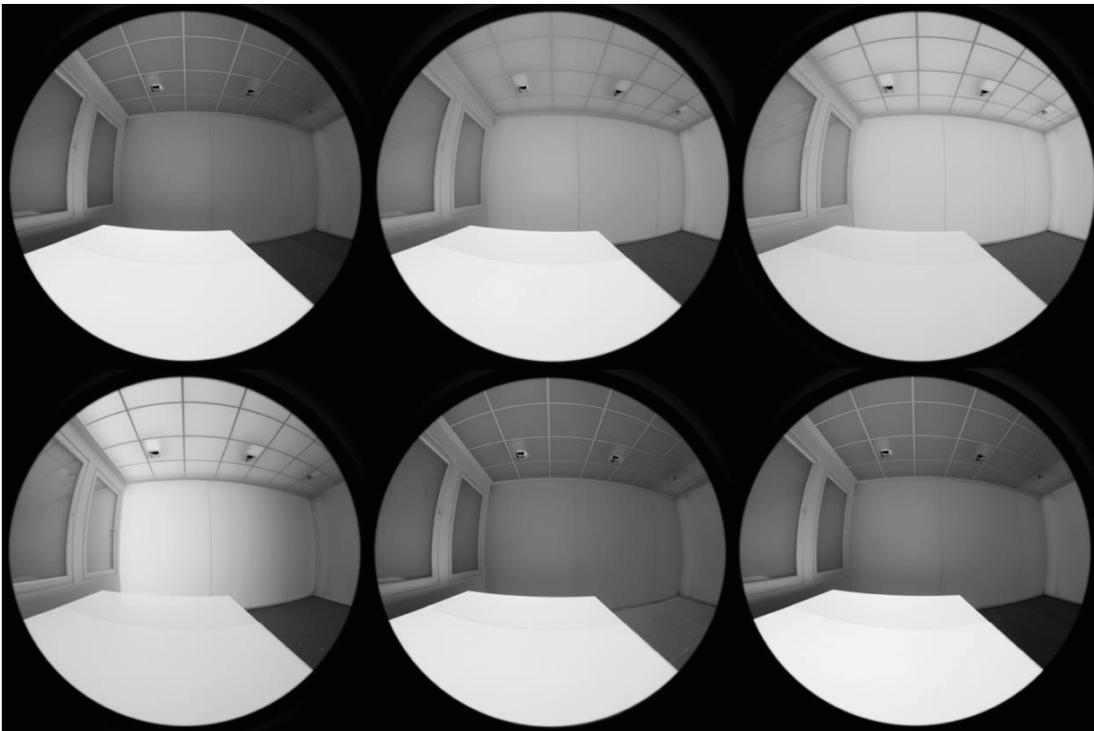


Figure 1: The Lighting Simulator

In each case, the dependent variable is the subjective evaluation of lighting quality. Independent variables are luminous distributions including desktop and surrounding area illuminance, background luminance, wall luminance and luminance in the field of view.

Figure 2 shows the experimental set-up.

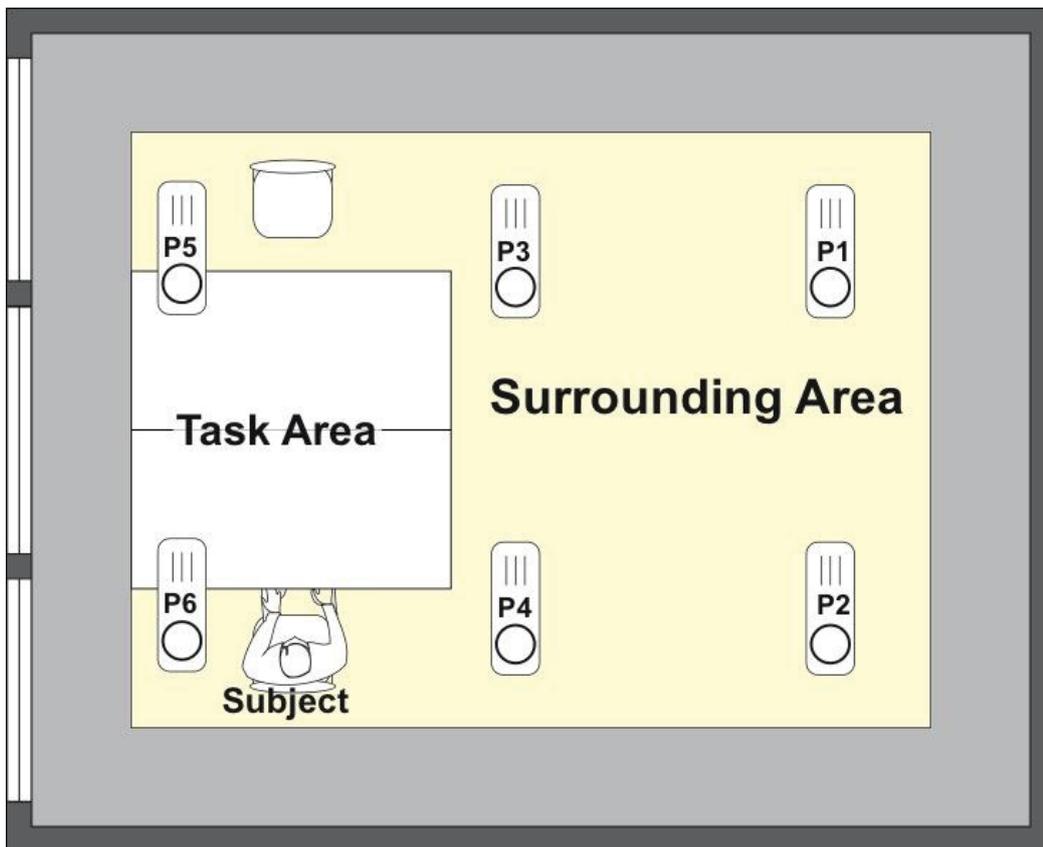


Figure 2: Experimental setup with projectors P1-P6

The dependent variable is investigated using questionnaires to be filled in for each scenario. The content remains the same during all lighting scenes and following surveys to allow for high comparability between the experiments. As a basic principle for the questionnaire serves a combination of the “Office Light Survey” by Boyce and Eklund (Boyce, 1996) and Veitch’s and Newsham’s “Lighting Quality Scale” (Veitch, 2000b) adapted to the special conditions in the lighting simulator. These surveys have been frequently evaluated in laboratory experiments and under field conditions. The outcome of the questionnaires describes the dependent variable of this research properly.

The projectors create a lighting situation casting unusual shadows and unexpected modelling when the subject moves through the room to reach the testing position. To avoid distraction and preconception a diffuse entrance scene without direct lighting from the projectors marks the start of the experiments.

In each experiment the subject fills in the questionnaires containing the instructions for the experiment avoiding experimenter bias. The application on the tablet also changes the lighting scenes according to a defined timeline after each completed questionnaire so the time flow is the same for all subjects. All lighting scenes are presented in randomized order to avoid order bias. Since the subjects are expected to evaluate each lighting scene individually instead of comparing them to each other, a dynamic transition sequence is shown between lighting scenes. An easy task on a computer screen has to be fulfilled to detract the subjects from dimming between scenes. All scenes are presented in randomized order.

4.2 Experiment 1: Surrounding Area Illuminance

The first experiment aims to investigate the impact of the illuminance in the surrounding area on perceived lighting quality.

Five different lighting situations are presented to the subject placed at the desk. The scenarios' only varying independent measure is the illuminance in the surrounding area. Wall and ceiling luminances are kept at a constant level of 12 cd/m² according to the minimum levels required in EN 12464-1 in a uniform distribution. The task area illuminance is 500 lux with a uniformity of $U_0 > 0.6$ in the basis of EN 12464-1 and 2.2.1 in every scene.

The subject is shown five different lighting scenes described in Table 2.

Table 2: Operationalization of Experiment 1

Lighting scene	Illuminance surrounding area
1	50 lux
2	100 lux
3	200 lux
4	300 lux
5	500 lux

The values reproduce the recommended steps of illuminance of DIN EN 12464-1. EN 12464-1 requires a minimum illuminance in the surrounding area of 300 lux. In this experiment the range from 50 to 500 lux was chosen to cover illuminances well below and above the standard recommendation to investigate changes in perceived lighting quality beyond the range of realistic practical solutions. The aim is to investigate which illuminance levels are just acceptable and if there are changes in the quality rating between the different scenes.

4.3 Experiment 2: Luminance distribution in the visual field

In this experiment the effect of different luminance distributions in the visual field is tested. The presented distributions are shown in Figure 3.

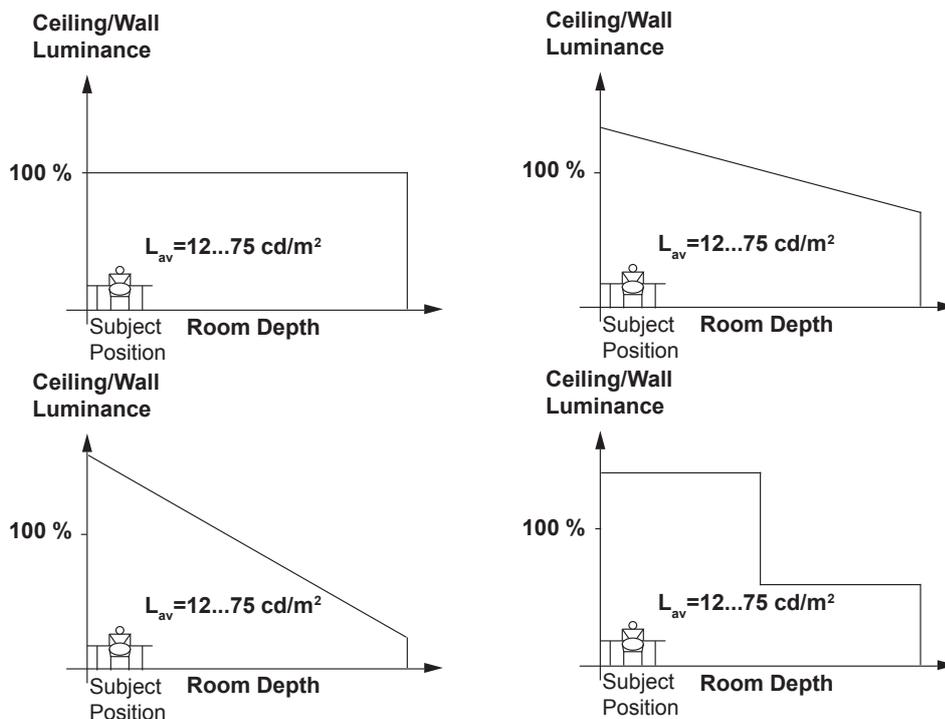


Figure 3: Luminance distributions on walls and ceiling with equal average luminance

All distributions are presented in four scenes of different average luminances from 12 cd/m² (minimum recommendation) to a level of 75 cd/m² corresponding to 340 lux/ 470 lux on ceiling and walls. A higher level is not practicable for energetic reasons. Within a scene the average illuminance is kept at a constant level for all four distributions from Figure 3. Task area illuminance is kept at a constant 500 lux with $U_0 > 0.6$.

Since each quadruple of distributions has the same average luminance their energy demand should theoretically be the same. A change in lighting quality perception induced by the distribution of luminance could be achieved without changing the energy consumption.

4.4 Experiment 3: Combination of findings

Experiments 1 and 2 evaluate the impact of illuminance in the surrounding area and the luminance distribution in the visual field on perceived lighting quality. This third survey seeks to combine findings provided by the previous experiments. A surrounding area illuminance found to be just acceptable in experiment 1 and the luminance distributions rated best in experiment 2 are set up together and are compared to a scene exactly matching the minimum requirements of EN 12464-1. From the required lighting conditions, conclusions are drawn regarding the connected load that would be necessary for a real lighting installation. These findings are compared and energy savings potentials are quantified.

5 Expected Outcomes:

Assuming that the hypotheses prove true, one can expect the following outcomes:

- Subjective evaluation of lighting quality will not change as the horizontal surrounding illuminance decreases, allowing a decreased level of energy consumption.
- Subjective evaluation of lighting quality will increase using appropriate luminance distributions without changing the energy consumption.
- Lighting solutions using the right luminous distribution will decrease energy consumption without changing subjective evaluation of lighting quality.

If conclusively observed, the results will support improved definitions of lighting quality in cell offices, including required luminance distributions within the field of view to address the quality of a lighting solution holistically. This experiment will show that newer technologies need updated standards to sustain quality and thus pave the road for future improvement.

6 References

BOYCE, PR. VEITCH, JA. NEWSHAM, GR. MYER, M. HUNTER, C. 2003. Lighting Quality and Office Work: A Field Simulation Study. Report for the U.S. Department of Energy

DIN 2011. DIN V 18599 - energy performance of buildings

DIN 2005. DIN EN 15193 - energy performance of buildings

DIN 2011. DIN EN 12464-1 - lighting of interior workplaces

EKLUND, NH. BOYCE, PR. The development of a reliable, valid, and simple office lighting survey. J. Illum. Eng. Soc. 1996 25: 25-40

ESCUYER, S. FONTOYNONT M. 2001. Lighting controls: a field study of office workers' reactions. Lighting Research and Technology 2001 33, 77-94 IESNA. 2004. American National Standard Practice for Office Lighting

- FLYNN, JE. 1977. A study of the subjective responses to low energy and non-uniform lighting systems. *Lighting Design Application* 1977; 7: 167–79
- GOODMAN, TM. 2009. Measurement and specification of lighting: A look at the future. *Lighting Research and Technology* 2009 41: 229-243
- HOUSER, KW. TILLER, DK. BERNECKER, CA. MISTRICK, RG. 2002. The subjective response to linear fluorescent direct/indirect lighting systems. *Lighting Research and Technology* 2002 34: 243-260
- LOE, DL, MANSFIELD, KP. ROWLANDS, E. 1991. Light patterns and their relevance to spatial appearance and the quality of the lit environment. *Proceedings CIE 22nd session (Melbourne)*. 1991; 2: 41–44.
- LOE, DL. MANSFIELD; KP. ROWLANDS, E. 1994. Appearance of lit environment and its relevance in lighting design: Experimental study. *Lighting Research and Technology* 1994 26: 119-133
- LOE, DL. 2009. Energy efficiency in lighting - considerations and possibilities. *Lighting Research and Technology*, 2009 41, 209-218
- NEWSHAM, GR. RICHARDSON, C. BLANCHET, C. VEITCH, JA. 2005. Lighting quality research using rendered images of offices. *Lighting Research and Technology* 2005 37: 93-115
- OSTERHAUS, W. 1993. Office Lighting: A Review of 80 Years of Standards and Recommendations. *Proceedings of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* 1993
- SCHMIDT, M. 2010. Energieeffizienz und Beleuchtungsqualität-ein Widerspruch?. *VDI Bautechnik*, 2010/2011, 121-126
- SHEPHERD, AJ. JULIAN WG. PURCELL AT. 1992. Measuring appearance: Parameters indicated from gloom studies. *Lighting Research and Technology* 1992 24: 203-214
- TRALAU, B. WELLMANN, TU. DEHOFF, P. SCHIERZ, C. 2010. Objective Measurable Criteria of Lighting Quality - Transformation of the Ergonomic Lighting Indicator into a measurable system. *Proceedings of CIE x035:2010*: 78-81
- VEITCH, JA. 2010. High-quality Lighting: Energy Efficiency that Enhances Employee Well-Being. *Proceedings of CIE x035:2010*: 197-204
- VEITCH, JA. NEWSHAM, GR. 2000. Preferred luminous conditions in open-plan offices: research and practice recommendations. *Lighting Research and Technology* 2000 32: 199-212
- VEITCH, JA NEWSHAM, GR. Exercised control, lighting choices, and energy use: An office simulation experiment. *J. Env. Psychol.* 2000 20: 219-237.

A Holistic Approach to Energy Efficiency and Lighting Quality in Office Spaces

Raphael Kirsch, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

Tagung Lux Junior Dörfeld, 2013

1 Einleitung

Beleuchtungsanlagen in Bürogebäuden können bis zu 50% des gesamten Stromverbrauchs des Gebäudes ausmachen (Schmidt, 2010). Daher ist eine Verbesserung der Energieeffizienz der Beleuchtung in Bürogebäuden eine effektive Maßnahme zur Energieeinsparung (McKinsey, 2010). Die Europäische Richtlinie für die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) und die nationalen und europäischen Umsetzungen EN 15193 und DIN V 18599 (EN 15193, 2005), (DIN V 18599, 2011) definieren Berechnungsmethoden zur Bestimmung des Nutzenergiebedarfs von Beleuchtungsanlagen. Um zu jeder Zeit qualitativ hochwertige Beleuchtung zu gewährleisten, beziehen sich beide Standards auf die europäische Norm EN 12464-1 "Beleuchtung von Arbeitsplätzen" (EN 12464-1, 2011) als Mindestanforderung für die Qualität der Beleuchtung. Die EN 12464-1 definiert Mindestwerte für horizontale, vertikale und zylindrische Beleuchtungsstärken auf verschiedenen Raumboberflächen und in verschiedenen Bereichen im Raum sowie Mindestanforderungen für Blendungsbegrenzung, Modelling und Farbwiedergabe. In der Praxis wird aufgrund eines steigenden Bewusstseins für Energieeffizienz oft versucht, diese Vorgaben so genau wie möglich einzuhalten. Bis vor einigen Jahren waren Leuchtstofflampen Stand der Technik in der Innenbeleuchtung. Die relativ große Ausdehnung dieser Lichtquellen schränkt die Entwicklung hocheffizienter optischer Systeme ein. Auch mit der aktuellsten Reflektor-Technologie wird ein gewisses Maß an Streulicht immer in den gesamten Raum abgegeben. In der Regel optimiert ein Lichtplaner die Beleuchtungsanlage auf horizontale Beleuchtungsstärken im Bereich der Sehaufgabe und übererfüllt damit fast sicher die Mindestanforderungen für Beleuchtungsstärken auf anderen Raumboberflächen. Da die Helligkeit der Raumbegrenzungsflächen laut aktueller Forschung (Veitch, 2010), (Tralau, 2010) u. a. ein Qualitätskriterium für Beleuchtung ist, kann Streulicht in diesem Fall helfen, die Lichtsituation zu verbessern.

In den letzten Jahren werden immer mehr Büroräume mit LED-Beleuchtungsanlagen eingerichtet. Als fast punktförmige Lichtquelle ermöglichen LEDs neue optische Systeme mit höherer Genauigkeit, effizienterer Lichtlenkung und damit weniger Streulicht im Vergleich zu herkömmlichen Reflektor-Technologie. Lichtstärkeverteilungskurven können mit einer höheren Auflösung und Vielfalt gestaltet werden und könnten Licht ausschließlich

auf die gewünschten Oberflächen lenken. Theoretisch könnte ein stark angepasstes LED-Beleuchtungssystem für einen bestimmten Büroraum alle Mindestanforderungen der EN 12464-1 genau einhalten, was zu einer völlig Norm-konformen Installation mit minimalem Energieverbrauch führt.

Obwohl sich hier ein großes Energieeinsparpotential ergibt, muss die Frage gestellt werden, ob eine genaue Einhaltung der Vorgaben der EN 12464-1 ausreichende Beleuchtungsqualität gewährleistet und ob eine solche Anlage als energieeffizient betrachtet werden kann.

2 Literaturstudie

2.1 Energieeffizienz

In der aktuellen Forschung werden verschiedene Definitionen und Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz gegeben.

Veitch (Veitch, 2010) definiert drei sich überschneidende Bereiche einer Beleuchtungsanlage: Wirtschaft, Architektur und das individuelle Wohlbefinden. Die Schnittmenge aller Bereiche ist die Beleuchtungsqualität. So ist Energieeffizienz eine Teilmenge der Qualität der Beleuchtung und umgekehrt.

Loe (Loe, 2009) beschreibt wichtige Faktoren, die für eine energieeffiziente Beleuchtungsanlage berücksichtigt werden sollten. Neben vielen typischen für den Energieverbrauch relevanten Funktionen wie Lichtausbeute der Lampen und Leuchteneffizienz beschreibt er weitere Aspekte, wie Wohlbefinden und biologische Wirksamkeit, die ebenfalls Auswirkungen auf die Energieeffizienz haben. Bei diesem Ansatz wird ein visueller Wirkungsgrad definiert, also die Menge an Energie, die benötigt wird um ein gewisses Maß an Beleuchtungsqualität zu erreichen. Energieeffiziente Beleuchtungssysteme dürfen nicht auf Kosten der Lichtqualität den Energieverbrauch verringern, sondern müssen alle Qualitätsaspekte mit dem Einsatz von effizienten Lampen, Vorschaltgeräten und Steuerungssystemen erfüllen.

Die Berücksichtigung der visuellen Effizienz einer Beleuchtungssituation wird auch von Goodman (Goodman, 2009) für die Bestimmung der Energieeffizienz von Lampen und Leuchten gefordert.

EN 12464-1 verbindet Lichtqualität und Energieeffizienz: „Eine Beleuchtungsanlage sollte die Beleuchtungsanforderungen einer bestimmten Aufgabe oder eines Raumes auf energieeffiziente Art erfüllen. Es ist wichtig, die visuellen Gesichtspunkte einer Beleuchtungsanlage nicht zu gefährden, nur um auf einfache Art den Energieverbrauch zu senken. Beleuchtungsniveaus wie sie in dieser Europäischen Norm festgelegt sind, sind Mindestwerte der mittleren Beleuchtungsstärke und müssen beibehalten werden.“ (EN 12464-1, 2011).

Zusammenfassend sind sich die meisten Autoren und Standards einig über die Tatsache, dass Energieeffizienz nur erreicht werden kann, wenn die gesamte Beleuchtungsqualität unter Einbeziehung von „human factors“ betrachtet wird. Per Definition bedeutet Energieeffizienz nicht nur die einfache Verringerung des Energieverbrauchs. Um zu entscheiden, ob eine Bürobeleuchtungsanlage gemäß EN 12464-1 als energieeffizient eingeordnet werden kann, wenn alle Mindestanforderungen genau eingehalten werden, ist es notwendig, zu untersuchen, ob allgemeine Gütemerkmale der Beleuchtungsqualität durch eine solche Installation berücksichtigt werden.

2.2 Beleuchtungsqualität in Büroräumen

Voraussetzungen für die horizontale und vertikale Beleuchtungsstärken an einem typischen Bildschirmarbeitsplatz nach EN 12464-1 sind:

Tabelle 1: Anforderungen an die Beleuchtung nach EN 12464-1

	Task area	Umgebungsbereich	Wände	Decke
Beleuchtungsstärke	500 lux	300 lux	75 lux	50 lux
Gleichmäßigkeit U_0/g_1	0,6	0,4	0,1	0,1

2.2.1 Beleuchtungsstärke im Bereich der Sehaufgabe

Eine Beleuchtungsstärke im Bereich der Sehaufgabe von 500 Lux wird von den meisten aktuellen Standards wie IESNA RP-1 (IESNA, 2004) und EN 12464-1 empfohlen. Osterhaus (Osterhaus, 1993) beschreibt eine Verringerung der Beleuchtungsstärke-Empfehlungen in diesem Bereich von 25 bis 50% seit 1973. Die Beleuchtungsniveaus werden vor allem für Bildschirmarbeitsplätze, "wahrscheinlich für eine effizientere Gestaltung weiter reduziert werden [...]".

Eine Beleuchtungsstärke von 500 Lux im Aufgabenbereich ist allgemein anerkannt, und in einigen Fällen mehr als ausreichend.

2.2.2 Beleuchtungsstärke im Umgebungsbereich

Nach EN 12464-1 muss die Beleuchtungsstärke in Umgebungsbereichen der Beleuchtungsstärke im Bereich der Sehaufgabe angepasst werden, um eine "ausgewogene Adaptationsleuchtdichte" und "eine ausgewogene Helligkeitsverteilung im Gesichtsfeld" zu schaffen (12464-1, 2011). Eine Erhöhung der Beleuchtungsstärke in der Umgebung führt zu höheren Leuchtdichten im Gesichtsfeld. Eine erhöhte Leuchtdichte des Bodens und vom Boden reflektiertes Licht auf anderen Oberflächen tragen zu einer Änderung in Adaptationsleuchtdichte bei. Jedoch ist die optische Wirksamkeit der Beleuchtungsstärke auf Nutzebenebene und Boden gering. Durch den geringen Reflexionsgrad von etwa 20% werden nur kleine Änderungen im Helligkeitsniveau erreicht, da das meiste Licht absorbiert und so nur einmal verwendet wird.

Forschung von Houser et al (Houser, 2002), Loe (Loe, 1991) und Flynn (Flynn, 1977) zeigt auch, dass die Helligkeit des Bodens mit der Wahrnehmung der allgemeinen Raumhelligkeit deutlich schwächer korreliert, als für andere Raumboflächen. Dies legt nahe, dass eine verminderte Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene, insbesondere in der Umgebung bei gleichzeitiger Erhöhung der Wand- und Decken. Leuchtdichte eine höhere optische Effizienz aufweist.

2.2.3 Helligkeit der Wände/Hintergrund

Typische Reflexionsvermögen von Raumbegrenzungsflächen sind 70/50/20% für Decke/Wände/Boden einschließlich Möbel und anderer Gegenstände im Raum. Das Reflexionsverhalten konventioneller Wand- und Deckenanstriche kann annähernd durch Lambert'sche Reflexion beschrieben werden, in der sich die Leuchtdichte aus der Beleuchtungsstärke gemäß (1) ergibt.

$$L = \rho \times \frac{E}{\pi} \quad (1)$$

wobei

L die Leuchtdichte einer Oberfläche, E die Beleuchtungsstärke auf dieser Oberfläche und ρ der Reflexionsgrad dieser Oberfläche sind.

Dies resultiert in Wand- und Deckenleuchtdichten von 11 bis 12 cd/m² für Beleuchtungsstärken von 75 Lux und 50 lux.

Loe (Loe, 1994) beschreibt, dass der Übergang von einem dunklen zu einem hellen Raumeindruck bei einer Leuchtdichte von ca. 30 cd/m² in einem horizontalen, um 40° geöffneten Band auf Augenhöhe des Beobachters liegt. Newsham et al. (Newsham, 2005) beziehen sich auf die gleiche Forschung. Zum Erreichen einer „visual lightness“ sollte die bevorzugte mittlere Leuchtdichte in einem horizontalen 40° Band größer als 30 cd/m² sein. Die Leuchtdichten des 40°-Bandes beinhalten gewichtete Leuchtdichten der Wände, des Schreibtisches und gegebenenfalls des Computer-Bildschirms. Veitch und Newsham (Veitch, 2000a) untersuchten eine bevorzugte mittlere Leuchtdichte von 39,2 cd/m² in dem gleichen Band. Houser et al. (Houser, 2002) deuten darauf hin, dass die Helligkeit der Wände und der Decke erheblich die Helligkeitswahrnehmung des ganzen Raumes beeinflusst.

Eine andere Herangehensweise ist die subjektive Messung von Düsternis oder Dürsterkeit („gloom“). „Gloom“ ist ein Phänomen, bei dem Nutzer einen Innenraum als unterbeleuchtet bewerten, obwohl die Beleuchtungsstärken im Bereich der Sehaufgabe ausreichend sind. Shepherd (Shepherd, 1992) kommt zu dem Schluss, dass „gloom“ in Beleuchtungssituationen mit niedrigen peripheren Leuchtdichten auftritt. Die Wahrnehmung von „gloom“ kann durch eine Kombination von hohen Leuchtdichten im Bereich der Sehaufgabe in Kombination mit niedrigen Leuchtdichten in angrenzenden, nicht für die Bearbeitung der Sehaufgabe relevanten Bereichen verstärkt werden. Dieser Effekt ergibt sich aus einem relativ hohen Adaptationsniveau in einer relativ dunklen Umgebung.

„Um eine ausgewogene Leuchtdichteverteilung zu erzeugen, müssen die Leuchtdichten auf allen Oberflächen berücksichtigt werden. Sie werden vom Reflexionsgrad der Oberflächen und der Beleuchtungsstärke auf den Oberflächen bestimmt. Um den Eindruck von Düsternis zu vermeiden und sowohl das Adaptationsniveau als auch den Sehkomfort anzuheben, sind, insbesondere an Wänden und Decken, helle Raumbooberflächen anzu-streben.“

Neben der Beleuchtung der Sehaufgabe sollte das gesamte genutzte Raumvolumen beleuchtet werden.

Die Forschung zeigt, dass sich eine Hintergrundleuchtdichte im Bereich von 11 cd/m² negativ auf die Qualität der Beleuchtung auswirken kann. Es wird deutlich, dass die Mindestanforderungen der EN 12464-1 nicht gewährleisten können, dass ein ausreichendes Maß an Lichtqualität erreicht wird. Daher kann eine Beleuchtungsanlage, die die Anforderungen genau erfüllt, nicht automatisch als energieeffizient bezeichnet werden kann.

3 Hypothesen:

Ziel dieser Arbeit ist die Optimierung der Lichtqualität und Energieeffizienz durch Beschreiben optimaler Lichtverteilungen in Büroräumen. Beleuchtungsqualität wird über den "appraisal path" (Boyce, 2003) evaluiert, der nicht notwendigerweise Einfluss auf die Sehleistung hat. Die Beleuchtungssituation beeinflusst die Stimmung und damit Wohlbefinden und Sehkomfort des Nutzers. Büroangestellte, die ihren Arbeitsplatz als visuell attraktiv einstufen, sind zufriedener mit ihrem Arbeitsumfeld. In der Studie behandelt werden Aspekte der Beleuchtungsqualität im Zusammenhang mit Helligkeitsverteilung und wahrgenommener Helligkeit. Alle Lichtverteilungen werden auf verschiedene Raumbooberflächen bezogen. Es gibt weit mehr Gütekriterien, die die Qualität der Beleuchtung und den Raumeindruck direkt beeinflussen, wie Flimmern, Modelling und spektrale Qualität des Lichts. Diese Studie betrachtet jedoch ausschließlich die Leuchtdichteverteilungen.

Abhängige Variablen sind Integration in die Architektur, Nutzerakzeptanz und wahrgenommene Beleuchtungsqualität, die als subjektive Beurteilung der Raumatmosphäre („room appearance“) zusammengefasst werden können. Die Evaluierung dieser Variablen ist integraler Bestandteil der Hypothesen dieses Experiments:

- Eine Reduzierung der Beleuchtungsstärke im Umgebungsbereich führt zu einer schlechteren Raumbewertung, die Effektgröße ist jedoch gering ($r < 0,2$)
- Eine Erhöhung der Leuchtdichte im Umgebungsbereich führt zu einer verbesserten Raumbewertung, die Effektgröße ist hoch ($r > 0,5$)
- Eine Verringerung der Umgebungsbeleuchtungsstärke und eine Erhöhung der Leuchtdichte auf Wänden und Decke kann zu einem verbesserten Raumeindruck führen, ohne mehr Energie zu verbrauchen

4 Methodik

4.1 Versuchsaufbau

Der Einfluss von Beleuchtung auf den Raumeindruck lässt sich im Probandenversuch untersuchen. Um Ergebnisse eines Versuches einer definierten Größe zuordnen zu können ist eine strikte Trennung unabhängiger, veränderlicher Parameter notwendig. Diese Studie findet im Lichtsimulator der TU Berlin in Form eines Büroaufbaus statt. Ziel des Aufbaus ist eine exakte Trennung der unabhängigen Variablen. Diffuses Plexiglas, hinterleuchtet mit über 1300 steuerbare LED-Panels bilden drei Wände und die Decke um pixelgenau die Leuchtdichteverteilungen im Gesichtsfeld zu steuern. Die vierte Wand enthält ein künstliches Fenster, welches für die folgenden Versuche dunkel gehalten wird. Sechs hochauflösende Projektoren in der Decke sorgen für definierte Beleuchtungsstärkeverteilungen auf der Arbeitsebene. Da die Projektoren kaum Streulicht abgeben, ist die bereitgestellte Beleuchtungsstärke auf die Nutzebene beschränkt. Alle Komponenten können gegeneinander abgeglichen werden, so dass Parameter wie Leuchtdichte auf Raumbegrenzungsflächen und Beleuchtungsstärkeverteilungen unabhängig voneinander exakt eingestellt werden können.

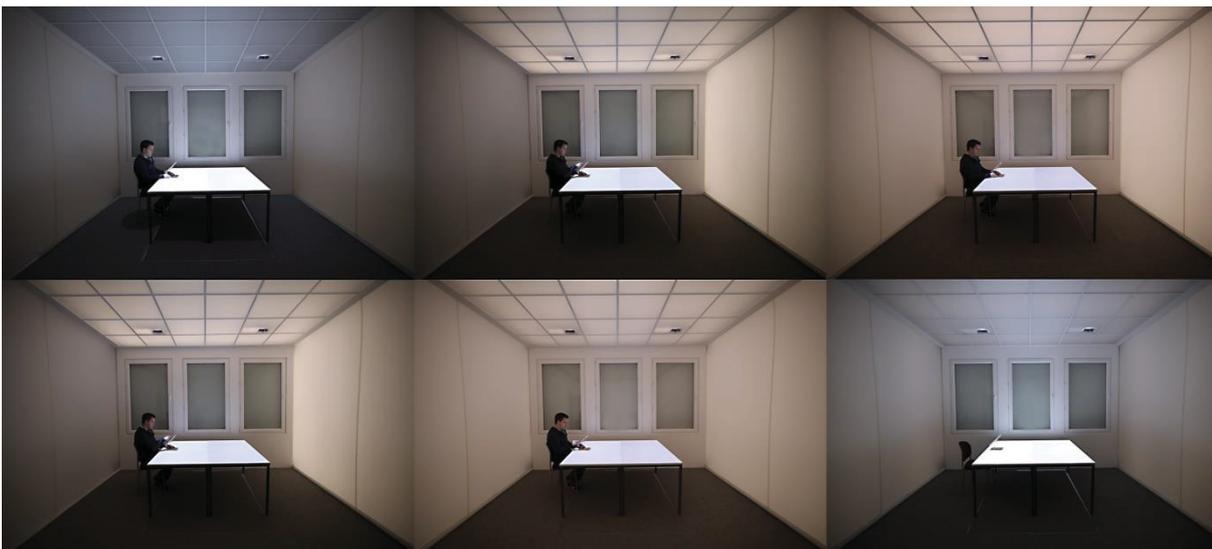


Abbildung 1: Der Beleuchtungssimulator an der TU Berlin

4.2 Versuchsablauf

Im Versuch ist die abhängige Variable die subjektive Beurteilung des Raumeindrucks („room appearance“). Unabhängige Variablen sind die mittlere Leuchtdichte im Gesichtsfeld einschließlich des Schreibtisches sowie die Beleuchtungsstärke im Umgebungsbereich.

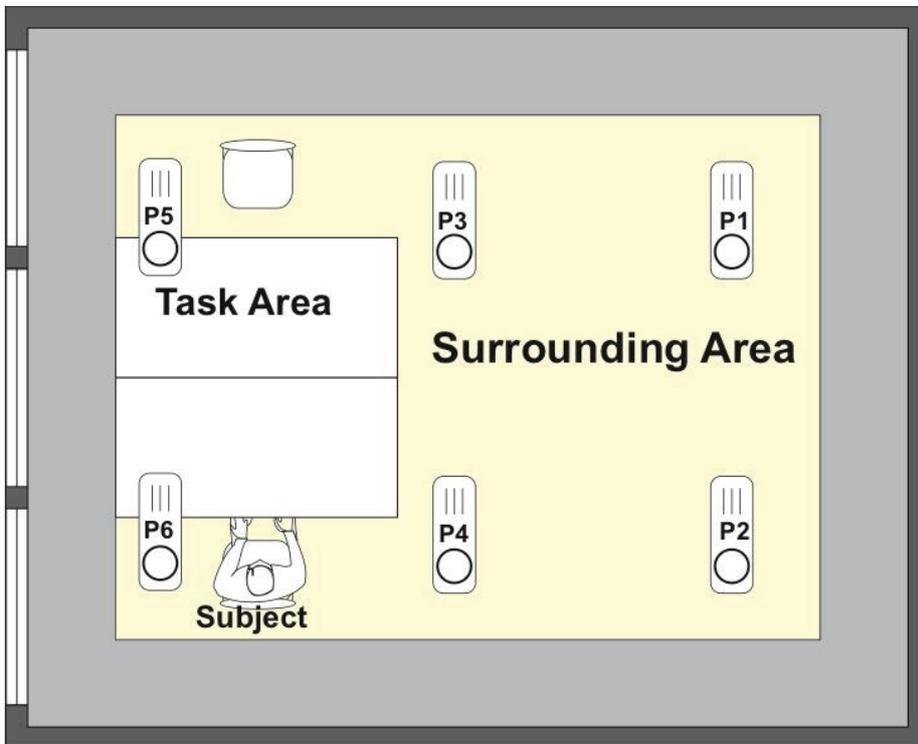


Abbildung 2: Versuchsaufbau mit Projektoren P1-P6

Die abhängige Variable wird mit Hilfe von Fragebögen untersucht, die für unterschiedliche Lichtszenen von Probanden ausgefüllt werden. Als Grundlage für den Fragebogen dient eine Kurzversion des „Room appearance judgment“-Fragebogens von Veitch und Newsham ((Veitch&Newsham, 1998). Dieser Fragebogen wurde mehrfach in Labor-experimenten und unter Feldbedingungen ausgewertet und optimiert. Mithilfe einer Faktorenanalyse wurden einzelne unabhängige Faktoren extrahiert, die den Raum-eindruck beschreiben. Die Ergebnisse des Fragebogens sind daher geeignet, die abhängige Variable „room appearance“ in vereinfachter Weise zu evaluieren. Die Ergebnisse können mit aktueller Forschung verglichen werden.

Tabelle 2: Fragebogen zum Raumeindruck

Faktor	Negativ	Positiv
Attraktivität des Raumes	unattraktiv	attraktiv
	hässlich	schön
	angenehm	unangenehm
	mögen	nicht mögen
	bedrückend	fröhlich
Sichtbarkeit/Beleuchtung	definiert	diffus
	dunkel	hell
	düster	leuchtend

Zur Durchführung des Versuches wurde eigens ein Programm für einen Tablet-Computer beschrieben, das die Probanden nach einem bestimmten Zeitablauf durch den Versuch führt und die Versuchseinweisung enthält, um einen „experimenter bias“ auszuschließen. Alle Lichtszenen werden in randomisierter Reihenfolge präsentiert, um Reihenfolgenfehler zu vermeiden. Darüber hinaus wird die Orientierung der Skalen randomisiert. Bei jeder Szene hat der Proband zunächst fünf Minuten Zeit, sich in der Raumsituation zu orientieren und sich an die Beleuchtung zu gewöhnen. Während dieser Zeit muss eine bürotypische Aufgabe bearbeitet werden. Anschließend wird der Fragbogen mit kontinuierlichen Skalen auf dem Tablet-Computer präsentiert.

4.3 Operationalisierung

Der Versuch ist als 3x4 Experiment ausgelegt, bei dem drei verschiedene Beleuchtungsstärken im Umgebungsbereich und vier verschiedene Wandleuchtdichten in jeder möglichen Permutation präsentiert werden. Der Bereich der Sehaufgabe, in diesem Fall der Schreibtisch, bleibt in allen Szenen bei konstanten 500 lux mit einer Gleichmäßigkeit von $U_0 > 0,6$ in Anlehnung an EN 12464-1.

Die zwölf verschiedenen Lichtszenen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 3: Operationalisierung des Versuchsablaufs

		Beleuchtungsstärke im Umgebungsbereich		
		300 lux	200 lux	100 lux
Leuchtdichte im Gesichtsfeld	11 cd/m ²	Szene 1	Szene 2	Szene 3
	30 cd/m ²	Szene 4	Szene 5	Szene 6
	50 cd/m ²	Szene 7	Szene 8	Szene 9
	75 cd/m ²	Szene 10	Szene 11	Szene 12

Die Beleuchtungsstärkewerte entsprechen den empfohlenen Schritten aus EN 12464-1. EN 12464-1 erfordert für Büroarbeitsplätze eine Mindestbeleuchtungsstärke im Umgebungsbereich von 300 lux, 100 lux entsprechen den Mindestempfehlungen für Verkehrswege.

5 Erwartete Ergebnisse

Die Versuche sind abgeschlossen, eine statistische Auswertung wird zurzeit durchgeführt.

Unter der Annahme, dass sich die Hypothesen bestätigen, können die Ergebnisse helfen, visuell effizientere Beleuchtungsparameter festzulegen, die die Qualität der Beleuchtung verbessern und gleichzeitig Energie einsparen können.

Dieses Experiment soll zeigen, dass eine neue Technologie aktualisierte Normung und Standardisierungen benötigt um Qualitätsparameter zu erhalten und Vorteile optimal zu nutzen.

6 Literatur

BOYCE, PR. VEITCH, JA. NEWSHAM, GR. MYER, M. HUNTER, C. 2003. Lighting Quality and Office Work: A Field Simulation Study. Report for the U.S. Department of Energy

DIN 2011. DIN V 18599 - energy performance of buildings

DIN 2005. DIN EN 15193 - energy performance of buildings

- DIN 2011. DIN EN 12464-1 - lighting of interior workplaces
- EKLUND, NH. BOYCE, PR. The development of a reliable, valid, and simple office lighting survey. *J. Illum. Eng. Soc.* 1996 25: 25-40
- ESCUYER, S. FONTOYNONT M. 2001. Lighting controls: a field study of office workers' reactions. *Lighting Research and Technology* 2001 33, 77-94 IESNA. 2004. American National Standard Practice for Office Lighting
- FLYNN, JE. 1977. A study of the subjective responses to low energy and non-uniform lighting systems. *Lighting Design Application* 1977; 7: 167-79
- GOODMAN, TM. 2009. Measurement and specification of lighting: A look at the future. *Lighting Research and Technology* 2009 41: 229-243
- HOUSER, KW. TILLER, DK. BERNECKER, CA. MISTRICK, RG. 2002. The subjective response to linear fluorescent direct/indirect lighting systems. *Lighting Research and Technology* 2002 34: 243-260
- LOE, DL, MANSFIELD, KP. ROWLANDS, E. 1991. Light patterns and their relevance to spatial appearance and the quality of the lit environment. *Proceedings CIE 22nd session (Melbourne)*. 1991; 2: 41-44.
- LOE, DL. MANSFIELD; KP. ROWLANDS, E. 1994. Appearance of lit environment and its relevance in lighting design: Experimental study. *Lighting Research and Technology* 1994 26: 119-133
- LOE, DL. 2009. Energy efficiency in lighting - considerations and possibilities. *Lighting Research and Technology*, 2009 41, 209-218
- BAUMGARTNER, T. WUNDERLICH, F. JAUNICH, A. SATO, T. BUNDY, G. GRIESSMANN, N. KOWALSKI, J. BURGHARDT, S. HANEBRINK, J. 2012. *Lighting the way: Perspectives on the global lighting market*. Study by McKinsey&Company, 2nd Ed.
- NEWSHAM, GR. RICHARDSON, C. BLANCHET, C. VEITCH, JA. 2005. Lighting quality research using rendered images of offices. *Lighting Res. and Technology* 2005 37: 93-115
- OSTERHAUS, W. 1993. Office Lighting: A Review of 80 Years of Standards and Recommendations. *Proceedings of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* 1993
- SCHMIDT, M. 2010. Energieeffizienz und Beleuchtungsqualität – ein Widerspruch?. *VDI Bautechnik*, 2010/2011, 121-126
- SHEPHERD, AJ. JULIAN WG. PURCELL AT. 1992. Measuring appearance: Parameters indicated from gloom studies. *Lighting Research and Technology* 1992 24: 203-214
- TRALAU, B. WELLMANN, TU. DEHOFF, P. SCHIERZ, C. 2010. Objective Measurable Criteria of Lighting Quality - Transformation of the Ergonomic Lighting Indicator into a measurable system. *Proceedings of CIE x035:2010*: 78-81
- VEITCH, JA. 2010. High-quality Lighting: Energy Efficiency that Enhances Employee Well-Being. *Proceedings of CIE x035:2010*: 197-204
- VEITCH, JA. NEWSHAM, GR. 2000. Preferred luminous conditions in open-plan offices: research and practice recommendations. *Lighting Research and Technology* 2000 32: 199-212
- VEITCH, JA NEWSHAM, GR. Exercised control, lighting choices, and energy use: An office simulation experiment. *J. Env. Psychol.* 2000 20: 219-237.

Solid State Lighting in Offices: Impact on Lighting Quality and Room Appearance

Raphael Kirsch, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

Proceedings of CIE 2014 "Lighting Quality & Energy Efficiency." Kuala Lumpur, Malaysia: CIE: p. 88-95

Abstract

This paper investigates minimum recommendations of EN 12464-1:2011 for office lighting and their validity for solid-state lighting. In a subject experiment the influence of different photometric criteria on visual appearance is examined. Results show that surrounding area illuminance is not an effective way to enhance visual lightness and room attractiveness. Effects of decreased work plane illuminances can be compensated by increased wall and ceiling illuminance. In accordance with other research, a luminance in a 40° horizontal band in the order of $\sim 40 \text{ cd/m}^2$ was found to correspond to a point where a space appears generally bright and attractive.

Keywords: Office Lighting, Lighting Quality, Standardisation, Visual Appearance, Background Luminance, Ambient Lighting

1 Introduction

International lighting standardisation for offices provides the lighting designer with illuminance values for different surfaces and areas in the space to support the occupants' work performance. Recent amendments of the European standard EN 12464-1 (2011) have included illuminance recommendations for vertical non-task areas for the first time. This marked an important step in the inclusion of lighting quality criteria affecting visual appearance of work places. However, as described in (Kirsch & Völker 2013a), new office-lighting installations based on LEDs enable lighting designs in a detailed way previously hardly achievable with conventional light sources. Driven by an increasing demand for energy savings designers often strive to meet standard recommendations as accurately as possible and - due to available LED-light sources - have the possibility to do so. Bearing a high potential to reduce energy consumption, it is highly important that lighting designers consider lighting quality criteria that go beyond a mere compliance with lighting standards.

Lighting quality criteria involve many different factors such as assistance with task performance, avoidance of visual fatigue and biological effects of light on humans. In the

present study, recommendations derived from EN 12464-1 (2011) are examined regarding their impact on visual appearance.

2 Photometric Criteria Influencing Visual Appearance

Factors to determine visual appearance and lighting quality in office spaces have been investigated extensively over the last decades. Quality criteria include spectral aspects of lighting such as colour rendering and spectral power distribution as well as physiological and biological effects. In this work, two factors influencing the appearance of a space based on the distribution of light are examined:

- Ambient lighting
- Luminances in the visual field

Table 1 shows requirements for horizontal and vertical illuminances in a standard cell office according to EN 12464-1:2011.

Table 1: Lighting requirements

	Task area	Surrounding area	Walls	Ceiling
Illuminance	500 lux	300 lux	75 lux	50 lux

2.1 Task area illuminance

A task area illuminance of 500 lux is recommended by most current standards such as IESNA RP-1 (2004) and EN 12464-1 (2011). Osterhaus (1993) states a decrease of task area illuminance recommendations by about 50% since 1973. General lighting levels, especially for computer visual display units, “will most likely be reduced further in exchange for a more efficient design [...]” (Osterhaus 1993, p.10). This indicates that an illuminance level of 500 lux in the task area is generally accepted and thus, will be kept constant throughout this study.

2.2 Ambient Lighting and Surrounding Area Illuminance

There are several different definitions for ambient lighting. In North America and Asia ambient lighting usually refers to a general illumination of a space including illuminances on the work plane and the background. A similar quantity often used in Europe is the surrounding area illuminance, which is restricted to horizontal illuminances on the work plane. Lighting standardisation distinguishes between immediate surroundings of the task and a horizontal background area covering the rest of the space. In lighting design practice these two areas are often treated as one. Especially in Germany, other regulations for workplaces take precedence over EN 12464-1:2011. The surrounding area according to the ‘decree for workplaces’ covers a “spatial area adjacent to one or more task areas that is bounded by walls or circulation areas” (BAuA 2011, p.3). This area is to be lit with an average illuminance of 300 lux if task area illuminance is 500 lux. In lighting design practice, this area is usually reduced by a 0.5 m boundary along the walls. Thus, in this study surrounding area illuminances restricted to the workplane less the task area and a 0.5 m boundary area along the walls are investigated.

According to EN 12464-1 the illuminance in the surrounding areas must be related to the task area illuminance to “provide adequate adaptation luminance” and “provide a well-balanced luminance distribution in the visual field”. Increasing the illuminance in the surrounding area will to some extent indeed result in higher luminances in the visual field.

However, the visual effectiveness of illuminance on the work plane and floor is probably low due to low floor-lining reflectance of typically 20 %.

Research on preferred and accepted surrounding area illuminances is inconsistent to some degree. It is commonly agreed that the preferred surrounding area illuminance levels depend on the overall illuminance of the workplane including the task area (e.g. (Slater et al. 1993), (Tabuchi et al. 1995) or (Inoue 2010)). Thus, task to surrounding illuminance ratios are often reported rather than absolute values. Preferred ratios are usually in the area of 1:1 (e.g. (Bean & Hopkins 1980), (Tabuchi et al. 1995)). However, ratios can be much higher and still accepted. For a task area illuminance of 500 lux, surrounding area illuminance as low as 85 lux (task to surrounding illuminance ratio \approx 6:1) can still be acceptable for a high percentage of office workers (Inoue 2010). Additionally, research by Flynn (1977), Loe (1991) and Houser (2002) indicates a lower correlation of apparent floor brightness with the overall brightness perception of a space than for other surfaces.

Since most research mentioned here does not clearly distinguish between horizontal and vertical illuminances it can be questioned if surrounding area illuminance as defined in this study was the only influencing variable. In some of the studies a change in work plane illuminance resulted in a change of wall illuminance (and therefore luminance), which may well have a greater effect on acceptance and preference than the specified illuminances.

Research question 1:

Does a reduction of surrounding area illuminance levels derived from office lighting standards (300 lux) have a negative effect on visual appearance?

2.3 Luminances in the Visual Field

Reflectances of room surfaces often used in lighting calculations are 70/50/20% for ceiling/walls/floor. Diffuse paint or wallpapers can be approximated by lambertian reflectance where luminances can be calculated from illuminances according to (1).

$$L = \rho \cdot \frac{E}{\pi} \quad (1)$$

where L is the luminance of a surface; E is the illuminance on this surface and ρ is the reflectance of this surface. Recommendations of 12464-1:2011 (table 1) will result in wall and ceiling luminances of about 11 to 12 cd/m².

Current research indicates that luminances three to four times higher than the recommendations lead to an enhanced visual appearance of the office space. Loe et al. (1994) identified a luminance of 30 cd/m² in a 40° horizontal band as the point where the appearance of an office changes from generally dim to generally bright. In a later study (Loe et al. 2000) this value was found to be more around 40 cd/m². These findings are in accordance with other research (e.g. (van Ooyen et al. 1987), (Veitch & Newsham 2000), (Newsham et al. 2005) and others). Many different researchers have investigated the strong effect of vertical luminances on room appearance. Davis and Ginthner (1990), Baron et al, (1992) and McCloughan et al. (1999) are examples of research where wall and ceiling luminances affected the apparent brightness of a space. Research by Marsden (1972), Fischer (1973) and Houser et al. (Houser et al. 2002) also indicates effects on the pleasantness and attractiveness of a space.

Thus it can be assumed that room surface illuminances recommended in EN 12464-1:2011 cannot always ensure sufficient lighting quality regarding the appearance of a space.

Research question 2:

How is room appearance affected by different background luminances when all other lighting parameters are held constant?

Research question 3:

Can a decreased surrounding area illuminance be compensated by increased background luminances?

3 Hypotheses:

To quantify the influence of different photometric criteria on visual appearance and to find answers to the research questions the following hypotheses are tested:

- Surrounding area illuminance has an effect on visual lightness, not on room attractiveness
- Background luminance has an effect on both, visual lightness and room attractiveness
- Background luminance is a more effective way to enhance visual appearance than illuminance based quantities

4 Methodology

4.1 Experimental set-up

The experiments are conducted in the office lighting simulator at the Department of Lighting Technology of the Technical University Berlin. Dimensions of the space are 5 m x 4 m x 2,8 m (LxWxH). Walls and ceiling are equipped with acrylic glass plains backlit by LED-panels to create the desired wall and ceiling luminances. Six projectors inside the ceiling provide work plane illuminance. The setup allows for a strict separation of illumination on vertical and horizontal surfaces. A more detailed description of the simulator can be found in (Kirsch & Völker 2013a) and (Kirsch & Völker 2013b).

4.2 Experimental Design and Independent Variables

The experiment was arranged as a 3x4 repeated measures design where all participants rated all scenes acting as their own control group. Within subject variables were three levels of surrounding area illuminance and four levels of wall/ceiling luminance.

Table 2: Independent variables

Within Subject Factor	Range
Surrounding Area Illuminance	100 lux, 200 lux, 300 lux
Walls/Ceiling Luminance	11 cd/m ² , 30 cd/m ² , 50 cd/m ² , 75 cd/m ²

The range of the factors was determined using current research findings with respect to acceptable energy usage. Values for the surrounding area illuminance started at 100 lux representing findings of Inoue (2010) and corresponding to an accepted recommendation for circulation areas. 300 lux were suggested by Tabuchi et al. (1995) among others and are also the current standard recommendation for offices (e.g. CEN 2011).

11 cd/m² were calculated from wall and ceiling illuminances recommended in (CEN 2011) according to formula (1). 75 cd/m² represent a luminance that, due to energy consumption concerns, cannot realistically be exceeded in a real office.

4.3 Experimental Procedure

To avoid experimental biases influencing the participants' judgement, a number of countermeasures exemplary described in (Poulton 1989) were included in the experiment (e.g. anchor stimuli at the beginning of each session, randomised order of experiments, distraction scenes between rated scenes, continuous scales without digits).

Each scene was presented for a time period of five minutes before the questionnaire could be filled out. In this way, judgements based solely on first impressions are partly replaced by a 'sensory image' (CIE 2006). During the five-minute-period participants performed a simple office task including writing and reading.

4.4 Dependent Measures

The dependent measure was a short version of the room appearance judgement introduced by Veitch and Newsham (1998) consisting of eight of eight semantic differential scales. Using principal component analysis (PCA), the set of observations was converted into two components that were named 'visual lightness' and 'room attractiveness'.

4.5 Sample

64 naïve participants (age: 20-47 years, mean 26.47 years, median 26 years, sex: 46 % male, 54 % female) rated all scenes.

5 Results

A multivariate analysis of variance (MANOVA) was conducted to test for an overall difference of outcomes.

There was a significant main effect of surrounding area illuminance. Orthogonal planned comparisons revealed a significant effect of surrounding area illuminance on visual lightness but not on room attractiveness.

There was also a significant main effect of walls/ceiling luminance. Planned comparisons indicated an influence on both, visual lightness and room attractiveness. Effect sizes between luminance levels decreased with higher luminances.

There was no significant effect of the surrounding area illuminance*background luminance interaction.

The participants' subjective responses were examined further using boxplots (Figure 1 and Figure 2).

As can be seen clearly, changes in subjective responses due to changes in surrounding area illuminance, although existent, were by far smaller than for changes in wall and ceiling luminance. For all cases an increase in luminance by one factor level affected attractiveness and brightness appraisal in a way that the effect of decreased surrounding area illuminance was outbalanced.

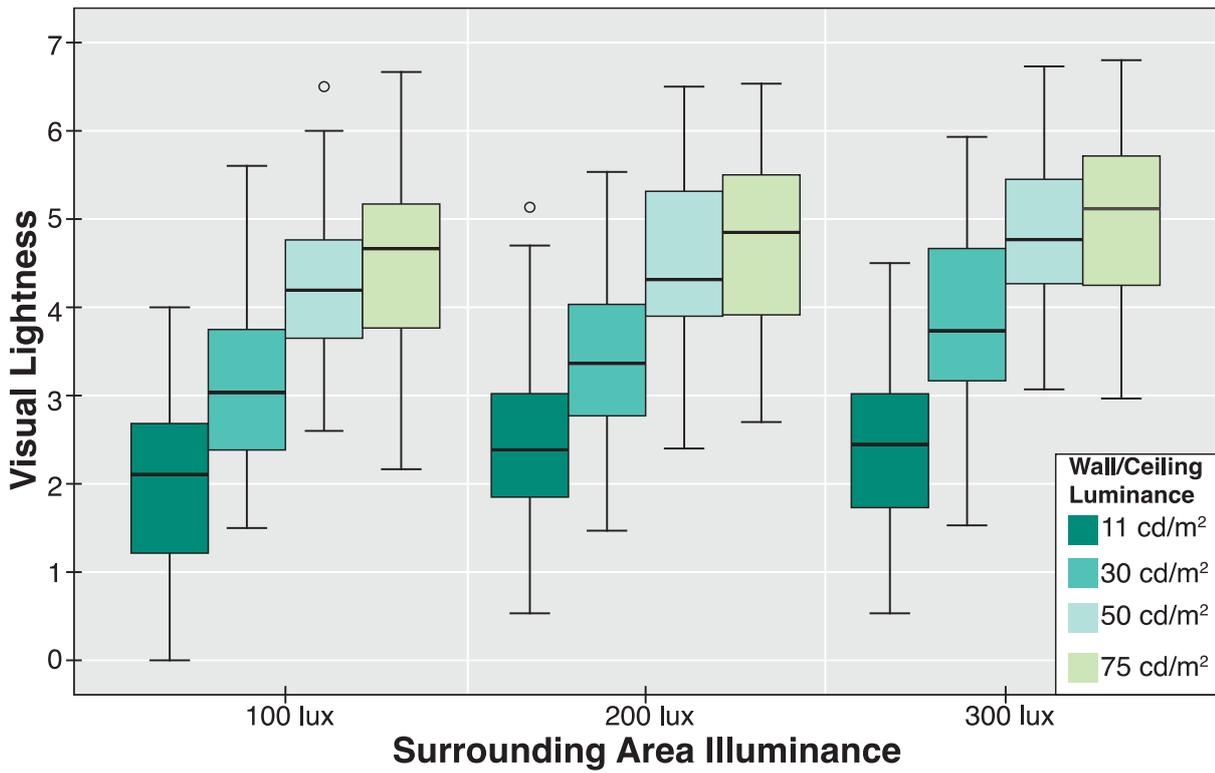


Figure 1: Boxplot of 'visual lightness'

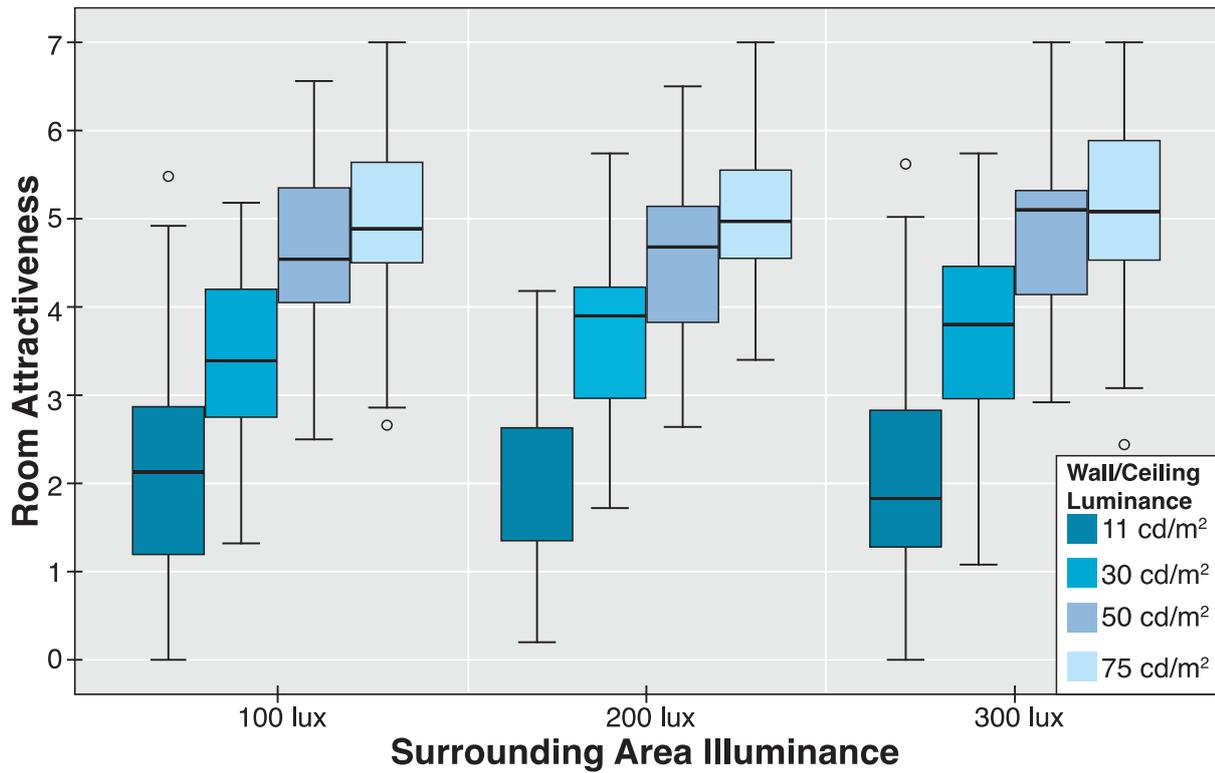


Figure 2: Boxplot of 'visual attractiveness'

Mean subjective responses of visual lightness and room attractiveness showed a very good correlation with the average luminance in a 40° horizontal band first described by Loe (1994). Trends were estimated by regression with a power function, with $R^2 > 0.7$ for both components.

Although the semantic differential scales do not have a defined centre-point, they are often assumed to have an arbitrary zero-point that can be regarded as the point where general subjective responses change from one of the bipolar adjectives to the other ((van Ooyen et al. 1987), (Loe et al. 1994), (Völker 2006)). Thus, in this work around the zero point of the visual lightness scale subjective responses are assumed to change from generally dim to generally bright and for the room attractiveness scale from generally unattractive to generally attractive respectively.

The luminance value in the 40° horizontal band corresponding to the middle of the visual lightness scale was found to approximately 38.4 cd/m², for the room attractiveness scale to 38.8 cd/m². Thus, it can be assumed that for a room to appear generally bright and attractive, the average luminance in the 40° horizontal band should be in this order of magnitude.

6 Discussion and Conclusion

Results indicate a low visual effectiveness of surrounding area illuminance on visual appearance of the space. The pleasantness of the test laboratory was not affected withing the range of the independent variables used in this work. Visual lightness as a measure of brightness perception was affected significantly when increasing surrounding area illuminance from 300 lux to 100 lux. However, graphical evaluation showed only small changes of about Δ Median \approx 0.3 rating units.

Changes in wall and ceiling luminance on the other hand led to significant enhancements of room appearance judgement. An increase from 11 cd/m² to 30 cd/m² alone more than counterbalanced the effect of decreased surrounding area illuminance. For the space to appear generally attractive and bright, the derived luminance values in the order of ~40 cd/m² are in good accordance with previous research (e.g. (van Ooyen et al. 1987), (Loe et al. 2000), (Veitch & Newsham 2000) and others).

The results show that regarding visual appearance the inclusion of wall and ceiling illuminances in current standards such as EN 12464-1 is a step in the right direction. The illumination of vertical surfaces has a great impact on perceived lighting quality and makes an office space appear brighter and more attractive. However, illuminance recommendations are not an adequate design approach since the characteristics of the observed surface are not included. The unproblematic applicability of illuminance values in lighting calculations is undisputed. Still, appropriate recommendations are minimum quantities of luminances since this is the measure actually seen and appraised by occupants. Moreover, the recommended values of 50 lux for the ceiling and 75 lux for the walls are too low regardless of the actual surface reflectance. If one assumes reflectances of 70%/50%/20% for ceiling/walls/floor, illuminance values should be in the order of 180 lux for the ceiling and 250 lux for the walls to achieve luminances of about 40 cd/m² according to formula (1). This appears to lead to a major increase in energy consumption. However, if recommendations for the illuminance in surroundings can be decreased to 100 lux, the impact on energy consumption can be optimised. If energy efficiency can be re-defined as lighting quality per connected load, a lighting installation with brighter walls and lower surrounding area illuminance is more energy-efficient than an installation exactly meeting lighting standard recommendations.

7 References

- Baron, R.A., Rea, M.S. & Daniels, S.G., 1992. Effects of indoor lighting (illuminance and spectral distribution) on the performance of cognitive tasks and interpersonal behaviors: The potential mediating role of positive affect. *Motivation and Emotion*, 16(1), pp.1–33.
- BAuA, 2011. ASR A3.4 Technische Regeln für Arbeitsstätten,
- Bean, A.R. & Hopkins, A.G., 1980. Task and background lighting. *Lighting Research and Technology*, 12(3), pp.135–139.
- CEN, 2011. EN 12464-1:2011: Lighting of work places — Part 1: Indoor work places, Berlin, Germany: Beuth Verlag GmbH.
- CIE, 2006. CIE 175:2006: A FrameworkK for the Measurement of visual appearance, Vienna, Austria.
- Davis, R.G. & Ginthner, D.N., 1990. Correlated color temperature, illuminance level, and the Kruithof curve. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 19(1), pp.27–38.
- Fischer, D., 1973. Comparison of some European interior lighting recommendations. *Lighting Research and Technology*, 5(4), pp.186–190.
- Flynn, J.E., 1977. A study of the subjective responses to low energy and non-uniform lighting systems. *Lighting Design and Application*, 7, pp.167–179.
- Houser, K.W. et al., 2002. The subjective response to linear fluorescent direct/indirect lighting systems. *Lighting Research and Technology*, 34(3), pp.243–260.
- IESNA, 2004. ANSI/IESNA RP-1-04: American National Standard Practice for Office Lighting, New York, USA: Illuminating Engineering Society of North America.
- Inoue, Y., 2010. Study on Illuminance Balance between Working Area and Ambient - Consideration of initial Lighting Condition, Visual Task performance and Impression of Lighting. In *Proceedings of the CIE 2010 Lighting Quality and Energy Efficiency*, Vienna. Vienna: CIE, pp. 776–782.
- Kirsch, R. & Völker, S., 2013a. Lighting quality versus energy efficiency. In *Proceedings of CIE Centenary Conference „Towards a New Century of Light“*. Paris: CIE, pp. 895–902.
- Kirsch, R. & Völker, S., 2013b. Neukonzipierter Lichtsimulator im Fachgebiet Lichttechnik an der Technischen Universität Berlin. *Licht*, 4, pp.68–70.
- Loe, D.L., Mansfield, K.P. & Rowlands, E., 2000. A step in quantifying the appearance of a lit scene. *Lighting Research and Technology*, 32(4), pp.213–222.
- Loe, D.L., Mansfield, K.P. & Rowlands, E., 1994. Appearance of lit environment and its relevance in lighting design: Experimental study. *Lighting Research and Technology*, 26(3), pp.119–133.
- Loe, D.L., Mansfield, K.P. & Rowlands, E., 1991. Light patterns and their relevance to spatial appearance and the quality of the lit environment. In *Proceedings CIE 22nd session*, Melbourne. Vienna, Austria: CIE, pp. 41–44.
- Marsden, A.M., 1972. What do we want from our lighting? *Lighting Research and Technology*, 4(3), pp.139–150.
- McCloughan, C.L.B., Aspinall, P.A. & Webb, R.S., 1999. The impact of lighting on mood. *Lighting Research and Technology*, 31(3), pp.81–88.

- Newsham, G.R. et al., 2005. Task lighting effects on office worker satisfaction and performance, and energy efficiency. *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America*, 1(4), pp.7–26.
- Van Ooyen, M.H.F., van de Weijgert, J.A.C. & Begemann, S.H.A., 1987. Preferred Luminances in Offices. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Summer, pp.152–156.
- Osterhaus, W.K.E., 1993. Office lighting: a review of 80 years of standards and recommendations. In *Proceedings of the 1993 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Toronto. New York: IEEE, pp. 2365–2374.
- Poulton, E.C., 1989. *Bias in quantifying judgements*, Lawrence Erlbaum Associates.
- Slater, A.I., Perry, M.J. & Carter, D.J., 1993. Illuminance differences between desks: Limits of acceptability. *Lighting Research and Technology*, 25(2), pp.91–103.
- Tabuchi, Y., Matsushima, K. & Nakamura, H., 1995. Preferred Illuminances on Surrounding Surfaces in Relation to Task Illuminance in Office Room Using Task-ambient Lighting. *Journal of Light & Visual Environment*, 19(1), pp.28–39.
- Veitch, J.A. & Newsham, G.R., 1998. Lighting quality and energy-efficiency effects on task performance, mood, health, satisfaction and comfort. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 27(1), pp.107–129.
- Veitch, J.A. & Newsham, G.R., 2000. Preferred luminous conditions in open-plan offices: research and practice recommendations. *Lighting Research and Technology*, 32(4), pp.199–212.
- Völker, S., 2006. *Hell- und Kontrastempfindung - ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern*. University of Paderborn.

Melatoninsuppression mit Weißlicht-LED – Erste Ergebnisse

H. Piazena^{1,2}, L. Franke¹, B. Thomsen¹, I. Kamenzky¹, R. Uebelhack¹ und S. Völker²

¹Charité Berlin, AG Medizinische Photobiologie,

²Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

8. Symposium Licht und Gesundheit, Tagungsband ISBN 978-3-7983-2671-2, Universitätsverlag der TU Berlin, 2014, S. 39-52

1 Zusammenfassung

Der Beitrag präsentiert erste Ergebnisse aus einem laufenden Projekt zur Untersuchung der abendlichen Melatoninsuppression in Abhängigkeit der Expositionsbedingungen und der Einflüsse individueller Variabilität, die an 32 gesunden Probanden mit freier Pupillenadaptation im Alter zwischen 20 und 82 Jahren unter Verwendung von Weißlicht-LED mit unterschiedlichen Spektren und Bestrahlungsstärken vorgenommen wurden. Die Expositionen erfolgten unter Ausleuchtung der gesamten Retina sowie unter Beschränkung der Exposition auf die untere bzw. obere Hälfte bei konstanter Beleuchtung sowie bei zeitlichen Unterbrechungen der Lichtexposition. Die Testungen wurden von 19:30 bis 23:30 Uhr mit sequentiellen Blutabnahmen in 60-, 30- bzw. 20 min-Intervallen zur Bestimmung der Melatoninkonzentration im Blutplasma durchgeführt. Die Lichtapplikation erfolgte in der Phase des Melatoninanstieges (22 bis 23 Uhr) nach einer vorausgegangenen Dunkelphase von 2h (20 bis 22 Uhr). Der Grad der Melatonin-suppression nach einstündiger Lichtapplikation wurde für jeden Probanden auf die individuelle Melatoninkonzentration um 22 Uhr bezogen und unter Berücksichtigung des Ausgangswertes vor der Dunkelphase bestimmt. Nicht alle untersuchten Probanden reagierten auf den Lichtstimulus mit einer Unterdrückung der Melatoninbildung. Die maximal mögliche Melatoninsuppression lag zwischen 20% und 75%. Für die Responder wurden Schwellenwerte der circadianen Bestrahlungsstärke zum Erreichen des Sättigungswertes der Melatoninsuppression zwischen $0,3 \text{ W m}^{-2}$ und $0,7 \text{ W m}^{-2}$ bestimmt. Bei circadianen Bestrahlungsstärken über $0,6 \text{ W m}^{-2}$ deutete sich bei zahlreichen Probanden der Trend einer stagnierenden Melatoninsuppression an, der möglicherweise durch Adaptationsprozesse, wie z.B. Pupillenlichtreflex, verursacht wurde. Bei getrennter Bestrahlung der oberen und der unteren Retinahälfte zeigte sich bei kleinem circadianem Stimulus eine Vergleichbarkeit des Suppressionseffektes über die untere Retinahälfte mit dem Effekt bei Exposition der gesamten Retina, während die Melatoninsuppression bei Bestrahlung der oberen Retinahälfte klein und verzögert war. Hierzu im Gegensatz ergab sich bei großem circadianem Stimulus und Exposition der oberen Retinahälfte ebenfalls eine wesentliche Melatoninsuppression. Zeitliche Unterbrechungen der Lichtexposition resultierten je nach

Dauer und Abfolge eingeschobener Dunkelphasen selbst bei großen circadianen Bestrahlungsstärken in Schwächung oder sogar im Ausbleiben des Suppressionseffektes.

2 Einführung und Ziele

Licht hat die Funktion eines Zeitgebers für alle biologischen Abläufe, die sich nach einem endogenen vorgegebenen Rhythmus im Verlauf des Tages (oder des Jahres) verändern. Der Schrittmacher (die „innere Uhr“) für diese Rhythmen befindet sich in einem Kerngebiet des ventralen *Hypothalamus*, dem *Nucleus suprachiasmaticus* (SCN). Hier wird eine Periodenlänge, die nur geringfügig von 24 Stunden abweicht, generiert. Man spricht daher von circadianen Rhythmen.

Die „innere Uhr“ im SCN benutzt neuroendokrine und neuronale Mechanismen, um Zeitinformationen an Organe und Gewebe zu vermitteln. Das Hormon Melatonin wird als der beste Marker für die Phasenlage der „innere Uhr“ bei Menschen gesehen (Wirz-Justice und Staedt, 2008). Es soll Informationen über Licht und Dunkel, die aus der Umwelt über die Retina, den SCN und die Epiphyse kommen, an Zellen und Organe weiterleiten, um so eine optimale Anpassung im Stoffwechsel und Verhalten an diese Umwelt zu ermöglichen.

Melatonin ist ein Hormon der Dunkelheit, da seine Synthese und Freisetzung einem vorgegebenen endogen Rhythmus mit Maximalwerten zum Zeitpunkt der subjektiven Nacht unterliegt. Zudem stellt es einen der effektivsten Radikalfänger dar und besitzt Eigenschaften, die das Immunsystem positiv beeinflussen und das Wachstum von Tumorzellen hemmenden können (Roberts 1995, Haldar und Ahmad 2010).

Obwohl Melatonin häufig als Schlafhormon bezeichnet wird, ist es nach dem heutigen Stand der Kenntnisse lediglich an der Schlafinitiierung beteiligt, wird jedoch für den Schlaferhalt nicht benötigt. Untersuchungen zeigten, dass die habituelle Einschlafzeit im Durchschnitt 2 bis 4 Stunden nach dem Einsetzen der Melatoninsynthese in der Epiphyse liegt (Santhi et al. 2011; Wright, 2005).

Mit der Einführung elektrischer Beleuchtung, sowie Schichtarbeit wurde der Mensch immer stärker von dem natürlichen Hell-Dunkel-Wechsel abgekoppelt. Die Diskrepanz zwischen gesellschaftlichen Zeitvorgaben und endogenen biologischen Rhythmen kann bei Menschen, deren innere Uhr sich weniger gut an diese Vorgaben anpasst, zu gesundheitlichen Problemen führen.

Eine abendliche oder nächtliche Lichtexposition mit hinreichender circadianer Wirksamkeit kann die Melatoninsynthese unterdrücken. Die hierzu erforderlichen Schwellenwerte sind insofern interessant, als sie Aussagen zur individuellen Lichtsensibilität des perzipierenden Systems gestatten und zur Beeinflussung der circadianen Rhythmik mit Licht genutzt werden können.

Kurzwelliges Licht besitzt eine große relative Wirksamkeit im Hinblick auf die abendliche und nächtliche Melatoninsuppression. Seit der Entdeckung spezifischer Rezeptoren für kurzwelliges Licht in der Retina (Provencio et al., 2002, Berson et al., 2002), die speziell für die Vermittlung nicht-visueller Lichtwirkungen (*non image forming light responses*) verantwortlich sind, wird zunehmend klar, dass Lichtquellen und Lichtszenarien der Allgemeinbeleuchtung nicht nur der Erfüllung von Sehaufgaben dienen können, sondern auch Wohlbefinden und Gesundheit beeinflussen können.

Vor diesem Hintergrund bestand das Ziel der noch nicht abgeschlossenen Untersuchungen darin, Weißlicht-LED mit unterschiedlichen Spektren und Farb-temperaturen auf ihre Wirksamkeit bezüglich der Melatoninsuppression bei gesunden Probanden zu prüfen und miteinander zu vergleichen. Mit Hilfe quantitativer Beziehungen zwischen Stimulus und

Wirkung sollte die Spannbreite individueller Schwellen-bestrahlungsstärken zur Erreichung maximal möglicher Melatoninsuppression nach definierter Anwendungsdauer ermittelt werden.

Auf Grund der hochkomplexen Mechanismen, die am Prozess der lichtinduzierten Melatoninsuppression beteiligt sind, erschien es als notwendig, die Experimente unter realistischen Expositionsbedingungen des täglichen Lebens, d.h. ohne Anwendung pupillenerweiternder Medikamente, zu relevanten Tageszeiten, an Personen unterschiedlichen Alters, unter unterschiedlichen geometrischen Expositionsbedingungen sowie unter zeitlicher Diskontinuität der Lichtexposition durchzuführen.

Hier werden erste Zwischenergebnisse des noch laufenden Forschungsprojektes vorgestellt.

3 Methoden

Probanden. Die experimentelle Bestimmungen der abendlichen Melatoninsuppression erfolgten an 32 gesunden Probanden des Morgen- und des Indifferenztyps im Alter zwischen 20 und 82 Jahren nach dem Einsetzen der abendlichen Melatonionsynthese zwischen 22.00 und 23.00 Uhr und vorausgegangener Dunkelexposition zwischen 20.00 und 22.00 Uhr.

Zur Teilnahme an den Untersuchungen mussten die Probanden streng definierte Einschluss- und Ausschlusskriterien erfüllen. Zur Bestimmung des Chronotyps der Studienteilnehmer kamen etablierte Fragebögen wie der *Morning-Evening-Questionnaire* nach Horne und Østberg (MEQ) sowie der *Munich-Chronotype-Questionnaire* zur Anwendung.

Pupillenerweiternde Medikamente wurden nicht eingesetzt. Die Probanden mussten definierte Verhaltensregeln einhalten, u.a. die üblichen Zubettgehzeiten einhalten sowie auf Nahrungsaufnahme und Kaffeetrinken nach 15 Uhr am Untersuchungstag verzichten.

Bestrahlungstechnik. Um die gesamte Retina während der Lichtexposition in 2π -Geometrie zu erfassen, wurden Ulbrichtsche Kugeln eingesetzt (Abb. 1), die in der ersten Serie der Untersuchungen mit Warmweiß-LED (Korrelierte Farbtemperatur, CCT = 2666 K, Relative circadiane Wirksamkeit $k_{cv} = E_c/E_v = 0,447 \text{ W m}^{-2} \text{ klx}^{-1}$ (Philips, Eindhoven) und in der zweiten Serie mit Kaltweiß-LED (CCT = 6060 K, $k_{cv} = 1,209 \text{ W m}^{-2} \text{ klx}^{-1}$ (Sygonix, Nürnberg) ausgerüstet wurden (Abb. 2), (E_c – circadiane Bestrahlungsstärke, E_v – Beleuchtungsstärke).

Abbildung 3 zeigt die räumliche Verteilung der Leuchtdichte in der Äquatorebene und auf dem durch den Mittelpunkt des Lichtaustrittsfensters verlaufenden Meridian.



Abbildung 1: Zwei Ulbrichtsche Kugeln zur Lichtexposition in seitlicher Ansicht.

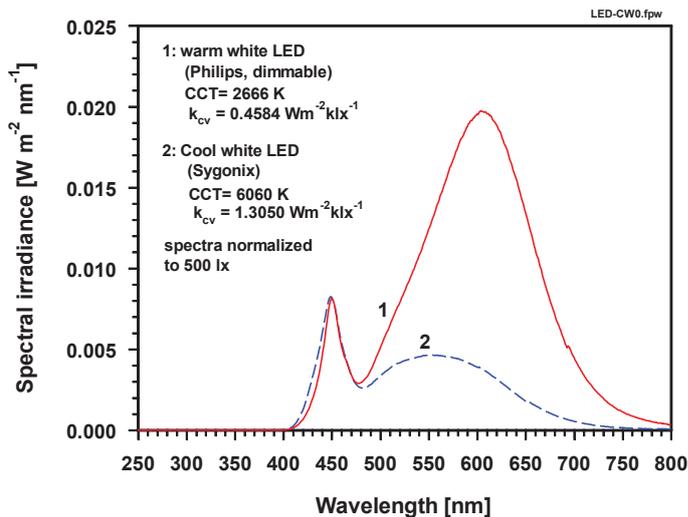


Abbildung 2: Die spektrale Bestrahlungsstärke der eingesetzten Warmweiß-LED (Philips, Eindhoven) und Kaltweiß-LED (Sygonix, Nürnberg) als Funktion der Wellenlänge und nach Normierung auf einen Betrag von jeweils 500 lx.

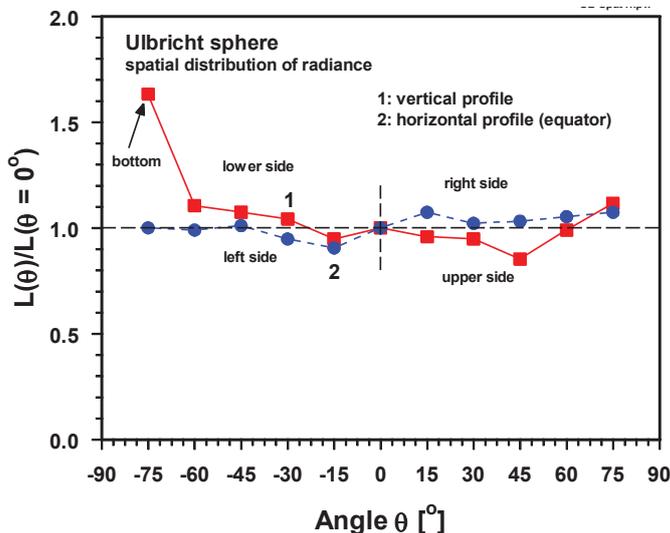


Abbildung 3: Die relative Leuchtdichte in der Ulbricht'schen Kugel als Funktion des Messwinkels bezüglich der Normalen im Mittelpunkt des Lichtaustrittsfensters in der Äquatorebene (horizontal) und entlang des Nullmeridians (vertikal).

Lichtexposition. Alle angegebenen Bestrahlungsstärken, denen die Probanden ausgesetzt wurden, beziehen sich auf die corneale (vertikale) Ebene in Augenhöhe am Kopf und in (normaler) Richtung des dem Lichtaustrittsfenster gegenüberliegenden Punktes auf der Äquatorebene.

Die Beträge der circadianen Bestrahlungsstärken und der Beleuchtungsstärken wurden auf Basis von Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke durch Gewichtung mit dem Aktionsspektrum der Melatoninsuppression (gemäß Gall und Lapuente, 2002) und mit der Wirkungsfunktion der CIE für visuelle Reize bei Helladaptation (DIN 5031/3, 1982) und anschließender Integration im Vorfeld der Experimente bestimmt und während der Experimente mit einem Luxmeter (Typ: Mini-Lux, Marx Elektronik, Berlin) kontrolliert. Für die Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke (vgl. Abb. 2) wurde ein gemäß NIST kalibriertes Doppelmonochromator-Spektralradiometer des Typs OL 756 (Optronic, Orlando/Fl., USA) eingesetzt, dem eine Ulbricht'sche Kugel als Empfänger vorgeschaltet war.

Die Probanden wurden innerhalb dieser Serien unterschiedlichen, innerhalb der einzelnen Untersuchungen konstant gehaltenen Bestrahlungsstärken ausgesetzt, wobei jeder Proband nur einmal pro Woche an den Experimenten teilnahm.

Melatoninkonzentration. Die Messungen erfolgten aus Blutplasmaproben. Hierzu wurden am sitzenden Probanden an allen Studientagen zwischen 19:30 und 23:30 Uhr sequentiell Blutproben in 60 min-, 20 min- und 30 min- Abständen aus einem peripheren Venenverweilkatheter durch medizinisches Fachpersonal entnommen. Die Blutproben wurden zentrifugiert, das gewonnene Plasma portioniert und bis zur Melatoninmessung bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingefroren. Die quantitative Bestimmung der Melatoninkonzentration im Blutplasma erfolgte mit dem Melatonin Direct RIA Kit (Labor Diagnostika Nord GmbH & Co. KG, Nordhorn).

Melatoninsuppression. Die Bestimmungen wurden im zeitlichen Verlauf der Lichtexposition (nach 20, 40 und 60 min) rechnerisch aus den Daten der Melatoninkonzentration, unter Normierung auf den Betrag um 22:00 Uhr und unter Einbeziehung des Ausgangswertes vor Beginn der Dunkelphase ermittelt.

Melatoninsuppression bei getrennter Exposition der oberen und der unteren Retinahälfte. Zur Untersuchung der Melatoninsuppression bei einzelner Exposition der oberen und der unteren Hälfte der Retina trugen die Probanden spezielle Brillen mit eingesetzten halbseitigen Blenden (s. Abb. 4) und erhielten die Anweisung, ihren Blick auf den markierten, dem Lichtaustrittsfenster in der Äquatorebene liegenden Fixationspunkt zu richten.



Abbildung 4: Probandin mit aufgesetzter Brille zur Abschattung der oberen Retinahälfte.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Melatoninsuppression mit Warmweiß LED vs. Kaltweiß-LED

Die als *Responder* identifizierten Probanden zeigten einen mit der Bestrahlungsstärke ansteigenden Grad der Melatoninsuppression, der bei gleicher Bestrahlungsstärke jedoch erheblichen individuellen Unterschieden unterworfen war.

Die individuellen Suppressionsdaten wurden in Abb. 5 für den untersuchten Bereich der circadianen Bestrahlungsstärke zwischen $E_c \approx 0,2\text{ W m}^{-2}$ und $E_c \approx 1,2\text{ W m}^{-2}$ dargestellt.

Hinzuweisen ist auf den sich mit Beträgen von $E_c > 0,6\text{ W m}^{-2}$ andeutenden und im Weiteren näher zu untersuchenden Trend stagnierender Melatoninsuppression. Hierfür sind möglicherweise Adaptationsprozesse in den Augen verantwortlich, so dass in der Konsequenz Expositionen mit kleinerer Bestrahlungsstärke für die Melatoninsuppression

mit Beträgen zwischen $E_c \approx 0,3 - 0,7 \text{ W m}^{-2}$ zum Erreichen maximaler Melatoninsuppression ausreichen könnten.

Vergleichbare Schwellenbestrahlungsstärken wurden zuvor bei Anwendung von Halogen- und Weißlicht-Fluoreszenzlampen gefunden (vgl. Piazena, 2010 a, b).

Die *Non-Responder* zeigten dagegen selbst oberhalb der für die *Responder* gefundenen Schwellenwerte Anstiege der Melatoninkonzentration, Stagnation oder nur unwesentliche Abfälle.

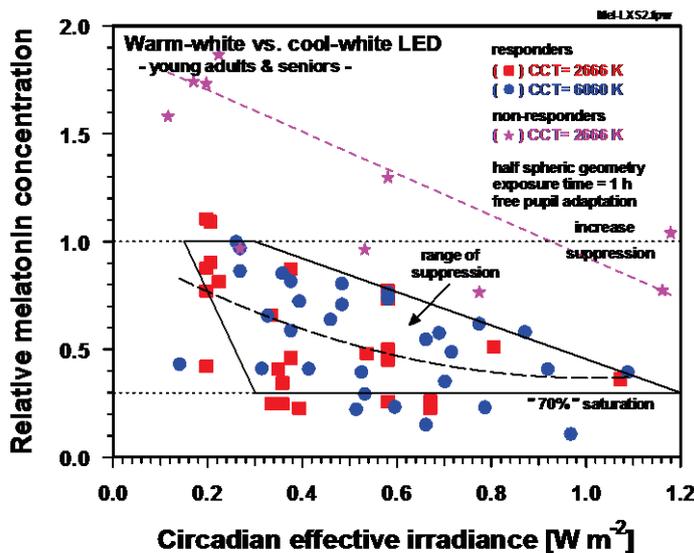


Abbildung 5: Die relative Melatoninkonzentration nach einstündiger Lichtexposition in 2π -Geometrie mit Warmweiß-LED (rote Quadrate) und mit Kaltweiß-LED (blaue Kreise) unter Einbeziehung aller *Responder* im Alter zwischen 20 und 82 Jahren sowie der *Non-Responder* mit Warmweiß-LED (pinkfarbene Sterne). Lichtexpositionen bei freier Pupillenadaptation.

4.2 Melatoninsuppression bei Exposition der oberen vs. der unteren Retinahälfte

Glickman et al. wiesen bereits im Jahre 2003 experimentell nach, dass die Melatoninsuppression bei Exposition der unteren Retinahälfte annähernd so groß ausfällt als bei Exposition der gesamten Retina, während die Exposition der oberen Hälfte mit gleichen Beträgen der Beleuchtungsstärke von jeweils 200 lx und 100 lx sich lediglich gering von den Effekten der Dunkelkontrolle unterschied. Hieraus schlossen sie auf eine größere Sensitivität der unteren Retinahälfte bzw. dichtere Packung der relevanten Photorezeptoren. Da die Untersuchungen nach Anwendung pupillenerweiternder Medikamente und ausschließlich unter Nutzung einer 150 W-Halogenlampe mit vergleichsweise kleiner circadianer Bestrahlungsstärke erfolgten, zielten die hier durchgeführten Experimente darauf ab, die Effekte halbseitiger Retinaexposition unter den Bedingungen freier Pupillenadaptation sowie größerer Beträge der circadianen Bestrahlungsstärke zu untersuchen. Abb. 6 enthält Daten, die mit warmweißem Licht, einer Beleuchtungsstärke $E_v \approx 800 \text{ lx}$ und circadianen Bestrahlungsstärken von $E_c \approx 0,38 \text{ W m}^{-2}$ erzeugt wurden, und die Aussagen von Glickman et al. in Bezug auf die Melatoninsuppression bestätigen. Als bemerkenswert erscheint darüber hinaus, dass der Prozess der Melatoninsuppression bei Exposition der oberen Retinahälfte nicht nur schwächer ausfiel, sondern auch verzögert eintrat (vgl. Abb. 6, Kurve 3).

Im Unterschied zu Abb. 6 zeigten die Daten in Abb. 7 für den Fall der Exposition mit kaltweißem Licht, einer Beleuchtungsstärke von ebenfalls $E_v \approx 800$ lx jedoch einer circadianen Bestrahlungsstärke $E_c \approx 0,97$ W m⁻², dass auch die Exposition der oberen Retinahälfte Wirkungen auf die Melatoninkonzentration verursachte, die mit denen der unteren Retinahälfte vergleichbar waren.

Somit erscheint es als möglich und in Bezug auf praktische Anwendungen als relevant, die Effekte ungleicher Verteilung der Photorezeptoren auf der Retina zumindest in Grenzen durch die Vergrößerung des circadianen Stimulus ausgleichen zu können.

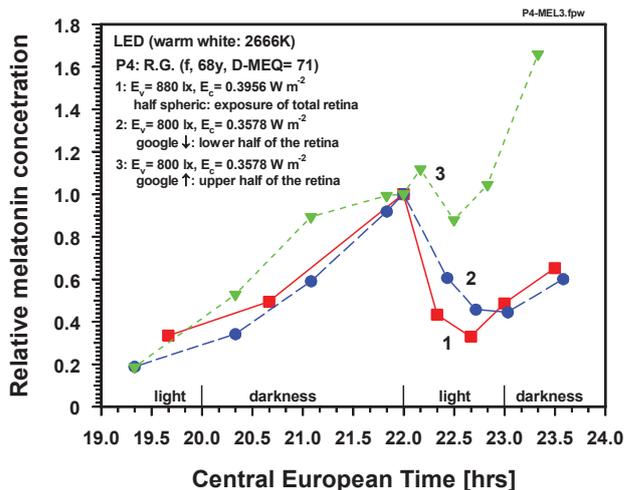


Abbildung 6: Die relative Melatoninkonzentration in der Anstiegsphase nach Einsetzen der abendlichen Melatoninsynthese (20 – 22 Uhr), im Verlauf der Lichtexposition in 2π-Geometrie mit Warmweiß-LED ($E_v \approx 800$ lx, $E_c \approx 0,38$ W m⁻²) zwischen 22 Uhr und 23 Uhr sowie nach der sich anschließenden, halbstündigen Dunkelphase bis 23.30 Uhr. Lichtexposition der gesamten Retina (Kurve 1), der unteren Retinahälfte (Kurve 2) und der oberen Hälfte (Kurve 3).

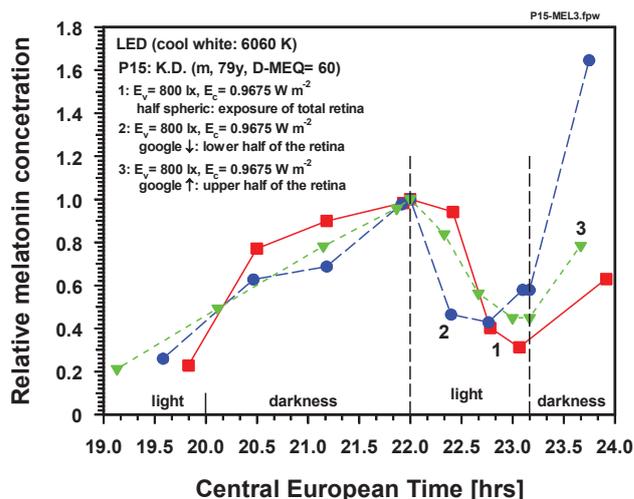


Abbildung 7: Die relative Melatoninkonzentration in der Anstiegsphase nach Einsetzen der abendlichen Melatoninsynthese (20 – 22 Uhr), im Verlauf der Lichtexposition in 2π-Geometrie mit Kaltweiß-LED ($E_v \approx 800$ lx, $E_c \approx 0,97$ W m⁻²) zwischen 22 Uhr und 23 Uhr sowie nach der sich anschließenden, halbstündigen Dunkelphase bis 23.30 Uhr. Lichtexposition der gesamten Retina (Kurve 1), der unteren Retinahälfte (Kurve 2) und der oberen Hälfte (Kurve 3).

4.3 Melatoninsuppression bei zeitlich wechselnder Lichtexposition („Ein/Aus“)

Die Untersuchungen zum Einfluss des Lichts auf die Melatoninsuppression erfolgten bisher in der überwiegenden Mehrzahl unter statischen Bedingungen, die jedoch nicht dem täglichen Leben entsprechen. Daher ergab sich die Frage zum Einfluss zeitlich wechselnder Beleuchtungsbedingungen, die einerseits mit Änderungen des circadianen Stimulus und andererseits mit Adaptationsprozessen und wechselnden Adaptations-zuständen der Augen verbunden sind.

Ein erstes Beispiel extremer Störungen der Lichtexposition zeigt Abb. 8. Dargestellt wurde hier der zeitliche Verlauf der Melatoninkonzentration bei Exposition mit kaltweißem Licht, einer Beleuchtungsstärke von $E_v \approx 800 \text{ lx}$ und einer circadianen Bestrahlungsstärke $E_c \approx 0,98 \text{ W m}^{-2}$ unter den Bedingungen zeitlicher Konstanz (Kurve 1) sowie bei Ein- und Ausschaltvorgängen im Takt $L = 1 \text{ min} / D = 1 \text{ min}$ (Kurve 2) und im Takt $L = 5 \text{ min} / D = 5 \text{ min}$ (Kurve 3), ($L = \text{Licht}$, $D = \text{Dunkel}$).

Während die Melatoninkonzentration bei zeitlich konstanter Exposition kontinuierlich abnahm (Kurve 1), unterschied sich ihr Anstieg im Fall des L/D-Wechsels im Minutentakt trotz des großen circadianen Stimulus kaum vom Anstieg während der Dunkelphase nach dem Einsetzen der Melatoninsynthese (Kurve 2). Hierzu im Unterschied resultierte der L/D-Wechsel im Takt von 5 Minuten in einer verzögert eintretenden Lichtwirkung, die in Stagnation der Melatoninkonzentration am Ende der Lichtexposition mündete, jedoch nicht im Abbau von Melatonin (Kurve 3).

Hieraus ist zu schlussfolgern, dass zeitliche Unterbrechungen der Lichtexposition je nach L/D-Verhältnis zu wesentlichen Störungen und sogar zum Ausbleiben der Melatoninsuppression selbst bei großen circadianen Bestrahlungsstärken und Exposition der gesamten Retina führen können.

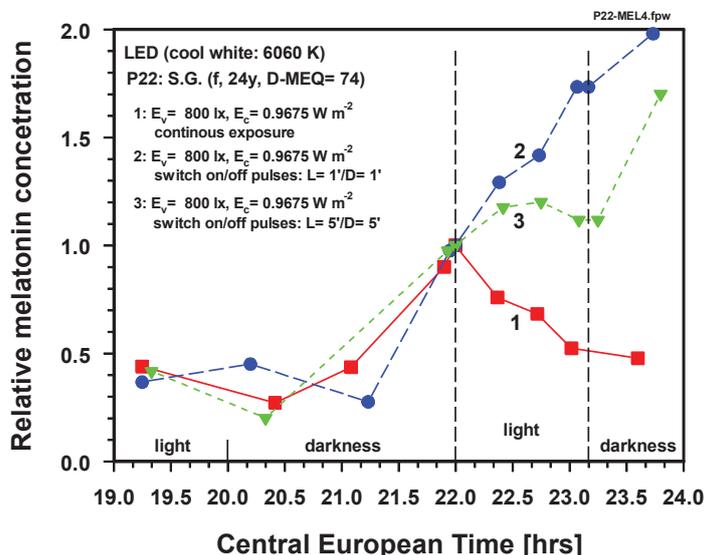


Abbildung 8: Die relative Melatoninkonzentration in der Anstiegsphase nach Einsetzen der abendlichen Melatoninsynthese (20 – 22 Uhr), im Verlauf der Lichtexposition in 2π -Geometrie mit Kaltweiß-LED ($E_v \approx 800 \text{ lx}$, $E_c \approx 0,97 \text{ W m}^{-2}$) zwischen 22 Uhr und 23 Uhr sowie nach der sich anschließenden, halbstündigen Dunkelphase bis 23.30 Uhr. Kontinuierliche Lichtexposition (Kurve 1) sowie zeitlich unterbrochene Lichtexposition („Ein/Aus“) mit einem Licht/Dunkel-Verhältnis von $L = 1 \text{ min} / D = 1 \text{ min}$ (Kurve 2) und $L = 5 \text{ min} / D = 5 \text{ min}$ (Kurve 3).

5 Ausblick

Die vorgestellten Daten sind erste Ergebnisse aus einem laufenden Projekt und daher als vorläufig zu betrachten.

Weitere Untersuchungen erfolgen zum Ausbau der statistischen Datenbasis sowie zur detaillierten Analyse der

- Einflüsse von Spektrum und Bestrahlungsstärke auf den Prozess der Melatoninsuppression für die Diskussion der Anwendbarkeit und Grenzen von Additivität und Proportionalität bei Anwendung von Weißlicht vor dem Hintergrund adaptiver Prozesse und individueller Variabilität.
- Effekte unvollständiger Ausleuchtung der Retina auf die Melatoninsuppression bei freier Pupillenadaptation, unterschiedlichen Leuchtdichten und Raumwinkeln
- Effekte zeitlicher Variabilität der Beleuchtungsstärke auf den Prozess der Melatoninsuppression.

6 Literatur

- [1] Burgess HJ, Fogg LF. (2008): Individual Differences in the Amount and Timing of Salivary Melatonin Secretion. 2008;PLoS ONE 3(8): e3055.
doi:10.1371/journal.pone.0003055
- [2] DIN 5031/3 (1982): Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Teil 3: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik, Beuth-Verlag, Berlin, 1982.
- [3] Fourtillan JB, Brisson AM, Fourtillan M, Ingrand I, Decourt JP, Girault J. (2001): Melatonin secretion occurs at a constant rate in both young and older men and women. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 2001;280(1):E11-22.
- [4] Gall, D. und V. Lapuente (2002): Beleuchtungsrelevante Aspekte bei der Auswahl eines förderlichen Lampenspektrums.- *Licht* (Heft 7/8), Mai 2002.
- [5] Glickman, G., J.P. Hanifin, M.D. Rollag, J. Wang, H. Cooper and G.C. Brainard (2003): Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans.- *J. Biol. Rhythms* 18 (2003) 71-79.
- [6] Haldar, C. and R. Ahmad (2010): Photoimmunomodulation and melatonin.- *J. Photochem. Photobiol.* 98 (2010) 107-117.
- [7] Lucas et al. (2013): Measuring and using light in the melanopsin age.- *Trends in Neurosciences* (Article in press).
- [8] Piazena, H., L. Franke und R. Uebelhack (2010 a): Photobiologische Grundlagen der gesteuerten Melatoninsuppression.- Wissenschaftlicher Abschlußbericht zum Forschungsprojekt BMBF 13N8790, Berlin, Juni 2010.
- [9] Piazena, H., L. Franke, R. Uebelhack, D. Kockott and S. Völker (2010 b): Light-controlled melatonin suppression considering person's age.- "Lighting Quality and Energy Efficiency", CIE Conference, Vienna, March 14 – 17, 2010.
- [10] Roberts, J. (1995): Visible light induced changes in the immune response through an eye-brain mechanism (photoneuroimmunology).- *J. Photochem. Photobiol.* 29 (1995) 3-15.

- [11] Santhi N, Thorne HC, van der Veen DR, Johnsen S, Mills SL, Hommes V, Schlangen LJ, Archer SN, Dijk DJ. The spectral composition of evening light and individual differences in the suppression of melatonin and delay of sleep in humans. - *J Pineal Res.* 2011 Sep 20. doi: 10.1111/j.1600-079X.2011.00970.x.
- [12] Wirz-Justice A, Graw P, Krauchi K, Gisin B, Jochum A, Arendt J, Fisch HU, Buddeberg C, Poldinger (1993): W. Light therapy in seasonal affective disorder is independent of time of day or circadian phase. - *Arch Gen Psychiatry* 1993;50(12):929-37.
- [13] Wright KP Jr, Gronfier C, Duffy JF et al. (2005): Intrinsic period and light intensity determine the phase relationship between melatonin and sleep in humans. - *J Biol Rhythms* 20 2005, 168–177.

Analyse des thermischen Degradationsverhaltens von LED Systemen

Manfred Scholdt, Klaus Trampert, Cornelius Neumann
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut

Tagung LICHT 2012, Berlin, Tagungsband S. 262-269

1 Einleitung

Im Rahmen des BMBF Projektes UNILED werden Verfahren entwickelt, mit denen die Lebensdauer von LED Systemen anhand von Kurzzeitmessung abgeschätzt werden kann. Die aktuelle Methode zur Abschätzung der Lebensdauer besteht darin, den Lichtstrom der LED Systeme bis zu 6.000 h bzw. 10.000 h zu messen und die Langzeitdegradation zu extrapolieren [1], [2]. In der Beobachtungsperiode sind teilweise nur geringe Lichtstromdegradationen von weniger als 5 % zu erwarten, was ist in Abbildung 1 exemplarisch zu sehen ist. Deshalb besteht die Notwendigkeit, den Lichtstrom der LED Systeme möglichst präzise zu messen, wofür die Sicherstellung eines thermisch stabilen Zustandes die Voraussetzung ist.

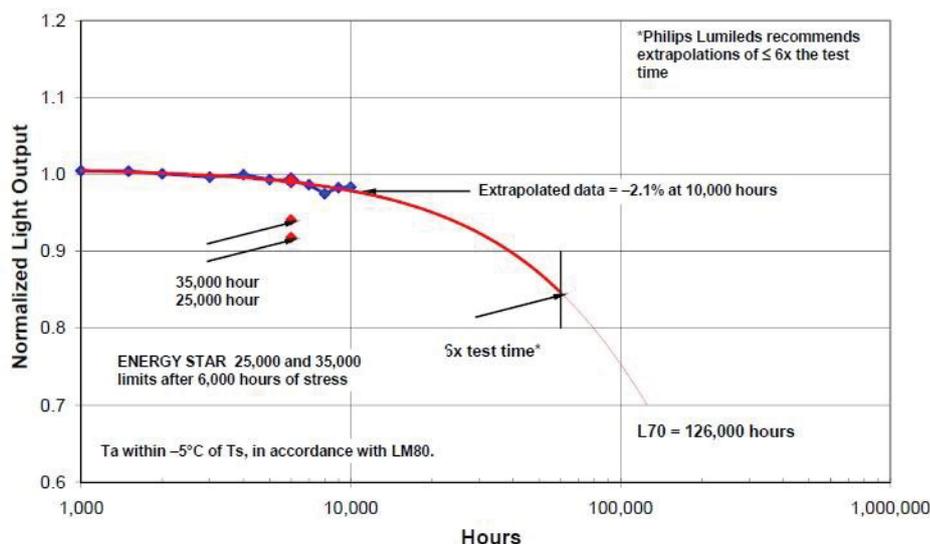


Abbildung 1: Messwerte zur Lebensdauerbestimmung einer weißen LUXEON Rebel nach LM-80 [4]. Aus den Messwerten der ersten 10.000 h wird bis auf ein L70 von rund 125.000 h extrapoliert. Zu beachten ist die Streuung der Messwerte im Vergleich ihrer absoluten Höhe und die sich daraus ergebene Unsicherheit der Extrapolation.

Deshalb wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem die thermische Stabilisierung analysiert und vorhergesagt werden kann. Als Referenz wurden bei den untersuchten Systemen die Stabilisierungszeiten nach den Normen LM-79-08 der amerikanischen IES und der DIN/PAS 62717 der IEC bestimmt und bewertet [3], [1]. Hier zeigte sich, dass die Methode der IES mit bis zu 120 min sehr lange Stabilisierungszeiten benötigt, während die Methode der IEC als Folge ihrer deutlich kürzeren Stabilisierungszeiten von 15 min bis 30 min Abweichungen von bis zu 3,8 % im Maximum erhält. Diese Abweichung liegt deutlich über der von der IEC avisierten Abweichungsschwelle von 1 %.

2 Grundlagen

2.1 Aktuelle Normen

Die amerikanische und europäische Normungskommission haben definiert, wann ein LED System den thermisch stabilen Zustand eingenommen hat. So verlangt die IES, dass bei einem zu bewertendem System nach 15 min der Lichtstrom gemessen werden soll. Wenn die letzten drei Messungen eine Veränderung aufweisen, die kleiner ist als 0,5 %, dann kann das System als stabil betrachtet werden. Diese Norm bedingt Stabilisierungszeiten von mindestens 30 min, in der Regel ergeben sich deutlich höhere Werte.

Die IEC teilt die Betrachtung ebenfalls in 15 Minutenintervalle ein. Hier muss allerdings in den letzten 5 min eines 15 Minutenintervalls jede Minute ein Messwert genommen werden. Unterscheiden sich die Höchst- und Kleinstwerte dieser Werte um weniger als 1 % von ihrem Mittelwert, gilt das System als stabil. Falls das Kriterium nicht erfüllt wird, muss die Stabilisierung um ein 15 Minutenintervall verlängert werden. Nach dem dritten Zyklus dieser Art, was gleichbedeutend mit 45 min ist, gilt das System in jedem Fall als stabil.

2.2 Thermische Beschreibung eines LED Systems

Zu Beginn der Untersuchung sollte zunächst die Temperatur der LED Systemen zeitabhängig während der Stabilisierungsphase gemessen werden. Dies beinhaltet ein Zeitintervall ab dem Einschalten bis über die Stabilisierung des Systems hinaus, was bei den vermessenen Systemen einige Stunden waren. Allerdings lässt sich die Chiptemperatur bei einer LED schwer messen, ohne den thermischen Pfad deutlich zu verändern oder von einem Messpunkt rückrechnen zu müssen. Aus diesem Grund wurde die Temperatur indirekt über die Messung der Vorwärtsspannung bestimmt, deren Temperaturabhängigkeit man ausnutzen kann. Eine Messung zur Bestimmung dieser Abhängigkeit ist in Abbildung 2 zu sehen.

Ein weiterer Vorteil der Temperaturbestimmung über die Vorwärtsspannung besteht darin, dass mit dieser Methode die Temperatur mit einer zeitlichen Auflösung im Mikrosekundenbereich bestimmt werden kann. Eine Temperaturerhöhung einer LED nach dem Einschalten mit dieser zeitlichen Auflösung ist in Abbildung 3 in logarithmischer (a) und linearer Darstellung (b) zu sehen. Es zeigt sich, dass sich die Temperatur der LED nicht linear sondern exponentiell einem stabilen Zustand annähert. Außerdem kann in der logarithmischen Darstellung erkannt werden, dass es Bereiche gibt, in denen sich die Temperatur schnell ändert und welche, in denen die Temperatur eher stabil ist.

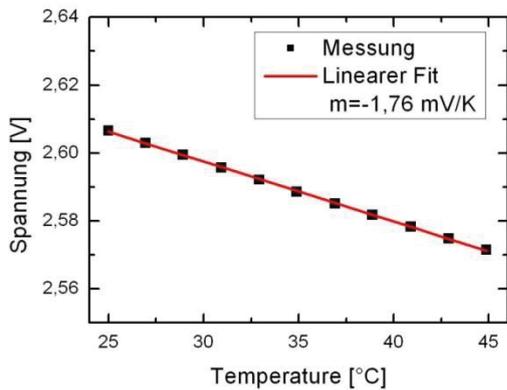
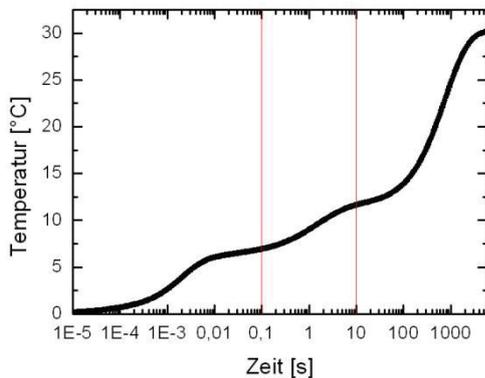
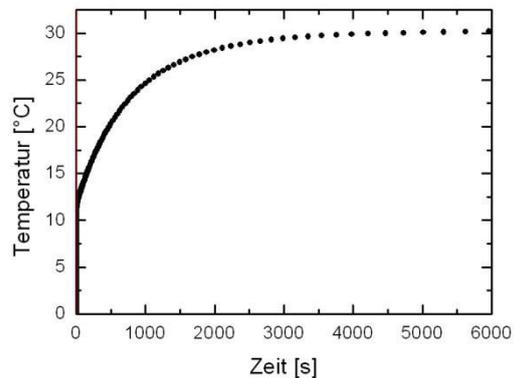


Abbildung 2: Gemessene Vorwärtsspannung einer weißen Seoul P4 LED bei einem Strom von 10 mA. Die Vorwärtsspannung verringert sich linear mit einer Steigung von $m=1,76$ mV/K.



a) logarithmische Darstellung



b) lineare Darstellung

Abbildung 3: Temperaturanstieg ΔT einer Seoul P4 LED auf einem Kühlkörper nach dem Einschalten. In der logarithmischen Darstellung (a) können Bereiche mit großer und kleinerer Steigung ausgemacht werden, während die lineare Darstellung (b) nur einen Sprung am Anfang und ein langsames Annähern an die Zieltemperatur auflöst.

Diese verschiedenen Bereiche können aus dem Aufbau des Systems bzw. thermischen Pfads beschrieben werden und repräsentieren die Bauteile LED Chip, thermisches Übergangsmaterial und Kühlkörper. Diese können mathematisch in Analogie zum elektrischen Ersatzschaltbild durch die Werte ihrer thermischen Widerstände und Wärmekapazitäten beschrieben werden, was in Abbildung 4 schematisch gezeigt wird.

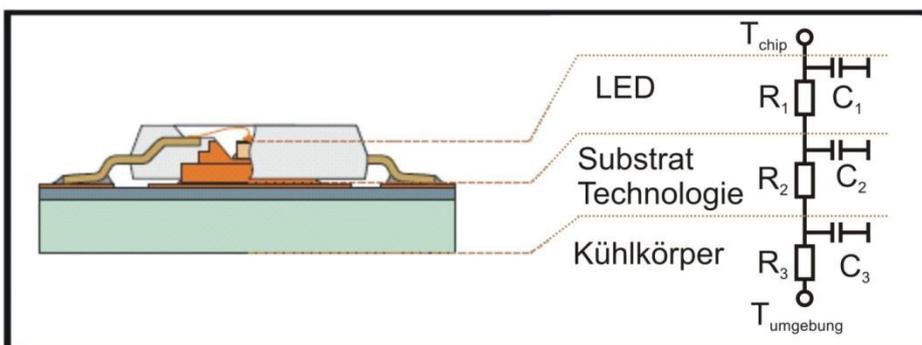


Abbildung 4: Der Thermische Pfad einer LED mit der Übertragung der Komponenten ins thermische Ersatzschaltbild. Die Zeitkonstanten der Regionen LED (1), Substrat (2) und Kühlkörper (3) liegen Bereich von $\tau_1 \approx 10^{-5}$ - 10^{-4} s, $\tau_2 \approx 10^{-1}$ - 10^1 s und $\tau_3 \approx 10^2$ - 10^3 s. (Bild nach Vorlage aus [5].)

Beschreibt man ein Bauteil aus diesem Netzwerk, in das die thermische Verlustleistung P_{th} eingebracht wird, erwärmt es sich nach dem Einschalten folgendermaßen:

$$\Delta T(t) = P_{th} \cdot R_{th} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

Hierbei ist τ das Produkt aus thermischen Widerstand R_{th} und Wärmekapazität C_{th} . Zur Beschreibung des gesamten thermischen Pfades kann nun die Lösungen aus der Netzwerktheorie der Elektrodynamik auf das thermodynamische Problem übertragen werden. Als Lösung des Forster-Netzwerks³ ergibt sich folgender Ausdruck für die Temperaturerhöhung des LED Chips nach dem Einschalten:

$$T(t) = T_0 + P_{th} \cdot \sum_i R_{th_i} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \quad (2)$$

Hierbei sind T_0 die Temperatur zum Einschaltzeitpunkt, P_{th} die thermische Verlustleistung, R_{th_i} die thermischen Widerstände und τ_i die Zeitkonstanten. Zur Beschreibung der thermischen Stabilisierung eines LED Systems ist die Charakterisierung bis auf die Chipebene nicht notwendig, da die Charakterisierung zu kurzen Zeiten nicht relevant für das Stabilisierungsproblem ist. Betrachtet man die Zeitkonstanten der verschiedenen Komponenten des thermischen Pfades, so liegen die der LED Chips in der Größenordnung von einigen zehn Millisekunden, die des thermischen Interfaces im Bereich von Sekunden und die des Kühlkörpers in Bereichen von einigen hundert bis tausend Sekunden. Somit wird die thermische Stabilisierung in optischen Messungen eines LED Systems im Wesentlichen durch die große Zeitkonstante des Kühlkörpers beeinflusst. Aus diesem Grund wird die Zeitabhängigkeit der Bauteile mit kleinen Zeitkonstanten vernachlässigt. Sie tragen zur Temperaturerhöhung nur noch durch ihren thermischen Widerstand bei, was den folgenden Ausdruck ergibt:

$$T(t) = T_0 + P_{th} \left(R_{LED} + R_{KK} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{KK}}}\right) \right) \quad (3)$$

Hier entspricht der thermische Widerstand R_{LED} der Summe der thermischen Widerstände im LED System ohne die des Kühlkörpers. Die Formeln 2 und 3 entsprechen sich ab Zeiten, die eine Größenordnung über der größten vernachlässigten Zeitkonstante liegen. Die- se Änderung kann auch durch die verschiedenen Auftragungen in Abbildung 3 veranschaulicht werden. In dieser repräsentiert die logarithmische Darstellung die Gleichung 2, die die unterschiedlichen Zeitkonstanten auch zu kleinen Zeiten auflöst. Die Wirkungsbereiche der unterschiedlichen Zeitkonstanten sind durch rote Linien markiert. In der linearen Darstellung dagegen steigt die Temperatur scheinbar direkt nach dem Einschalten sprunghaft an, um sich dann mit einer langsamen Zeitkonstante einem stabilen Wert zu nähern. Das entspricht dem Verhalten von Gleichung 3, die nur eine Zeitkonstante besitzt. Die Bereiche der roten Linien fallen in dieser Darstellung scheinbar mit der y-Achse zusammen.

³ Auf die Diskussion der Wahl der Netzwerke zwischen Forster- und Cauer-Netzwerk wird im Rahmen dieser Veröffentlichung nicht eingegangen. Es soll allerdings noch auf die Äquivalenz beider Lösungen hingewiesen werden [4].

3 Die Anpassungsfunktion

3.1 Thermische Abhängigkeit des Lichtstroms

Will man nun die Formeln der Thermodynamik auf den Lichtstromrückgang im Stabilisierungszeitraum übertragen, muss beachtet werden, wie der Lichtstrom von der Chiptemperatur abhängt. Hierbei wurde die folgende exponentielle Abhängigkeit verwendet [6]:

$$\Phi(T_0 + \Delta T) = \Phi(T_0) \cdot e^{-\frac{\Delta T}{k}} \quad (4)$$

Hierbei ist Φ der bei einem konstanten Strom emittierte Lichtstrom und k eine thermische Degradationskonstante der LED. Setzt man nun Formel 3 als zeitabhängige Temperatur im Stabilisierungszeitraum in Formel 4 ein, erhält man den zeitabhängigen Lichtstrom im Stabilisierungszeitraum.

$$\Phi(T(t)) = \Phi(T_0) + e^{P_{th} \left(R_{LED} + R_{KK} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{KK}}} \right) \right) \cdot k^{-1}} \quad (5)$$

Diese Funktion sollte nun nach der Methode der kleinsten Quadrate an Messwerte der zu untersuchenden LED Systeme angepasst werden [7]. Da die doppelte Exponentialfunktion numerisch nicht einfach anzupassen ist, wurde diese Funktion durch folgende Anpassungsfunktion ersetzt:

$$\Phi^*(t) = \Phi_{\infty} + A_1 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (6)$$

Für die Funktionen der Formeln 5 und 6 kann über einen Grenzwertvergleich gezeigt werden, dass sie für die Zeiten von $t \rightarrow 0$ und $t \rightarrow \infty$ übereinstimmen. Somit entspricht Φ_{∞} dem Lichtstrom im thermisch stabilen Zustand und kann direkt als Messwert eines thermisch stabilen Systems interpretiert werden. Da die hergeleitete Temperatur für kleine Zeiten keine Gültigkeit hat, bleibt A_1 eine Rechengröße und sollte nicht direkt auf die optische Messung übertragen werden. Die Zeitkonstante τ_0 der Anpassungsfunktion beschreibt die optische Degradation und entspricht der Degradationskonstante des Kühlkörpers τ_{KK} . Die Abweichung dieser beiden Degradationskonstanten konvergiert für große Zeiten und kann in Abhängigkeit der Temperaturerhöhung des Kühlkörpers sowie der Degradationskonstante k der LED nach oben abgeschätzt werden. Im Fall der vermessen Retrofitssysteme lag sie immer unter 5%⁴.

3.2 Anwendung der thermischen Anpassungsfunktion

Mit der Anpassungsfunktion aus Formel 6 wurden alle Systeme gefittet. Das Anpassungsergebnis hängt auch vom gewählten Anpassungsintervall ab. Um eine möglichst gutes Ergebnis zu erhalten, muss die Überlagerung mit den kurzen Zeitkonstanten der LED Systems möglichst gering sein. Aus diesem Grund wurden in dieser Untersuchung alle Systeme in einem Intervall von τ_0 bis $2 \cdot \tau_0$ angepasst. Eine Analyse über eine Optimierung der Auswahl des Anpassungsintervalls soll noch folgen.

⁴ Man darf eine Abweichung bei der Bestimmung der Zeitkonstante nicht mit einer Abweichung auf den Messwert verwechseln. Die resultierende Unsicherheit auf den Messwert ist bei den untersuchten Retrofitssystemen um mindestens eine Größenordnung kleiner.

Wie die Anpassung durchgeführt wird, wird in Abbildung 5 veranschaulicht. Zunächst wird das System vermessen. Danach werden die Messwerte auf das Anpassungsintervall reduziert, was durch die blauen, gestrichelten Linien markiert ist. In diesem Intervall wird die Anpassungsfunktion aus Formel 6 mit der Methode der kleinsten Quadrate [7] an die Messwerte gefittet. Das Anpassungsergebnis wird schließlich danach beurteilt werden, wie gut es mit den Messwert ab dem Fitintervall übereinstimmt. Für kleinere Zeiten sollte die Anpassung dagegen nicht verwendet werden.

Mit Hilfe der Anpassungsfunktion kann die Lichtstromentwicklung ab dem Anpassungsintervall vorhergesagt werden. Somit ist es möglich, für jeden Messzeitpunkt ab diesem Intervall die systematische Abweichung des thermisch nicht stabilen Systems zu bestimmen. Mit dieser Information gibt es zwei Möglichkeiten, die eigene Messung zu verbessern.

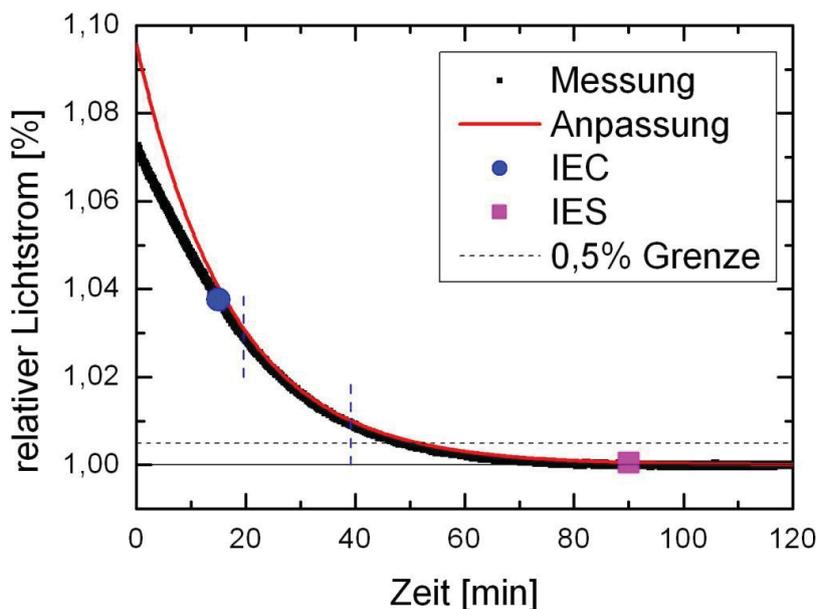


Abbildung 5: Messung eines LED Systems (schwarze Punkte). Innerhalb der blauen Linie wurde die Funktion angepasst (rote Linie). Zu beachten ist, dass die Anpassung für $t \rightarrow 0$ nicht mehr funktioniert, was Prinzip bedingt ist. Die Messung wird Vervollständig durch die Stabilisierungszeiten nach IEC und IES, sowie einer angenommenen 0,5 % Stabilitätsgrenze.

Zunächst kann man den eigenen Messwert um die bekannte Abweichung korrigieren, ohne dass man warten muss, bis das System thermisch stabil ist. Diese Methode bietet sich nur für Messungen mit kurzen Messzeiten an. Wenn die Messung ein thermisch stabiles System verlangt, kann man vorher sein Stabilitätskriterium, wie beispielsweise eine 0,5 % Abweichungsgrenze, definieren. Mit der Anpassungsfunktion kann für diese Grenze die Zeit ausgerechnet werden, wann ein System diese Grenze unterschreitet. Somit ist es möglich, die Stabilisierungszeit im Rahmen der akzeptierten Abweichung zu verkürzen.

4 Ergebnisse

In der Untersuchung wurden sechs verschiedene LED Retrofit Systeme mit einer Stückzahl von 20 vermessen. Der Lichtstromrückgang dieser Systeme konnte mit einer Genauigkeit von $R^2 > 0,99$ angepasst werden. Neben der Anpassung wurden für diese Systeme die Stabilisierungszeiten nach den Normen der IEC und IES und zu diesem Zeitpunkt die relative Abweichung zu dem Werten des thermisch stabilen Zustands bestimmt. Beispielhaft wurde auch die Zeiten für eine 0,5 % Abweichungsgrenze errechnet.

Die Ergebnisse der Mittelung über die Stichprobengröße von 20 Stück sind für jedes System in Tabelle 1 und Abbildung 6 zusammengefasst.

Bei der Analyse der Stabilisierungszeiten nach der IEC zeigt sich, dass die betrachteten Systeme mit 15 min und 30 min nach einer der beiden kürzest möglichen Zeiten als stabil zu bewerten waren. Diese kurzen Zeiten bergen jedoch das Problem, dass die meisten Systeme noch nicht die von der Norm vorgegebene Stabilisierungsschwelle von 1 % erreicht hatten. Nur eins von diesen sechs Systemen konnte richtig bewertet werden, während sich bei fünf Systemen eine Abweichung größer als 1 % ergab. Als größter Wert konnte eine Abweichung von 3,8 % über dem stabilen Wert festgestellt werden.

Diese Abweichungen vermeidet das Verfahren die IES. Die überprüften Systeme lagen immer in Bereichen, in denen die mögliche Abweichung einer mangelnden thermischen Stabilisierung die Unsicherheiten der Messungen unterschreitet. Damit wird das Ziel einer Stabilisierungsschwelle von 0,5 % deutlich unterschritten. Dies bedingt Stabilisierungszeiten, die doppelt so hoch sind als notwendig.

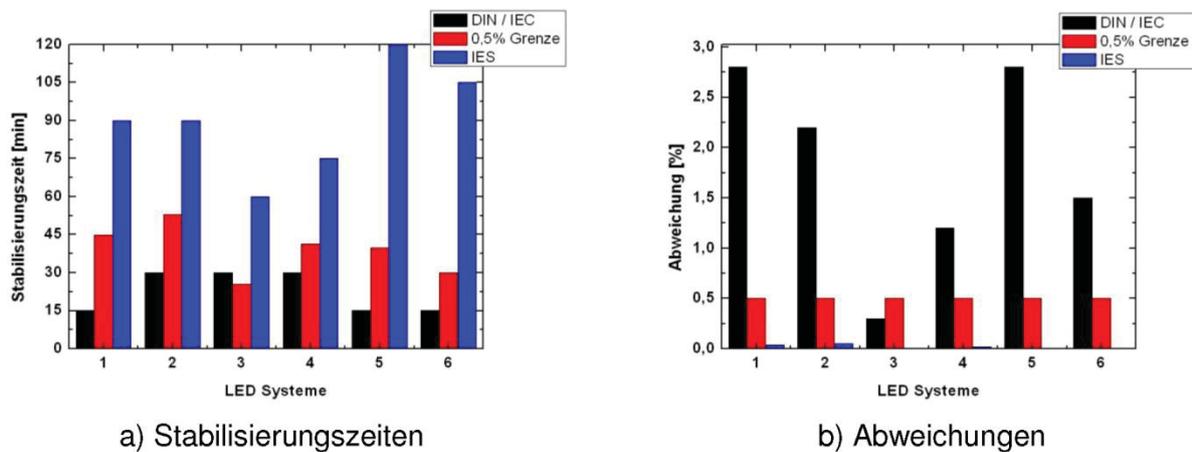


Abbildung 6: Übersicht der durchschnittlichen Stabilisierungszeiten (a) und Abweichungen (b) nach den Normen der IEC und IES sowie der berechneten 0,5 % Grenzen nach Verfahren der Anpassung.

Tabelle 1: Übersicht Bewertung LED Systeme nach IEC und IES. Die Zeitkonstante τ_0 , sowie die Abweichungen nach IEC und IES verstehen sich als Mittelung der 20 Proben eines Systems. Zusätzlich ist der größte Wert dieser 20 Proben nach der Bestimmung nach IEC als maximale Abweichung angegeben. Bei den Stabilisierungszeiten nach IEC und IES wurde der am häufigsten vorkommende Wert genommen, da diese nur in Schritten von 15 min ermittelt werden.

System	τ_0 / min	t_{Stab} IEC / min	0,5 % Grenze / min	t_{Stab} IES / min	Maximale Abw. IEC / %	Abweichung IEC / %	Abweichung IES / %
1	17,3 ± 1,8	15	44,8	90	3,8	2,8 ± 0,3	0,04 ± 0,05
2	15,6 ± 0,6	30	53,0	90	2,8	2,2 ± 0,3	0,05 ± 0,05
3	7,1 ± 0,2	30	25,5	60	0,3	0,3 ± 0,05	0,01 ± 0,05
4	10,4 ± 0,6	30	41,3	75	2,1	1,2 ± 0,4	0,02 ± 0,05
5	14,4 ± 1,0	15	39,8	120	3,1	2,8 ± 0,2	0,002 ± 0,05
6	12,8 ± 2,9	15	29,9	105	2,9	1,5 ± 0,4	0,003 ± 0,05

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine Anpassungsfunktion vorgestellt, mit der das Stabilisierungsverhalten eines LED Systems genauer analysiert werden kann. Mit dieser ist es möglich, den Lichtstrom des thermisch stabilen Zustandes bereits zu kennen, bevor das System diesen eingenommen hat. Außerdem kann eine Stabilisierungszeit berechnet werden, bei der das System eine vorgegebene Abweichungsgrenze unterschritten hat.

Ebenso konnte im Vergleich zu den Verfahren der Normen nach IEC und IES für beide Normen eine Schwäche verbessert werden. Bezüglich der IES konnte, ohne die Messunsicherheit zu erhöhen, eine Verkürzung der Messzeit um einen Faktor 2 bis 4 erzielt werden. Im Vergleich zum Verfahren der IEC können dagegen vorgegebenen Abweichungsgrenzen eingehalten werden, während die Stabilisierungsvorschrift der IEC systematische Abweichungen von bis zu 3,8 % verursachen kann.

Ausblickend werden für die Anpassungsfunktion noch zukünftige Potentiale in Bezug auf eine genauere Extrapolation der Langzeitdaten sowie eine Abschätzung der Chiptemperatur mit Hilfe einer optischen Messung gesehen.

6 Literatur

- [1] EC, „DIN IEC/PAS 62717, LED-Module für die Allgemeinbeleuchtung - Anforderungen an die Arbeitsweise,“ 2011.
- [2] IES, „LM-80-08, Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources,“ 2008.
- [3] IES, „LM-79-08 Approved Method for Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products,“ 2008.
- [4] Philips Lumileds, „DR06: LM-80 Test Report,“ Philips Lumileds, 2010. [5] Osram, Thermal Management of Golden Dragon LED,“ 2008.
- [6] C. Neumann, „Vorlesung Lichttechnik WS11“.
- [7] B. Burgeth, „Mathematik für Informatiker III,“ Mathematical Image Analysis Group, Saarland University, 2007.
- [8] R. P. Stout, „Thermal RC Ladder Networks,“ Semiconductor Components Industries, 2006.

Aufbau einer Langzeitmessung von LED Systemen

*Manfred Scholdt, Christoph Beyer, Martin Perner, Cornelius Neumann
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut*

Tagung Lux Junior Dörnfeld, 2011

1 Abstract

In diesem Beitrag wird ein verbessertes Verfahren zur Bestimmung der Einbrennzeit von LED Systemen vorgestellt, welches in Rahmen des Projektes UNILED entwickelt wurde. Ein Teilziel des BMBF Projektes UNILED ist die Abschätzung der Lebensdauer von LED Systemen aus Kurzzeitmessungen. Um dafür valide überprüfbare Daten zu erhalten, wird am Lichttechnischen Institut ein Langzeitmessplatz mit ca. 200 Brennplätzen aufgebaut, mit dem die Systeme gealtert werden können. Hierfür werden vorbereitend die verschiedenen Messnormen zur Lebensdauerbestimmung von LED Systemen untersucht und der Lebensdauerbegriff für LED Systeme definiert. Des Weiteren ist eine Eingangskarakterisierung der LED Systeme notwendig, um einerseits eine thermische Stabilisierung der Systeme gewährleisten zu können und andererseits die Messzeit der einzelnen Module möglichst gering zu halten. Die Optimierung dieser gegenläufigen Parameter wird als Bewertungsmaßstab für das Verfahren zur Bestimmung der Einbrennzeit herangezogen.

2 Einführung

Im Zuge der Erhöhung des LED Lichtstromes der letzten Jahre ist es möglich, LED Module in der Allgemeinbeleuchtung einzusetzen. Hierbei soll durch die Implementierung von LED Systemen auf Basis von Standardlampensockeln wie beispielsweise E27, E14 oder GU10 auch der Einstieg in den Massenmarkt erreicht werden. Diese LED Retrofits zeichnen sich durch unterschiedliche Qualität aus. So wurde 2009 von Stiftung Warentest eine Lebensdaueruntersuchung durchgeführt [1]. Bei dieser fielen einige Hersteller durch unrealistische Angaben auf. Einen negativen Höhepunkt setzte ein Hersteller, bei dem anstatt seiner prognostizierten 50.000 Stunden Lebensdauer alle beim Test beteiligten Systeme bereits in den ersten 1000 Stunden ausfielen.

Da auch die namenhaften Hersteller für ihre gängigen LED Systeme Lebensdauern von 25.000 bis 35.000 Stunden angegeben, ist es unpraktikabel, alle Systeme über diese Zeitspanne zu testen. Daher soll im Rahmen des Projektes UNILED ein Kurzeittest entwickelt werden, mit dem die Lebensdauern von LED Systemen prognostiziert werden.

Um die aus Kurzzeittests vorhergesagten Lebensdauern auf eine verlässliche Basis zu stellen, werden diese durch eigene Langzeitmessungen validiert. Zur theoretischen Vorbereitung dieser Untersuchung werden zwei Fragestellungen geklärt:

Erstens wird der Begriff „Lebensdauer“ im Zusammenhang mit LED Systemen definiert, um im Langzeittest aussagen zu können, wann ein System als ausgefallen zu bewerten ist. Zweitens wird die Einbrennzeit von LED Systemen untersucht, da Messwerte von LED Systemen nur in einem thermisch stabilen Arbeitspunkt vergleichbar sind. Um die einzelnen Messzeiten weiter zu reduzieren, ist es notwendig den thermisch stabilen Arbeitspunkt schnell zu identifizieren. Nach diesen Kriterien wird ein neu entwickeltes Verfahren vorgestellt und gegenüber bereits bekannten Verfahren bewertet.

3 Definition der Lebensdauer

Wie bei jedem Zuverlässigkeitstest müssen bereits im Vorfeld des Versuches die Kriterien festgelegt werden, nach denen ein Einzelsystem als ausgefallen zu bewerten ist. Die ersten rein auf LED Bedürfnisse zugeschnittenen Normen sind die von der amerikanischen „Illuminating Engineering Society“ (IES) vorgestellten Normen IES LM 79 08 und IES LM 80 08 [2] [3]. Diese geben als Ausfallursache den Rückgang des Lichtstroms einer LED an. Hierbei werden mit 70% und 50% Lichtstromrückgang vom Ausgangslichtstrom zwei mögliche Schwellenwerte genannt, ab denen ein LED-System als ausgefallen zu bewerten ist. Das Erreichen dieser Degradationszeiten wird mit Messungen zwischen 6.000 und 10.000 Stunden ermittelt und ab dem letzten Messwert auf die Schwellenwerte von 70% und 50% extrapoliert.

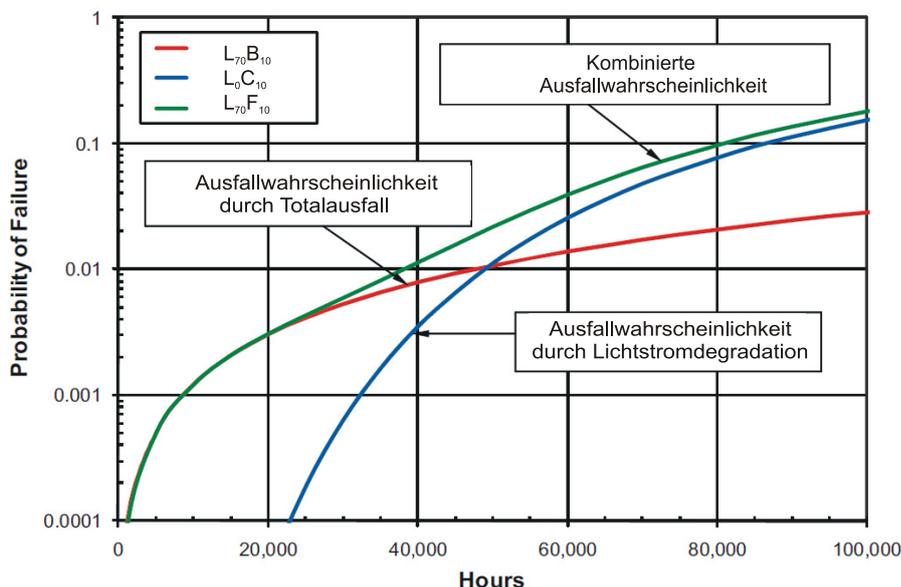


Abbildung 1: Die verschiedenen Ausfalldefinitionen: Totalausfall, Lichtstromrückgang und kombinierte Ausfallrate einer LUXEON Rebel [5]⁵

Die neueste PAS-Vorabveröffentlichung der „International Electrotechnical Commission“ (IEC) als LED-Modulnorm [4] kombiniert den Lichtstromrückgang mit einem möglichen Totalausfall von LED Systemen als Ausfallursache. Es wird allerdings dem Hersteller offen gelassen, ob er die Lebensdauer auf den Lichtstromrückgang, einen Totalausfall oder eine Kombination aus beiden Ausfallgründen beziehen will. Abweichend zur IES wird der

⁵ Die Abbildung wurde zur besseren Übersichtlichkeit leicht verändert, ohne die Graphen zu verfälschen.

Schwellenwert des Lichtstromrückgangs auf 90%, 80% oder 70% bezogen, was eine deutliche Verschärfung darstellt. Die Ausfallmenge der Systeme lässt die IEC offen. So wird es dem Hersteller überlassen, ob bei Ablauf der Lebensdauer 10 % oder 50 % der Systeme ausgefallen sind.

In Abbildung 1 sind die Auswirkungen der verschiedenen Ausfalldefinitionen für eine LUXEON Rebel bei einer festen Temperatur dargestellt [5]. Dabei sind sowohl die Unterschiede der verschiedenen Definitionen als auch die Auswirkung der unterschiedlich definierten Lebensbauergrenzen von 10 % und 50 % zu sehen. Ob als Ausfallgrund die Wahrscheinlichkeit eines Totalausfalls oder die Lichtstromdegradation dominieren, kann je nach LED System und Betriebstemperatur variieren.

4 Zwei Normverfahren zur thermischen Stabilisierung

Die Norm der IES [3] beschreibt folgende thermische Stabilisierungsvoraussetzung. Es wird alle 15 Minuten der Lichtstrom gemessen. Hiervon werden immer jeweils die letzten drei Messpunkte verglichen, was ein Intervall von 30 Minuten ergibt. Unterscheidet sich der gemessene Lichtstrom an diesen drei Messpunkte um weniger als 0,5 %, dann gilt die Lampe als thermisch stabil. Andernfalls wird 15 Minuten später der nächste Messpunkt genommen. Als typische Stabilisierungszeit wird ein Intervall von 30 Minuten bis zu 2 Stunden angegeben. Aus dieser Definition folgern jedoch lange aber einfach zu bestimmende Einbrennzeiten.

Deutlich verfeinert wird dieses Verfahren von der IEC Norm [4]. Diese verlangt innerhalb eines 15 Minutenintervalls einen Messpunkt pro Minute. Danach wird von den letzten fünf Messwerten jeweils die Differenz zwischen Maximums und Minimums mit dem letzten Fünfminutendurchschnitt verglichen. Ist die Differenz kleiner als 1 % des Durchschnitts, gilt die Lampe als thermisch stabil. Ist sie nicht stabil, wird die Prozedur wiederholt, wobei nach 45 Minuten das Verfahren eingestellt wird und die Lampe als stabil zu betrachten ist.

Die Vorteile dieser beiden Verfahren liegen in der Einfachheit der Durchführung. Allerdings sind beide Verfahren auf 15 Minutenraster festgelegt, was eine individuelle Anpassung auf einzelne Systeme erschwert. Um diese Verfahren zu verbessern werden im vorgestellten Ansatz LED Systeme zu Anfang genau vermessen und dann individuell bewertet.

5 Der Messaufbau

Zur Messung der LED Systeme während der Einbrennphase wird die Messungen zweier Parameter kombiniert. In einer U-Kugel wird mit integraler Messung der Lichtstrom und parallel am Lampenkühlkörper per Oberflächenmessung die Lampentemperatur gemessen. Zur Kontrolle wird ein weiterer Temperaturmessfühler im Kugelinnenraum platziert. Eine Kalibrierung der U-Kugel ist nicht notwendig, da zur Charakterisierung des Einbrennverhaltens der LED Systeme nur die relative Veränderung des Lichtstromes betrachtet wird. Die zeitliche Auflösung ist mit maximal 10 Messwerten pro Sekunde fein genug, dass sie keine Einschränkung der Messung darstellt.

6 Charakterisierung des Einbrennverhaltens

In der Messung zum Einbrennverhalten (siehe Abbildung 2) ist deutlich zu erkennen, dass sich der Lichtstrom bei steigender Lampentemperatur deutlich abnimmt. Es wird ein exponentieller Ansatz gewählt, um die Lichtstromdegradation zu beschreiben. Hierfür wird

mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate [6] eine exponentielle Anpassung nach folgender Formel durchgeführt:

$$I(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + I_0$$

Hierbei ist $I(t)$ der gemessene Lichtstrom, A der Wert des maximalen Lichtstroms⁶ direkt nach dem Einschalten, t die Zeit, τ eine Zeitkonstante und I_0 der Lichtstromwert einer thermisch stabilen LED. Da die quadratische Abweichung ($=R^2$) bei allen gemessenen LED Systemen immer größer als 0,99 ist [7], bestätigen alle Messungen die These, dass die exponentielle Anpassung die Lichtstromdegradation hinreichend gut beschreibt.

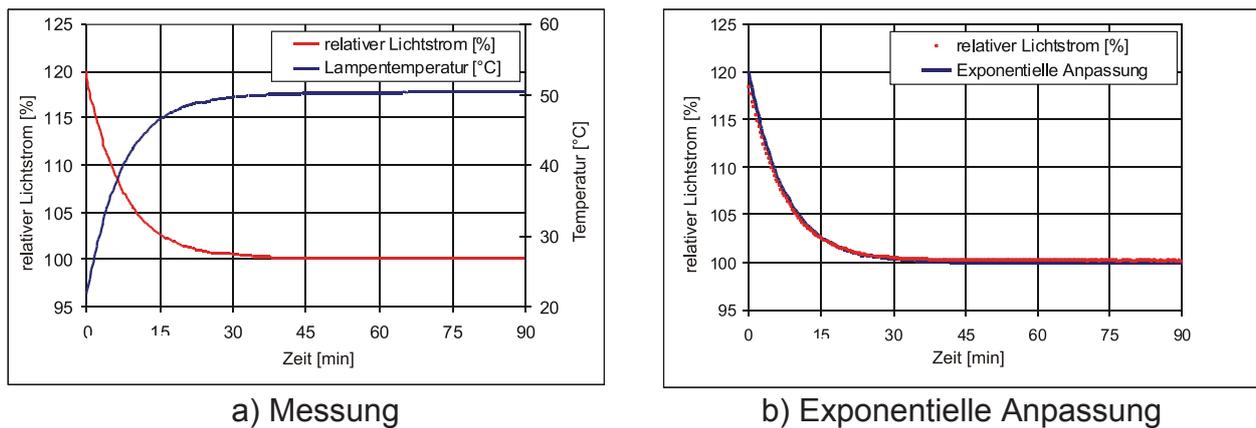


Abbildung 2: Lichtstrom und Lampentemperatur von LED Systemen nach dem Einschalten

Aus der exponentiellen Anpassung kann auch direkt die thermische Stabilisierungszeit abgeleitet werden. Um das bewerkstelligen zu können, muss man sich festlegen, ab welchem Fehler bzw. Schwellwert eine LED als thermisch stabil zu bezeichnen ist. In Anlehnung an die Norm der IEC wird in der folgenden Betrachtung ein Fehler von 1 % als Schwelle angenommen, die Methode kann jedoch auch auf jeden anderen Wert angepasst werden:

Normiert man den Lichtstrom mit 100 % auf den Wert der thermisch stabilen LED (I_0 -Wert), beschreibt der erste Summand die Abweichung von diesem 100 %-Wert, was gleichbedeutend mit dem Fehler ist. Somit kann mit dem Wert des maximalen Lichtstrom A und der Zeitkonstanten τ eine Zeit berechnet werden, zu der der Fehler gleich 1 % ist. Um dieses System zu vereinfachen, wird sich als thermische Stabilisierungszeit diskret auf ganzzahlige Vielfache der Zeitkonstanten τ beschränkt. Welcher Werte als Vielfache von τ als Einbrennzeit zu nehmen ist, wird in Anhängigkeit vom maximalen Lichtstrom A in Tabelle 1 gezeigt.

Tabelle 2: Prozentuale Amplitudenhöhen mit minimaler Stabilisierungszeit bei 1 % Fehler

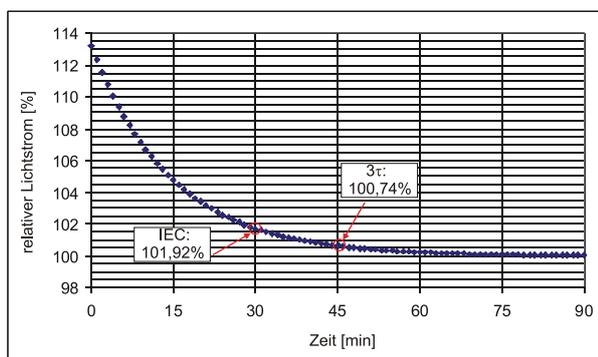
A [%]	0 - 2,7	2,8 - 7,4	7,5 - 20,1	20,2 - 54,6	54,7 - 148,4
t_{Stab}	1τ	2τ	3τ	4τ	5τ

⁶ In den Meisten Fällen der Lichtstrom der LED bei Raumtemperatur

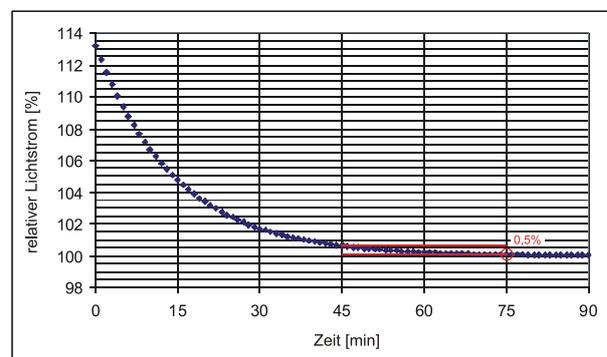
7 Vergleich der drei Methoden zu Bestimmung der Einbrennzeit

Im Folgenden werden die Verfahren der IES und IEC zur Bestimmung der Einbrennzeit mit dem Verfahren der exponentiellen Anpassung verglichen. Dafür wurde ein System verwendet, dass mit einem Anfangslichtstrom von 13,7 % über dem thermisch stabilen Wert eine deutliche Degradation zeigt und repräsentativ ist. Die bestimmten Einbrenn-zeiten nach IES, IEC und exponentieller Anpassung sind in Abbildung 3 zu sehen.

Nach der IES Norm müssen drei Messwerte jeweils nach 15 Minuten verglichen werden. Liest man die aus der Messung ab, stellt sich selbst bei einem 1 % Intervall⁷ zwischen den drei Messwerten eine normgerechte, thermische Stabilisierung erst nach 75 Minuten ein. Der hier bestimmte relative Fehler von theoretischen 0,01 % ist so klein, dass thermische Schwankungen des umgebenden Raumes die übergeordnete Rolle spielen und der Fehler folglich vernachlässigt werden kann.



a) Definition nach IEC exponentieller Anpassung



b) Definition nach IES

Abbildung 3: Stabilisierungszeiten nach IES, IEC und exponentielle Anpassung

Die Berechnung nach IEC ergab eine Stabilisierungszeit von 30 Minuten. Der in dieser Messung bestimmte relative Unterschied zur thermisch stabilen Wert ist allerdings mit 1,9 % sehr groß und liegt über der als akzeptabel gewählten Grenze von 1 %. Somit lässt sich das LED System in dieser Messung nicht als thermisch stabil bezeichnen.

Die exponentielle Anpassung ergibt bei $A = 13,7 \%$ eine Stabilisierungszeit von $t_{\text{stab}} = 3\tau = 45,5$ Minuten. Der Fehler bei nach dieser Einbrenndauer liegt mit 0,74 % wie gewünscht unterhalb von 1 %. Es wurde folglich eine deutlich Reduzierung der Einbrennzeit gegenüber dem Verfahren der IES erreicht, während das in diesem Fall schnelle Verfahren der IEC nicht die Kriterien einer Stabilisierung erfüllt.

Tabelle 3: Vergleich der drei Verfahren zu thermischen Stabilisierung

Verfahren	Stabilisierungszeit t_{stab}	Relativer Fehler
IES	75 Min	< 0,01 %
IEC	30 Min	1,9 %
Exp. Anpassung	45,5 Min	0,74 %

⁷ Nach Norm müsste das Intervall 0,5% betragen, zu besseren Vergleichbarkeit wurde allerdings wie in den Anderen Betrachtungen die 1% Grenze gewählt. Aus der geringeren Grenze würde eine Stabilisierungszeit von 90 Minuten folgen, was qualitativ auf die gleichen Aussagen hinausläuft.

8 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die Methode der „exponentiellen Anpassung“ zur Charakterisierung des Einbrennverhaltens von LED Systemen vorgestellt und mit zwei bereits veröffentlichten Verfahren verglichen. Die Methode hat gegenüber der Methode der IES den Vorteil, dass sie eine lange Einbrenndauer reduzieren kann. Im Vergleich mit der Methode der IEC kann sie die aus der Verkürzung resultierenden Fehler nach einer gegebenen absoluten Grenze beschränken.

9 Literatur

- [1] Stiftung Warentest, „Licht und Schatten,“ Stiftung Warentest, Berlin, 2009.
- [2] IES, „IES LM-79-08 Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products,“ Illuminating Engineering Society of North America, New York, 2007.
- [3] IES, „IES LM-80-08 Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources,“ Illuminating Engineering Society of North America, New York, 2008.
- [4] „IEC/PAS 62717 - LED modules for general lighting - Performance requirements,“ International Electrotechnical Commission, 2011.
- [5] Philips Lumileds, „Lifetime Behavior of LED Systems White Paper WP15,“ Philips Lumileds, 2010.
- [6] B. Burgeth, „Mathematik für Informatiker III,“ Mathematical Image Analysis Group, Saarland University, 2007.
- [7] C. Beyer, „Optische Eingangscharakterisierung von LED-Systemen,“ Bachelorarbeit am KIT, Karlsruhe, 2011.

Round Robin Test: Measurement of High Power LEDs

*Andreas Groh, Tran Quoc Khanh
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik*

Proc. ISAL 2013, Darmstadt, S. 181-186

1 Introduction

High-power LEDs are becoming increasingly important. In vehicle lighting for example headlamps or interior lighting, white LEDs are no longer negligible. The more important it becomes that the measurement of LEDs provide reliable and accurate results. Due to the variation in production of the LEDs, LED binning is indispensable. LED binning groups become smaller and smaller so accurate measurement results become more important.

To get an overview of the currently in the German lighting industry existing measurement technique for the determination of luminous flux and spectral radiant flux, the Laboratory of Lighting Technology at the Technische Universität Darmstadt, performs a round robin test and act as a pilot laboratory. In this round robin test LED manufacturers, lighting manufacturers and manufacturers of measurement equipment take part.

The primary objective of this study is to detect deviations in the measured results to each other or maybe measurement errors and to explain these differences or errors. By discussing the differences with the various partners, opportunities for improvement and with the accumulated knowledge of the real existing measurement uncertainty in the industry, possibilities to reduce the measurements errors should be found.

Because the round robin is still in progress at the deadline for the submission of the papers, this paper shows only the procedure and some preliminary results of the round robin.

2 Measurements

For the measurements 12 selected LEDs act as reference-LEDs. These LEDs can be divided into 4 groups consisting of 3 LEDs of the same type.

- Warm white LEDs with a CCT of about 2600 K and CRI > 90
- Neutral white LEDs with a CCT of about 5000 K and CRI > 80
- Red LEDs with a peak wavelength of about 665 nm
- Blue LEDs with a peak wavelength of about 445 nm

The reference LEDs are applied to special metal core boards, which are equipped with platinum resistance temperature sensors (PT100). So each test LED has its own metal core board with its own temperature sensor. Therefore effects caused by different mounting conditions can be excluded. Furthermore the metal core boards make a four wire voltage sensing possible. Thus the measured voltage is not influenced by different wiring of the different laboratories.

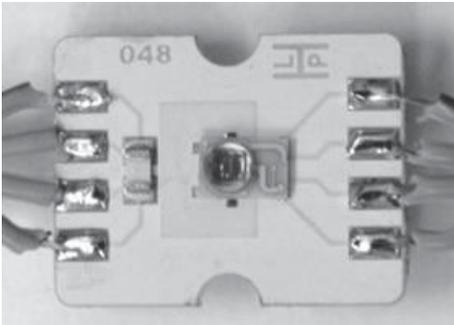


Figure 1: High power LED with temperature sensor on metal core board

To eliminate the influence of different operating conditions during the measurements, the LEDs are installed to a temperature controlled test socket. (Confer Figure 2) This socket is capable to regulate the temperature of the LEDs on a reference temperature with a deviation of maximum $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$. As reference temperature 40°C has been chosen.

Furthermore all LEDs are aged for 1000 h to guarantee a continuous aging of the LEDs. Under normal circumstances the LEDs should not show any measurable aging effect during the round robin test due to the minor operating hours. Normally a measurement of one LED lasts 5 minutes, if measured in an integrating sphere. Thus the LEDs are only a few hours in operation.



Figure 2: Temperature controlled test socket equipped with LED

All participants will measure the luminous flux of each LED independent of the type of the measurement equipment. If the existing measurement equipment allows measuring the total spectral radiant flux, the total spectral radiant flux should be measured and the luminous flux has to be calculated. Additionally different, for high-power LEDs characteristic radiometric and colorimetric quantities have to be calculated and analyzed from the measured total spectral radiant flux.

For each LED the forward voltage has to be monitored during the measurements. This measurand is used to validate the spectral properties of the LEDs during the measurements.

The spectral properties of LEDs are temperature dependent and change as a function of the junction temperature of the LEDs. Even the forward voltage depends on the junction temperature. Therefore the forward voltage of the LEDs can be used to monitor the working condition of the LEDs during the measurements of the round robin.

The measurements are performed in radial exchange. That means that all LEDs are measured by the pilot laboratory before they will be send to a participant and when the LEDs are back in the pilot laboratory. This is to assure that defects or other problems with the LEDs can be excluded.

3 Results

Because the round robin is still in progress at the deadline for the submission of the papers, this paper shows only some preliminary results of the round robin.

In Figure 3 the forward voltages of the three neutral white LEDs are shown. Additionally the measurement uncertainties of the voltage measurement of each participant, if it is stated by the participant, are shown as error bars.

The deviation of the forward voltage measurement results are exemplary for all LEDs used in the round robin test. If we expect an temperature coefficient of the forward voltage of approximately -1.5 mV/K for the white and blue LEDs and -3.4 mV/K for the red LEDs, and if we take the measurement uncertainty of the voltage measurement into account, we can conclude, that the junction temperature of all LEDs have been in the expected range of $\pm 0.2^\circ\text{C}$ during the measurements in the different laboratories.

The temperature coefficient of the luminous flux of the neutral white LEDs used in this round robin test is $< 0.15 \text{ lm/K}$. For a junction temperature change of $\pm 0.2^\circ\text{C}$ the change of the luminous flux caused by the temperature is about $\pm 0.03 \text{ lm}$. Therefor we can conclude that the radiation emitted by the LEDs was sufficiently similar for the round robin test and the deviations in the luminous flux are mainly influenced by the measurement equipment of the participants and not by the LEDs.

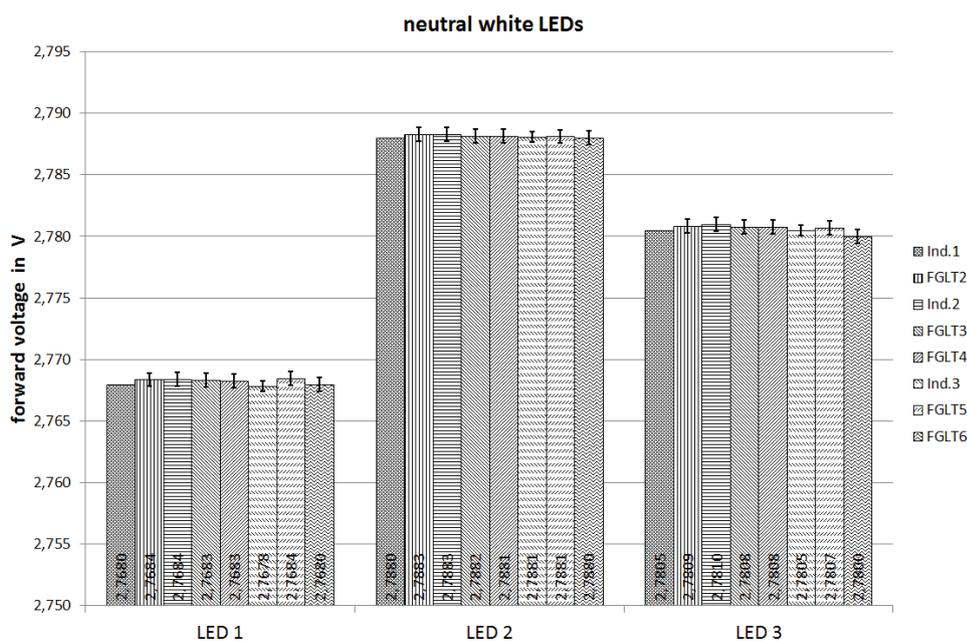


Figure 3: Measured forward voltage of the 3 neutral white LEDs

In Figure 4 the results of the luminous flux measurement are plotted. Exemplarily the results for the neutral white LEDs are given. The deviations of the results are in a range of about 4% or less and therefore within the range of the stated measurement uncertainties. All measurements excluding the measurement FGLT5 are done with an integrating sphere. The measurement FGLT5 is done with a goniophotometer.

One obvious result is that the repeatability of the luminous flux measurement in the pilot laboratory is in a range of 1% over 1.5 years without recalibration of the measurement system.

Another interesting subject is that only two of actual three laboratories stated a measurement uncertainty. We as the laboratory for lighting technology of the Technische Universität Darmstadt are still working on the topic measurement uncertainty which considers the rules given by the guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). So in this paper we do not specify the measurement uncertainty of the luminous flux measurement.

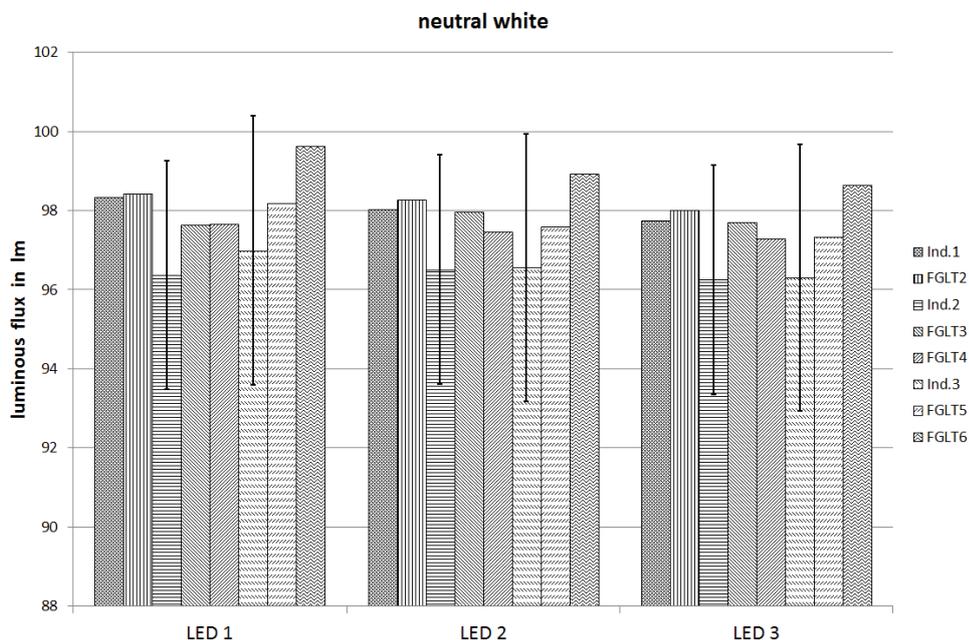


Figure 4: Measured luminous flux of the 3 neutral white LEDs

In Figure 5 the measured color coordinates of the neutral white LEDs are plotted in the CIE 1931 chromaticity diagram. It is obvious that there is a difference between the measurements of the Laboratory for Lighting Technology and the other participants of the round robin test. The ΔE_{xy} is about 0.005 xy units. The Laboratory for Lighting Technology of the Technische Universität Darmstadt is still working on this topic but has not finished until the submission deadline for this paper. A possible explanation for this difference could be an insufficient self-absorption correction of the measurement setup.

The ΔE_{xy} for the industrial partners themselves is in a range of 0.002 xy units and the deviation of the measurements of the Laboratory for Lighting Technology is in the same range.

If we calculate the $\Delta E_{uv'}$ color differences, the results of the industrial partners and of the Laboratory for Lighting Technology are in range of 0.0015 $u'v'$ units. Some preliminary results of a study that is made by M. Böll at the Laboratory for Lighting Technology and which is still in progress, show a just noticeable color difference of 0.002 $u'v'$ units as a mean value. So the differences in measured results are in a range that might be perceived under certain conditions.

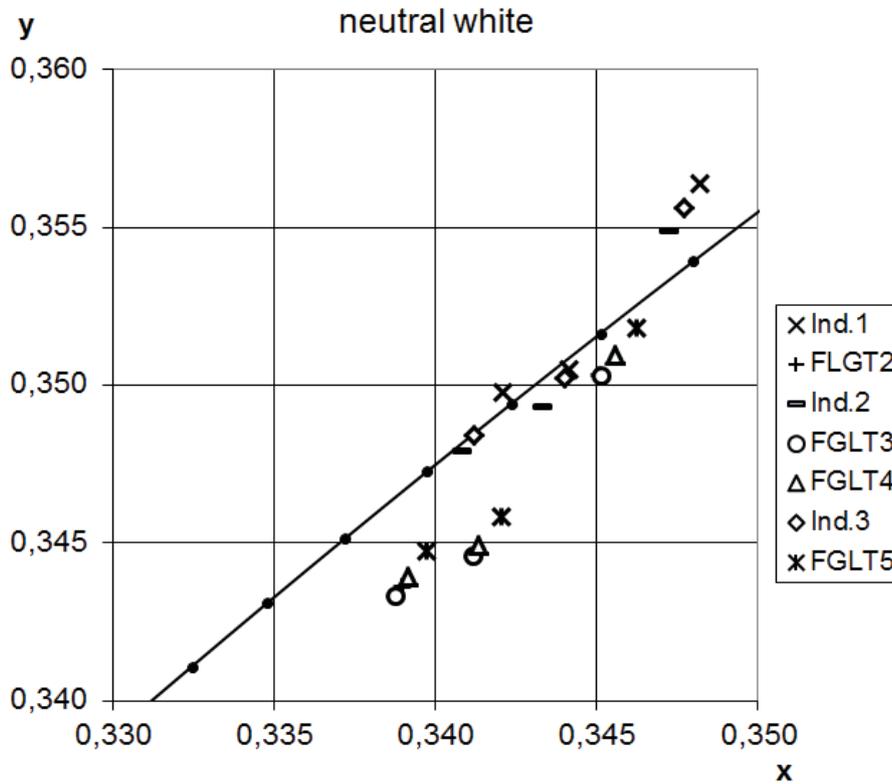


Figure 5: Measured color coordinates in the CIE 1931 chromaticity diagram

LED-Systems

Colour Shifts and Colour Presentation

*Franziska Herrmann, Klaus Trampert, Cornelius Neumann
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut*

Proc. LUX Europa 2013, S. 592-597

Abstract

Currently traditional lamps are replaced by modern LED-Systems. With the application of the new technology it gets more important to measure and present light characteristics in a useful way. Especially the colour characteristics like colour shifts within a LED-System are essential information for the application of LED-Systems. Two current methods of presenting colour shifts do not give sufficient information to decide whether a LED-System is colour homogeneous or not. In this paper a new method to present colour shifts and to recognize colour homogeneity easy is presented.

Keywords: LED-System, colour shifts, presentation of results

1 Motivation



Figure 1: Colour differences of LED-System

As mentioned in general lighting the traditional lamps are being replaced with LED-lamps. Thereby the appearances of colour shifts are an everyday problem. The problem of colour equality appears already during and after the binning process, in which it is difficult to interpret binning limitations based on colour coordinates. Speaking of LED-Systems, e. g. Retrofits we discover a similar problem. Limitations for identification of disturbing colour differences and colour shifts within LED-Systems are difficult to set, because no reasonable presentation and evaluation criterion is present. One reason therefore is the common measurement technique to get colour information: an Ulbricht Sphere with Spectroradiometer. Here the results are integrated colour coordinates as references for the whole LED-system. As consequence from the method a detailed and entire prescription of spatial colour characteristic is not possible. To decide whether a LED-System is applicable or not in special situations especially the spatial colour characteristic is necessary to know, just like it is necessary to have an easy tool to present and evaluate spatial colour information within an LED-System. Current available methods of presentation give only estimations of colour changes but do not give the possibility to recognize or evaluate colour shifts for the whole LED-system and to decide, if these are effecting e.g. the perception of the new replaced light source.

2 How to Measure Colour & Present the Results?

One recommended method to measure the colour coordinates is given from the standard IES-LM79-08 [1]. There a gonio-spectroradiometer is used to measure spectral data over specified angular points around the test object. Based on these results two methods of display colour characteristics are present in industry. One method, for a single LED is to plot the colour coordinates distance $\Delta u'$ and $\Delta v'$ dependant from the viewing angle, shown in Figure 2 [2]. The information for application is an individual variation of u' and v' in one plane. But from the variation of the single coordinates it is not possible to decide whether colour shifts are big or small enough relating to replacing or perception.

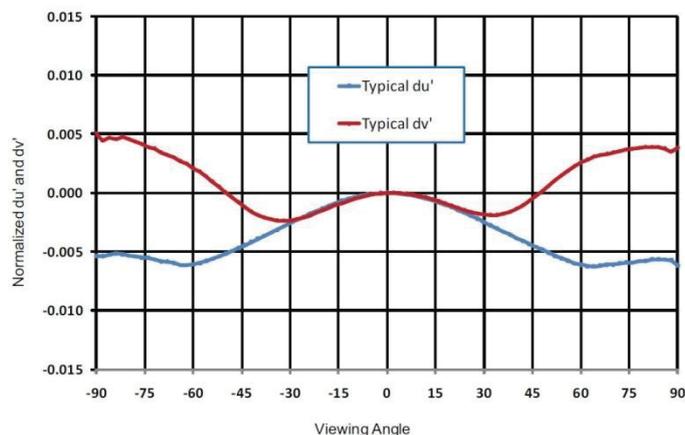


Figure 2: Presentation $\Delta u'$ and $\Delta v'$ dependant from viewing angle Example from Philips (Luxeon Rebel white)

The second method to display these measurement results is to plot the correlated colour temperature in a half sphere diagram shown in Figure 3 [4]. In this case the information is only about the CCT, defined on the Judd Lines which doesn't match the real colour image of the test object.

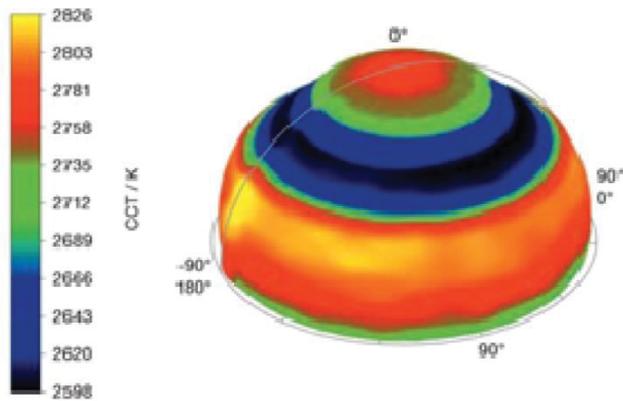


Figure 3: Presentation of CCT dependant from viewing angle Example from Instrument Systems

3 New Method

The here presented new method is also based on gonio-spectroradiometric measurement and the measured results are again couples of chromaticity coordinates (x, y) for every measured angular point (θ, φ) . As new step a reference chromaticity coordinate couple (x_R, y_R) is chosen and the colour distance Δxy in between the reference and the other chromaticity coordinates (x, y) can be calculated with the following equation:

$$\Delta xy = \sqrt{(x - x_R)^2 + (y - y_R)^2}$$

Than this colour distance Δxy dependant to the measurement angular points can be plotted in a polar diagram.

As reference coordinates two possibilities are considered here. One is the chromaticity coordinate in the main direction of radiation H_0 , so the coordinates x_R ($\theta=180^\circ$) and y_R ($\theta=180^\circ$). The second possibility is an averaged chromaticity value over the opening angle defined by the light intensity distribution. Then the reference chromaticity coordinates are $x_R(\zeta_0)$ and $y_R(\zeta_0)$ while ζ_0 is the measured opening angle. In the next chapter this new method is applied to an example and the results will be shown and discussed.

4 Example & Discussion

To apply the new method a white LED-Spot (CCT = 6000K) was measured with a gonio-spectroradiometer and the data were evaluated.

The angular measurement range θ was between 150° and 210° because the opening angle of the spot was specified to less than $\pm 30^\circ$. From the measured spectral data the colour coordinates and the colour distances in both colour systems and to both references have been calculated and the results plotted. Each colour distance graph will be shown and explained now.

In Figure 4 the colour distance Δxy for the main C-planes is plotted with the reference coordinates of main radiation direction H_0 , x_R ($\theta=180^\circ$) and y_R ($\theta=180^\circ$).

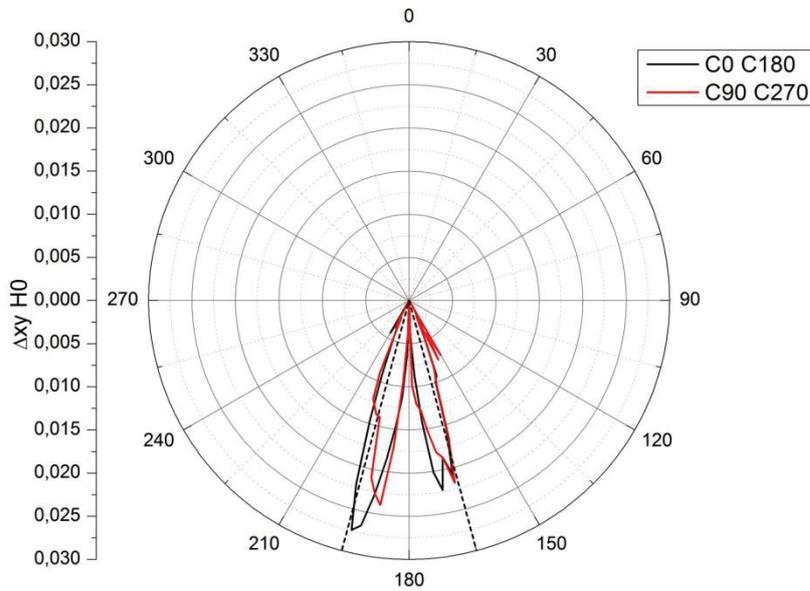


Figure 4: Colour distance distribution for a white LED-Spot Δxy with x_R ($\theta=180^\circ$) and y_R ($\theta=180^\circ$) as reference coordinates

Obviously the colour distance is changing to the edges of the light intensity as the opening angle of the spot was measured to $\pm 14^\circ$, which is marked with two dotted lines in Figure 4. In general it is possible to see colour deviations inside the measurement object.

In Figure 5 the colour distance Δxy for main C-planes was calculated based on the reference coordinates x_R (ζ_0) and y_R (ζ_0), averaged over the opening angle $\pm 14^\circ$.

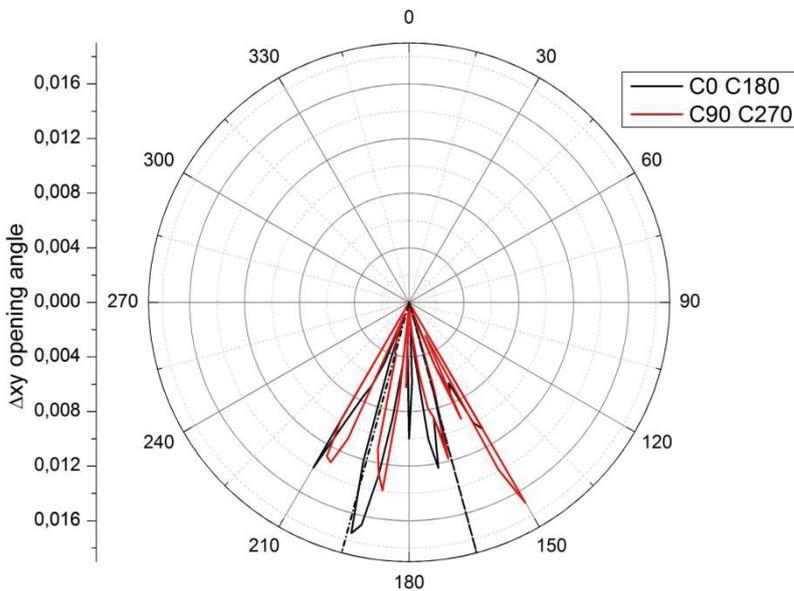


Figure 5: Colour distance distribution for a white LED-Spot Δxy with $x_R(\zeta_0)$ and $y_R(\zeta_0)$ as reference coordinates

Again the graph shows that colour deviations are present, similar visible like in Figure 4 is the changing of colour distance to the edges of the intensity, marked with dotted lines. But the values of colour distance and the shape of the distribution itself is quite different, by comparing Figure 5 to Figure 4 the changing of shape and scale is obvious. The different weighted scale though results from the averaged reference colour coordinates. Therefore in Figure 5 it is not possible to see the maximum of change in Δxy because the averaged colour coordinates as reference point are located somewhere in the distribution and not in the main direction of radiation.

Although we get different results it is possible to display differences in colour coordinates within the measured object with both possibilities of references. While the information in Figure 4 is more about the absolute differences of the coordinates, Figure 5 gives more information how homogeneous the coordinates are distributed, especially inside the opening angle.

For further interpretation of the colour distance curves, like the perception of the colour it becomes necessary to convert the coordinates x and y into the CIE1976 UCS-Diagram ($u'v'$ -Diagram). After the conversion again the colour distance $\Delta u'v'$ can be calculated with the before mentioned references, the main direction of radiation u'_R ($\theta=180^\circ$) and v'_R ($\theta=180^\circ$) and the averaged chromaticity value over the opening angle u'_R (ζ_0) and v'_R (ζ_0).

The colour distance curves $\Delta u'v'$ for the mentioned example have been calculated and the results are shown in Figure 6 and Figure 7.

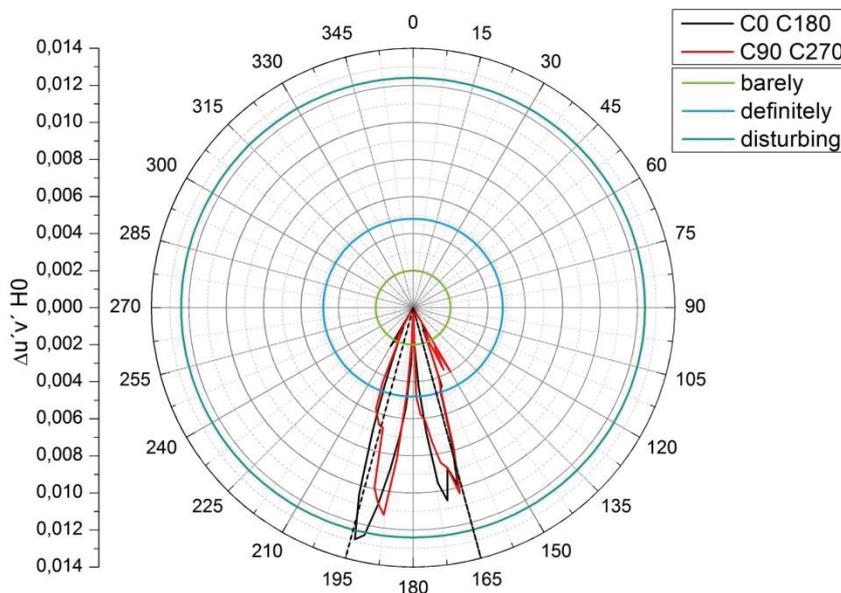


Figure 6: Colour distance distribution for a white LED-Spot $\Delta u'v'$ with x_R ($\theta=180^\circ$) and y_R ($\theta=180^\circ$) as reference coordinates 3 limiting values for perceptibility of colour differences [3]

As expected the shape of both curves didn't change because of the conversion in the CIE1976 UCS-Diagram. But as the scale is adjusted according to McAdam and as the scale of the UCS-diagram is one of the commonly used to describe colour distances, from these curves it is now possible to evaluate the colour distances related to the perception and in the same moment to evaluate the colour homogeneity within the measured object.

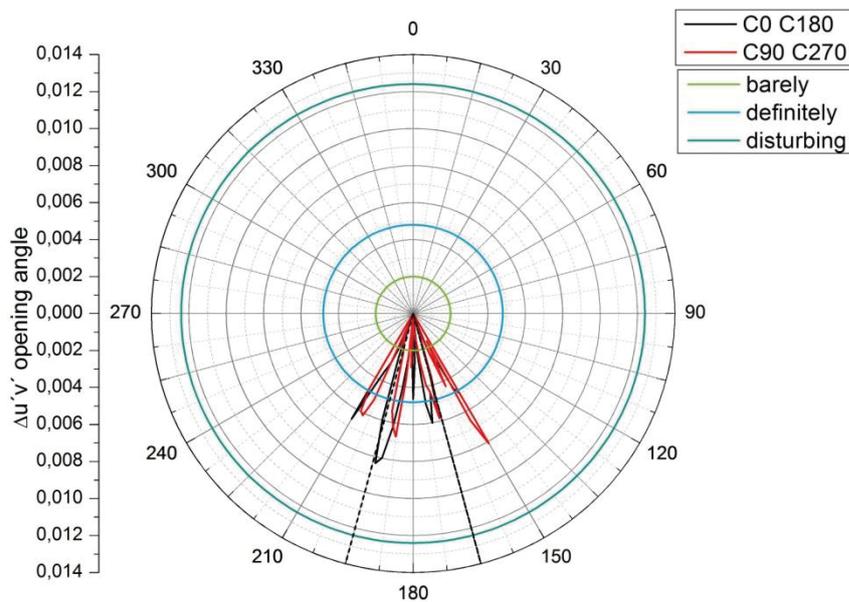


Figure 7: Colour distance distribution for a white LED-Spot $\Delta u'v'$ with $x_R(\zeta_0)$ and $y_R(\zeta_0)$ as reference coordinates 3 limiting values for perceptibility of colour differences [3]

The criterion to decide whether a certain colour distance is visible or not visible is taken from Karin Bieske [3]. In this paper K.Bieske measured limiting values of colour distance $\Delta u'v'$ for a correlated colour temperature of 6000K. The colour differences are “barely seen” with $\Delta u'v' \approx 0,0020$, “definitely seen” with $\Delta u'v' \approx 0,0048$ and “disturbing” with $\Delta u'v' \approx 0,0124$. In a first step these values are taken for evaluating the LED-Spot, the detailed consideration of changing luminance levels follows as perspective. The limiting values are represented by circles in Figure 6 and Figure 7. Adding these limiting values to the evaluation of the colour distance curve shows, that the spot has areas where the colour difference is definitely visible or even disturbing. While a disturbing effect is visible in Figure 6, the information gets lost in Figure 7 due to the average values. In fact all deviation gets smaller.

5 Perspective

Looking at these results the reference coordinates should be thought through by considering the type of measured object. Maybe the reference coordinate has to be different when talking about different light intensity distributions e.g. lambertian distributions. Therefore lambertian LED-systems have to be measured to expand the application area of this tool. Furthermore besides the presentation of colour shifts the influence of the light intensity distribution has to be considered.

Independent from further discussions presenting the colour distance distribution in a polar diagram a useful tool is given especially for colour problematic LED-Systems It is possible to identify inhomogeneity of colour easy and also to evaluate it relating to the perception of the colour distances. If these graphs are shown together with the light intensity distribution detailed information over the characteristic of LED-Systems could be available.

6 References

- [1] IES, IES LM-79-08 Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products, New York: Illuminating Engineering Society, 2008.
- [2] Philips Lumileds, „www.philipslumileds.com/products/luxeon-rebel/luxeon-rebel-white,“ Mai 2013. [Online].
- [3] K. Bieske, „Wahrnehmung von Farbunterschieden von Licht- und Körperfarben,“ in Licht und Lebensqualität 2007, Lüneburg, 2007.
- [4] D. D. Konjhodzic, „Messungen von SSL-Lichtquellen in Ulbricht-Kugeln und mit Goniospektralradiometern,“ in LICHT 2012, Berlin, 2012.

Gonio-Spectrometric Measurements of LED Luminaires

*Silvia Marx, Karsten Köth, Stephan Völker
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik*

Proceedings of the CIE Conference Sun City 2011, S. 984-985

Abstract

For recognition and removal of barriers to innovation in solid state lighting (SSL) a thorough description of this new technology is necessary. Therefore a research cooperation of all four German Universities' chairs of lighting technology is working on setting the course for an LED-based mass market. SSL-specific development assistance shall be provided to small and medium-sized enterprises in Germany to increase the user acceptance for LED-lighting.

A successful implementation of solid state light sources for general illumination is dependent on a precise characterization and severe conformity of psycho-physiological and technical quality criteria. These criteria exist for conventional light sources but cannot implicitly be transferred to LEDs. Hence, a definition of measurement instructions and technical key figures for LEDs and LED-luminaires is intended. Current research includes gonio-spectroradiometric measurements of LED-luminaires.

Keywords: SSL, luminous intensity distribution, gonio-spectroradiometer

1 Introduction

The principle of generation of solid state radiation differs significantly from the one of conventional light sources. On this account, a series of particularities regarding light measurement occurs. For instance, a strict separation of LED lamp and luminaire is usually not possible. With a description of measuring procedures for LED-luminaires all device components – i. e. LED, bonding, electronics, mechanics, optical components and thermal management – need to be considered. So far no consistent measuring method could be implemented, hence manufacturer's data are incomparable.

2 Measurement Setup

Traditionally luminous intensity distributions are measured with goniophotometers. Either far-field or near-field measurement is possible. If a point light source can be assumed the luminous intensity is proportional to the measured illuminance at far-field. At near-field the local luminance distribution is measured within the marginal photometric distance with a luminance measuring camera [1]. Relevant optical parameters can be measured photometrical or spectroradiometrical. At far-field common photometrical measuring methods are based on silicon photodiodes which are spectrally matched to the $V(\lambda)$ -curve by full or partial optical filtering. Dependent on the accuracy a mismatch to a greater or lesser extent can occur. The spectral mismatch can amount to over 15% if narrow-band light sources like blue LEDs are measured [2]. If the relative spectral distribution of an LED lies within a wavelength range where a poor spectral match to the $V(\lambda)$ -curve exists high mismatch rates are possible. In particular the wavelength range beneath 450 nm and above 700 nm is critical [3]. With spectrometry the spectral match results from a multiplication of the spectral distribution with the $V(\lambda)$ -curve, therefore a spectral mismatch due to inaccurate filtering can be avoided.

The luminous intensity distribution of large luminaires that need to remain in a constant position is typically measured with a mirror-goniophotometer. The light source rotates around a vertical axis (azimuth angle ϕ) and usually also around a horizontal axis (elevation angle ϑ). The detector remains at a certain position but can be moved in a longitudinal direction if necessary. So far $V(\lambda)$ -photometer heads are used as detectors. Within this research centric moving mirror-goniometers with spectroradiometric detectors will be investigated. The influence of scattered light, linearity and dynamics, wavelength accuracy, responsivity and measuring rates will be analysed.

3 Summary

In this study aptitude tests for several spectrometric measurement methods for far-field measurements will be conducted. An extension of existing methods to spectral components is targeted to increase the measurement accuracy. Due to its wide distribution rotating mirror-goniometers in combination with spectroscopy will be evaluated for its potential to measure solid state lamps and luminaires more precisely as yet. All measurements will be conducted at the light measurement laboratory of the Technische Universität Berlin. LED-luminaires of renowned manufactures will be measured on a specially built measurement setup with a photometer head and an array spectroradiometer head. The results shall provide for breaking down barriers to the technological change in the lighting sector.

4 References

- [1] DIN 2004. DIN EN 13032-1. Light and lighting - Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires, Part 1. Berlin: DIN.
- [2] BLATTNER, P. 2010. Basic Concepts in Photometry. Bern: METAS.
- [3] SCHUSTER, M., NEVAS, S., SPERLING, A., WINTER, S. 2010. Korrekturmöglichkeiten der spektralen Fehlanpassung von Photometerköpfen. Licht, 62, 10, 688-693.

Spektroradiometrisches Verfahren zur Messung der Lichtstärkeverteilung von LED-Leuchten

Silvia Bensel, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

Tagung LICHT 2012, Berlin, Tagungsband S. 222-225

1 Problemstellung

Mit einer voranschreitenden Entwicklung von Hochleistungs-Leuchtdioden wächst der Bedarf an einer exakten wissenschaftlichen Beschreibung technischer Gütemerkmale von LEDs. Dies sind insbesondere photometrische, elektrische sowie thermische Größen zur Charakterisierung der LEDs.

Etablierte Verfahren zur Photometrie von Lampen und Leuchten basieren in der Regel auf Silizium-Photodioden, die mittels Voll- oder Partialfilter spektral an die $V(\lambda)$ -Kurve angepasst werden. Je nach Anpassungsgüte entstehen dabei mehr oder weniger große Fehlbewertungen. Bei besonders schmalbandigen Lichtquellen, z. B. blauen LEDs, kann der gemessene Wert weit über 15 % vom tatsächlichen Wert abweichen [1]. Bei Spektrometern erfolgt die spektrale Anpassung mathematisch durch eine Multiplikation der Spektralverteilung mit der $V(\lambda)$ -Funktion, Messwertabweichungen durch spektrale Fehlanpassungen werden so vermieden.

Traditionell werden Lampen und Leuchten getrennt voneinander photometriert. Für die Messung von Lampen werden beispielsweise Ulbrichtkugeln verwendet. Von besonderem Interesse sind der Lichtstrom, die ähnlichste Farbtemperatur sowie die Farbwiedergabe. Für die Messung von Lichtstärkeverteilungen und zur Bestimmung von Leuchtenbetriebswirkungsgraden werden bisher goniophotometrische Verfahren verwendet. Bei LED-Leuchten mit fest eingebautem Leuchtmittel ist eine getrennte Messung von Lampe und Leuchte nicht möglich.

Daher wird im Zuge der Untersuchung ein zentrisches Drehspiegelsystem mit spektroradiometrischem Empfänger getestet, welches eine simultane Messung photometrischer und colorimetrischer Daten sämtlicher LED-Systeme erlaubt. Besonders schmalbandige LED-Lichtquellen können zudem spektral gemessen werden.

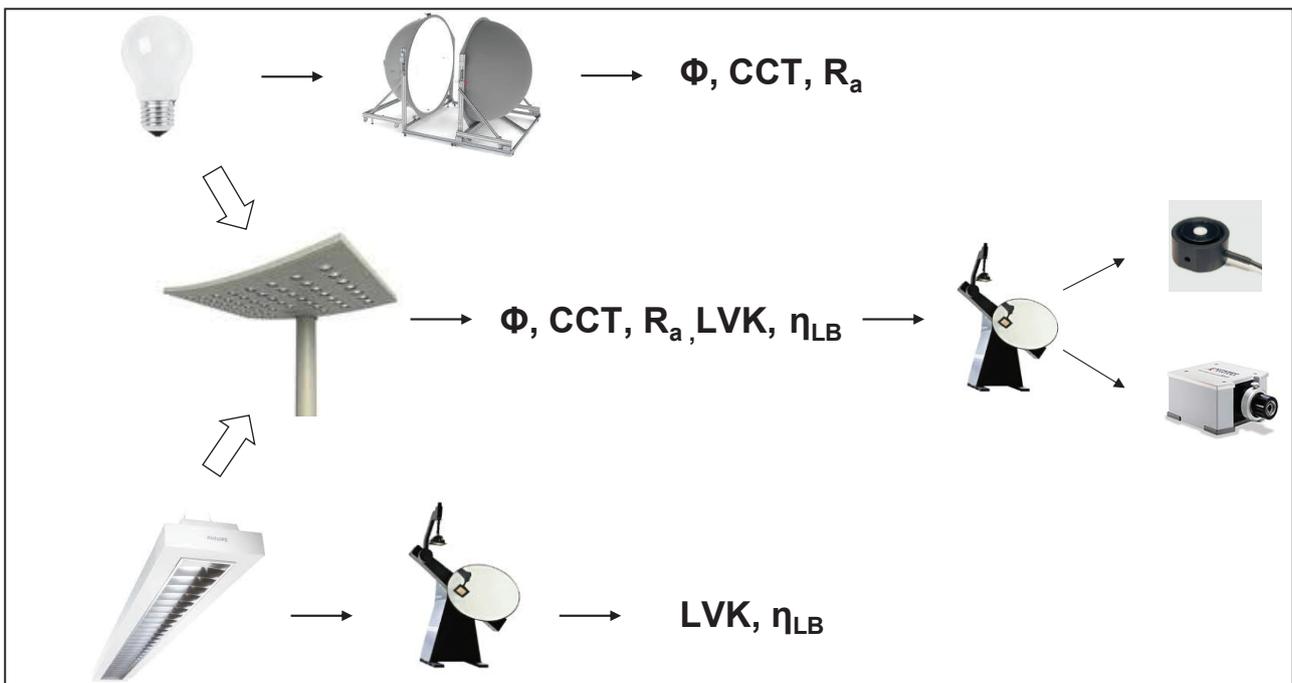


Abbildung 6: Photometrie von LED-Leuchten

2 Stand der Technik und Normung

2.1 Stand der Technik

Die Lichtstärkeverteilung von Leuchten wird aus der winkelabhängigen Messung der Lichtstärke bestimmt. Zum einen kann außerhalb der photometrischen Grenzentfernung die Beleuchtungsstärke ermittelt werden, da diese bei einer sogenannten Fernfeldmessung, das heißt unter Annahme einer punktförmigen Lichtquelle, proportional zur Lichtstärke ist. Zum anderen kann die Lichtstärke durch eine Nahfeldmessung der örtlichen Leuchtdichteverteilung der leuchtenden Fläche einer Leuchte innerhalb der photometrischen Grenzentfernung bestimmt werden [2]. Bei der Nahfeldmessung wird mit einer Leuchtdichtemesskamera mit $V(\lambda)$ -Filter gemessen. Im Fernfeld können die relevanten optischen Größen photometrisch oder spektrometrisch erfasst werden.

Für Leuchten, die eine stabile Brennweite erfordern, eignet sich zur Messung der Lichtstärkeverteilung z. B. ein Drehspiegel-Goniophotometer. Dabei rotiert die Lichtquelle um eine vertikale Achse (Azimutwinkel φ), während die ebene Spiegelanordnung um eine horizontale Achse (Elevationswinkel ϑ) gedreht wird. Der Empfänger steht während der Messung fest, kann jedoch je nach erforderlicher photometrischer Grenzentfernung in Längsrichtung verschoben werden, so dass der Abstand zwischen Lichtquelle und Detektor variiert werden kann. Beim Betrieb von LEDs ist zwar keine bestimmte Brennweite erforderlich, die für die Wärmeabfuhr verwendeten Kühlkörper sind jedoch lageabhängig. Bisher werden Drehspiegel-Goniophotometer mit integraler Messtechnik angeboten.

2.2 Stand der Normung

Es werden bereits einige Normen und Standards zur Messung von LEDs und LED-Leuchten erarbeitet, so zum Beispiel die prEN13032-4:2012, Licht und Beleuchtung - Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten, Teil 4: LED Lampen, Module und Leuchten [3] sowie die überarbeitete DIN Norm-Vorlage „Messung der lichttechnischen Größen von inkohärent strahlenden Halbleiterlichtquellen“ [4]. Diese Normen befinden sich

jedoch noch im Entwurf. Bestehende Normen zur Photometrie eignen sich zum Teil nicht für die Messung von LED-Leuchten.

3 Forschungshypothesen

Weißer LEDs können mit vorhandener integraler Messtechnik gemessen werden. Die Messunsicherheit ist im Einzelfall neu zu bewerten.

Für farbige LEDs bzw. Sonderlösungen sind ggf. neue (spektrometrische) Messverfahren erforderlich.

Zusätzlich zu den photometrischen bzw. radiometrischen Größen sind stets thermische Messungen durchzuführen, da Effizienz und Lebensdauer der Gesamtsysteme maßgeblich vom Thermomanagement abhängen.

4 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau (siehe Abb. 2) besteht aus einem zentrischen Drehspiegelsystem in Kombination mit einem in longitudinaler Richtung verschiebbaren Array-Spektro-radiometer.

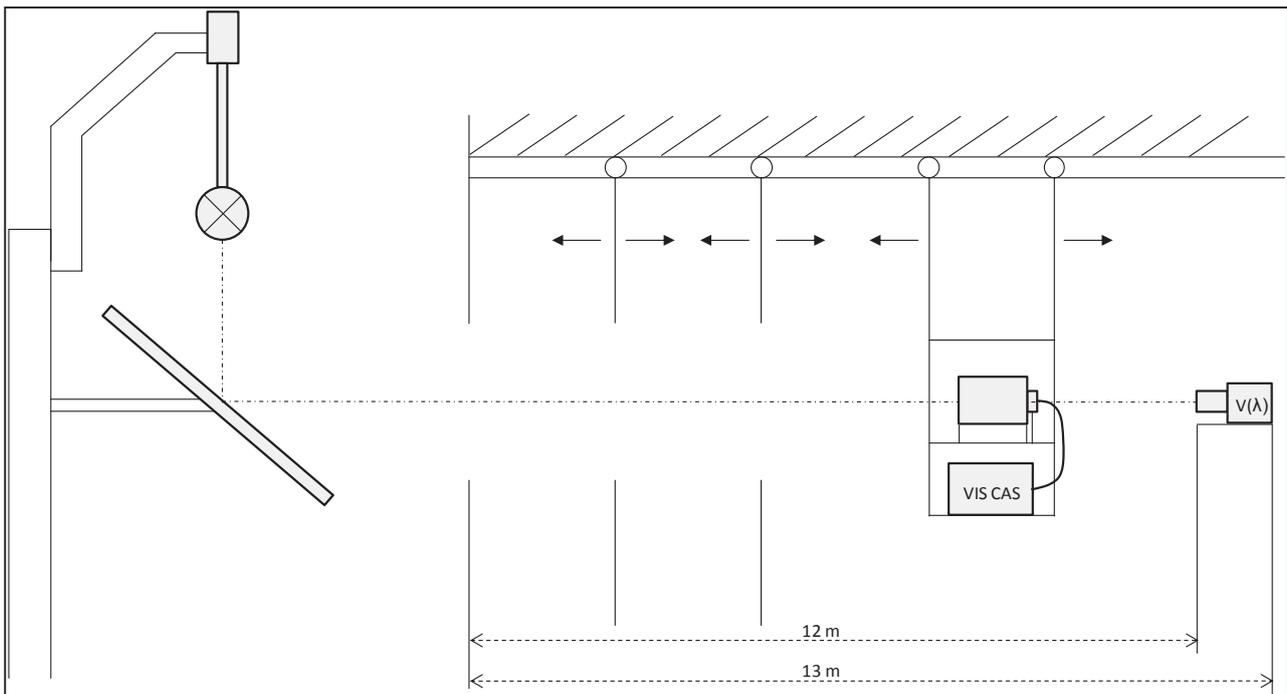


Abbildung 7: Messaufbau

Vor der Eingangsoptik des Spektrometers befindet sich eine tubusartige, schwarz ausgekleidete Box, die zur Reduktion des Streulichts dient. Je nach Messabstand sind verschiedene Blenden unterschiedlicher Durchmesser einsetzbar (Abb. 3). Die Eingangsoptik des Spektrometers befindet sich auf gleicher Höhe wie der integrale Empfänger.

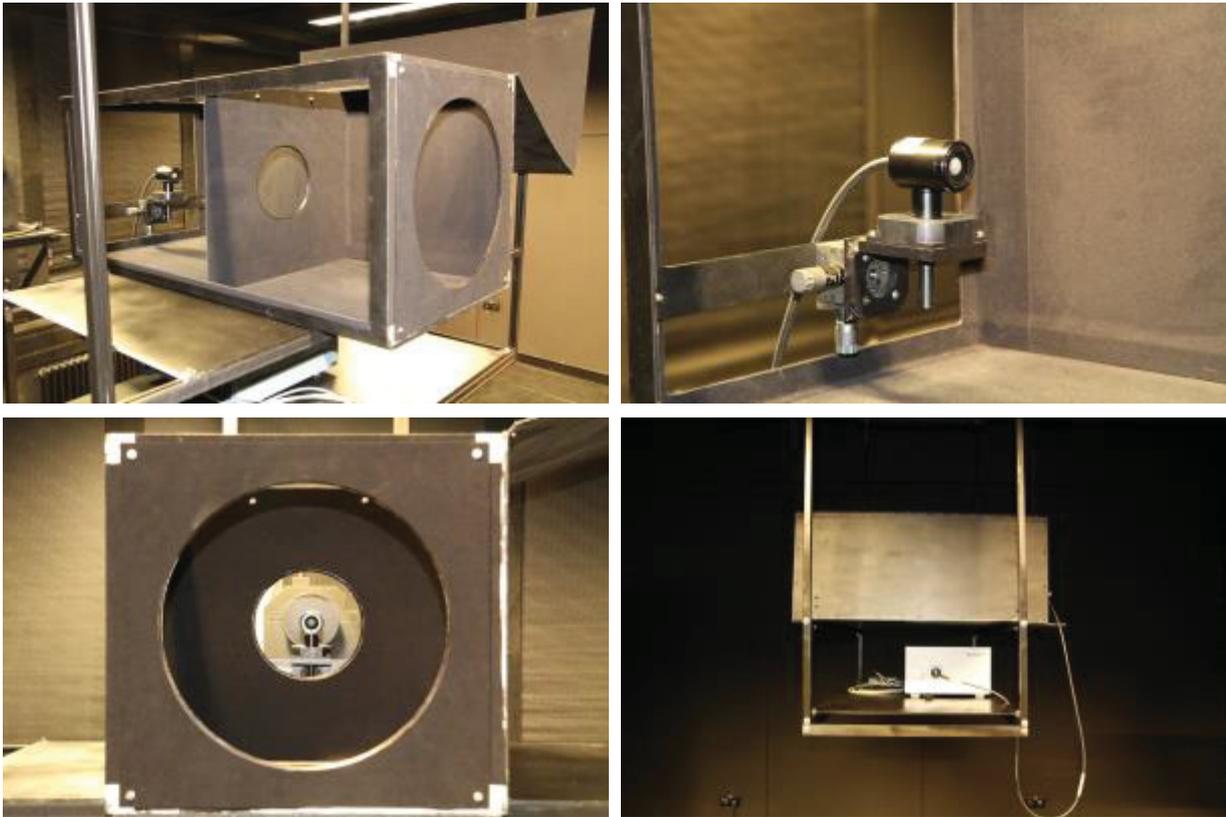


Abbildung 8: Eingangsoptik des Spektrometers und Tubusbox mit Streulichtblenden

Die zur Auskleidung der Tubusbox verwendete schwarze Veloursfolie wurde hinsichtlich ihrer Reflexionseigenschaften untersucht. Die spektrale Reflexion im sichtbaren Wellenlängenbereich (Spektralbereich des Spektrometers) ist in Abbildung 4 dargestellt.

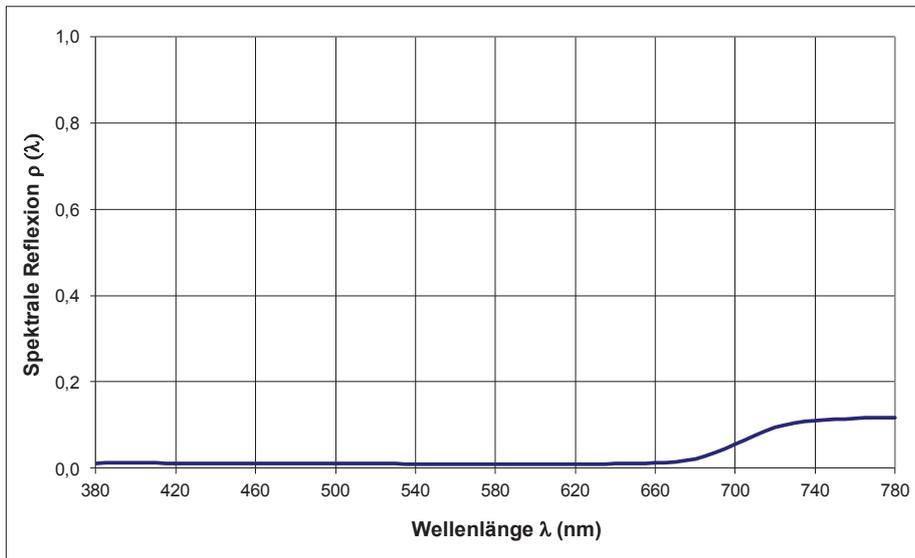


Abbildung 9: Spektrale Reflexion der verwendeten schwarzen Veloursfolie

Untersuchungen zum Vergleich der eingesetzten integralen und spektralen Messtechnik, zur Spektralverteilung in Abhängigkeit der Winkel ϑ und φ , zum Einfluss der Luftbewegung und der Bewegung der Messobjekte auf den Lichtstrom sowie zur notwendigen Winkelab-tastung bei engstrahlenden Leuchten sind vorgesehen.

Thermische Größen werden mit Hilfe von Thermodrähten, NTC-Temperaturfühlern und berührungsloser Infrarotthermografie ermittelt.

5 Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Der beschriebene Versuchsaufbau wird derzeit getestet. Erste Ergebnisse der geplanten Messungen werden auf der Tagung präsentiert.

6 Literatur

- [1] Blattner, P., Basic Concepts in Photometry, METAS 2010
- [2] DIN EN 13032-1:2004, Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten.
- [3] prEN 13032-4:2012, Licht und Beleuchtung - Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten, Teil 4: LED Lampen, Module und Leuchten (CEN/TC 169/WG 7)
- [4] Überarbeitete Norm-Vorlage „Messung der lichttechnischen Größen von inkohärent strahlenden Halbleiterlichtquellen“, 2011 (DIN NA 058-00-03 AA, N 0349)

Spatial Colour Distribution of White LED Luminaires

Silvia Bensele, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

Proceedings of the CIE Centenary Conference Paris 2013, S. 585-590

Abstract

The number of Solid State Lighting (SSL) products in general lighting applications is rapidly growing. Nowadays, many different types of SSL lamps, modules and luminaires can be found on the market whereas standards and recommendations are still in the making. For definition and comparison of quality criteria a thorough characterization of white Light-Emitting Diodes (LEDs) is necessary. Among photometric, electrical and thermal data a colorimetric measurement of such quantities as the correlated colour temperature (CCT) and the colour rendering index (CRI) should be conducted.

Recent studies (Blattner, 2010); (López, 2010) have shown that with LEDs the spatial colour distribution or rather the angular CCT deviation appears to be a relevant quality criterion. On the one hand, the spatial colour distribution is important for the optimization of an optical design (López, 2010) on the other hand, it is relevant for the actual application. This study examines sixteen different types of warm white LED Retrofit luminaires from different manufacturers. CCT deviations from 30 K to 300 K have been observed.

Keywords: Solid State Lighting, Correlated Colour Temperature, Angular CCT Deviation

1 Introduction

So far, standards have recommended providing spatially averaged values for colour quantities (IES, 2008); (IEC 2011). For high power white LED chips, studies (Blattner, 2010); (López, 2010) have shown that contrary to incandescent lamps the correlated colour temperature can vary significantly with the viewing angle θ and the azimuth angle φ . For example, the angular CCT deviation of a white LED with 6 500 K has reached up to 3 000 K (Chen, 2012) whereas in this colour temperature region a deviation along the blackbody radiation curve of 1 000 K has already been perceived very disturbing (Bieske, 2010). This result was found for sequentially presented stimuli. For simultaneously presented stimuli an even lower tolerance value for CCT deviations is expected.

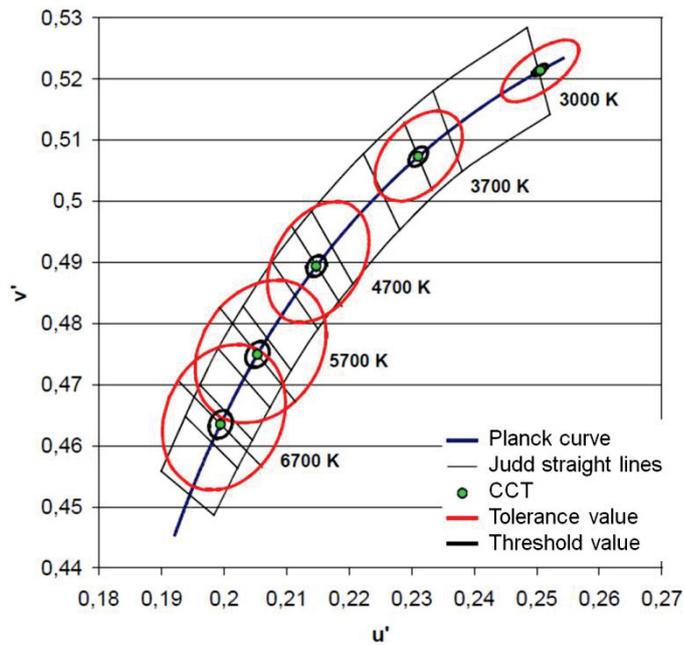


Figure 1: Tolerance and threshold values for CCT deviations (Bieske, 2010)

As shown in Figure 1, tolerance and threshold values for CCT deviations are dependent on the light colour. For warm white light sources the tolerance values are lower than for cold white sources. Therefore CCT deviations for warm white LEDs need to be considered more critical. Hence, the experimental focus of this study lies on warm white LED Retrofit luminaires.

Threshold values for barely recognized, definitely seen and very disturbing CCT deviations can be calculated from the following equations.

Barely recognized:

$$\Delta CCT = 6,0 \cdot 10^{-7} \cdot CCT^{2,231} \quad (1)$$

Definitely seen:

$$\Delta CCT = 1,3 \cdot 10^{-6} \cdot CCT^{2,233} \quad (2)$$

Very disturbing:

$$\Delta CCT = 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot CCT^{2,309} \quad (3)$$

Table 1 presents the calculated threshold values for the examined colour temperatures.

Table 1: Tolerance threshold for CCT deviations

CCT	ΔCCT		
	barely recognized	definitely seen	very disturbing
2 700	27	60	134
3 000	34	76	171

1.1 Experimental Design

This section describes the setup for measurement of spatial colour distributions as well as the preliminary experiments.

1.2 Measurement Setup

The measurement setup (Figure 2) consists of a centric moving mirror goniophotometer combined with an array spectroradiometer. The spectroradiometric detector can be moved in longitudinal direction. For the following measurements the detector is set at a distance of seven meters. A stray light elimination tube with different apertures is mounted in front of the optical probe of the spectrometer. Depending on the distance between light source and detector, the apertures can be adjusted. A simultaneous characterization of photometric, spectroradiometric and colorimetric data is possible.

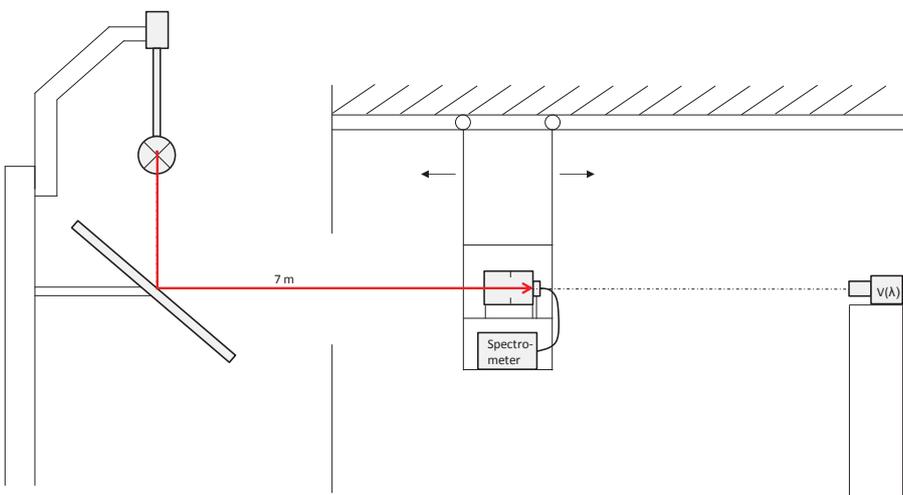


Figure 2: Measurement Setup (Bensel, 2012)

1.3 Preliminary Measurements

Prior to the actual LED Retrofit measurements a typical incandescent lamp (GLS) and a random warm white LED Retrofit have been examined (cf. Bensel, 2012). For both light sources no deviation of the correlated colour temperature with variation of the angle φ could be observed. As shown in Figure 3 the CCT over the angle γ of the incandescent lamp does not vary either. Contrary to this result the angular dependent CCT of a random warm white LED (Figure 4) differs significantly with γ .

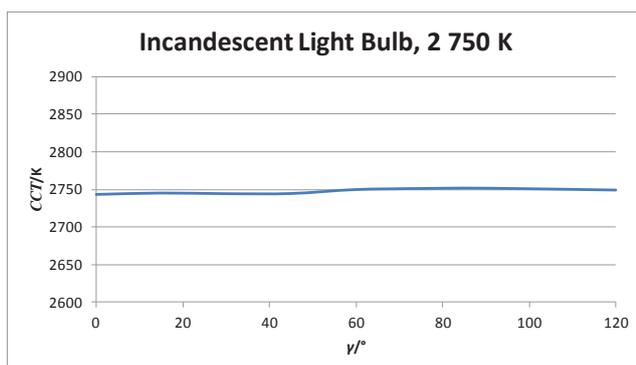


Figure 3: CCT deviation GLS for angle γ

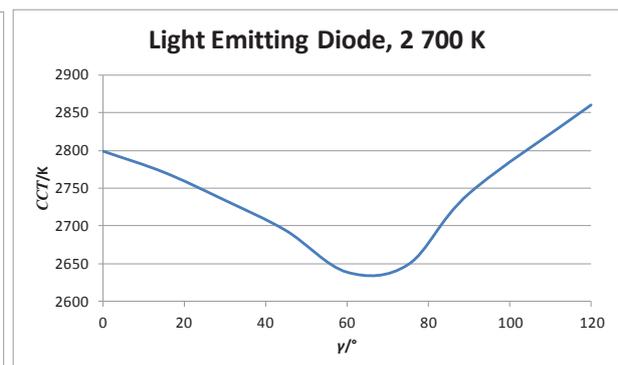


Figure 4: CCT deviation LED for angle γ

On this account the angular dependent CCT measurements were repeated with sixteen warm white LED Retrofits with mainly direct luminous intensity distributions. Four different C-planes (C0, C90, C180, C270) in the CIE C-gamma coordinate system were measured. At every C-plane the angle γ changed from 0° to 120° in steps of $\Delta\gamma = 15^\circ$. For steps of $\Delta\gamma = 5^\circ$ the value of ΔCCT showed no significant difference.

2 Results

Table 2 shows the angular CCT deviation of the measured LEDs.

Table 2: Angular CCT deviation of warm white LED Retrofits samples between 0° and 120° for viewing angle γ

No.	Luminous flux	CCT	Wattage	Coating	$\Delta\text{CCT} (\gamma)$
1	350 lm	2 700 K	8 W	opal	30 K
2	470 lm	2 700 K	8 W	opal	40 K
3	250 lm	2 700 K	4,1 W	clear	60 K
4	325 lm	3 000 K	4 W	opal	70 K
5	136 lm	3 000 K	3 W	clear	70 K
6	210 lm	2 700 K	4,4 W	clear	70 K
7	470 lm	3 000 K	7,7 W	opal	75 K
8	350 lm	2 700 K	6 W	opal	140 K
9	400 lm	2 700 K	8,1 W	clear	150 K
10	470 lm	2 700 K	8,5 W	opal	165 K
11	490 lm	2 700 K	7,2 W	opal	175 K
12	810 lm	3 000 K	10 W	opal	175 K
13	290 lm	3 000 K	6 W	opal	185 K
14	250 lm	3 000 K	5,4 W	opal	250 K
15	345 lm	3 000 K	8 W	opal	260 K
16	400 lm	2 700 K	8,1 W	opal	300 K

All samples are based on white phosphor LEDs. The spectral distribution of sample 16 shows an additional red LED (Figure 5). Similar spectral distributions were found for samples 4 and 9.

For some LED samples, with increasing angle γ critical deviations of the correlated colour temperature from main beam direction can be observed. The smallest CCT deviation is 30 K (Figure 6) whereas the highest deviation is 300 K (Figure 7).

The examples above show the highest CCT deviation between 0° and 120°. This result could not be found for all samples. Figure 8 describes the curves for sample 11 where the highest deviation is between 60° and 120°. The upward tendency of the curves could not be observed for all samples either. Figure 9 shows the downward tendency for sample 2.

Compared to the opal Retrofits, the curve shapes of the LEDs with clear bulbs (Figure 10 and Figure 11) seem to vary slightly between the different C-planes.

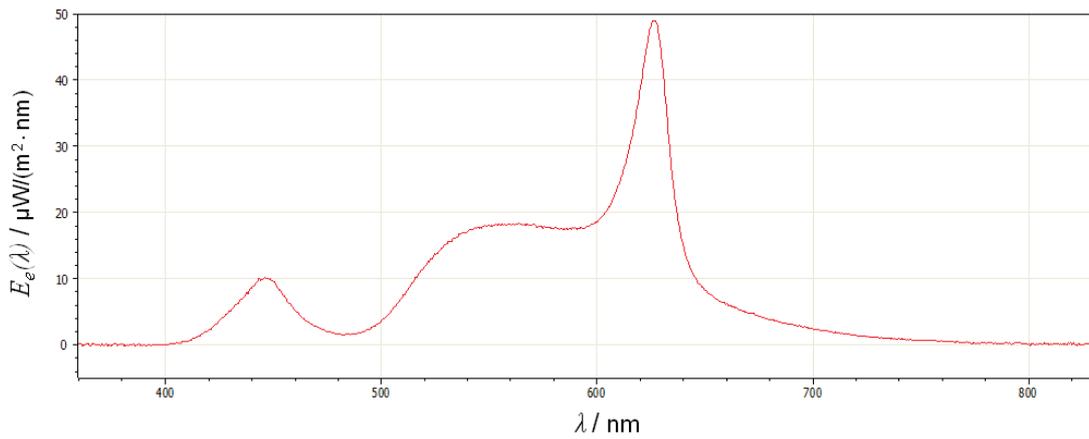


Figure 5: Spectral distribution of sample no. 16

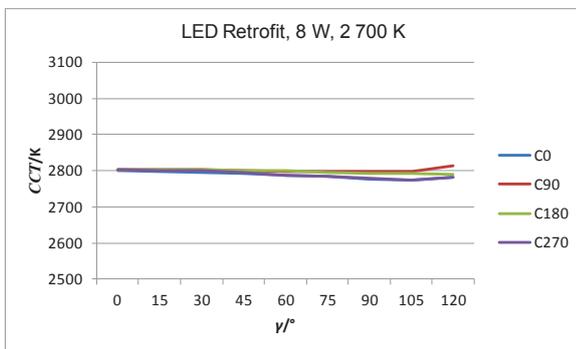


Figure 6: Δ CCT of 30 K for sample no. 1

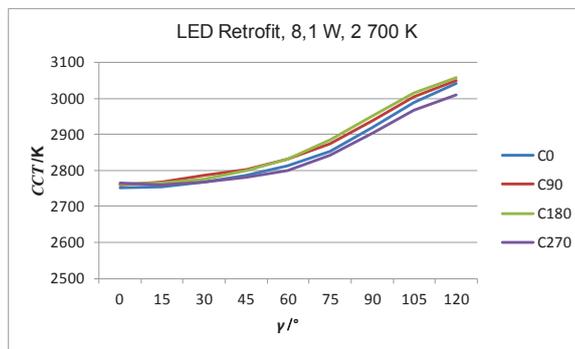


Figure 7: Δ CCT of 300 K for sample no. 16

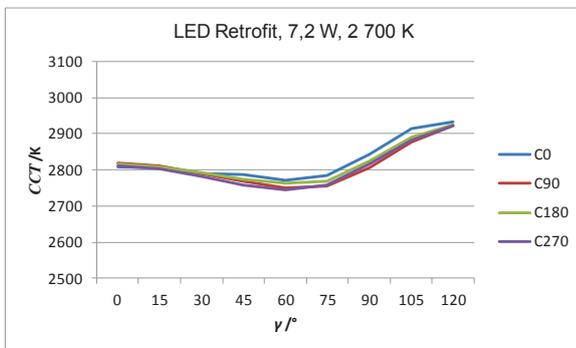


Figure 8: Δ CCT of 175 K for sample no. 1

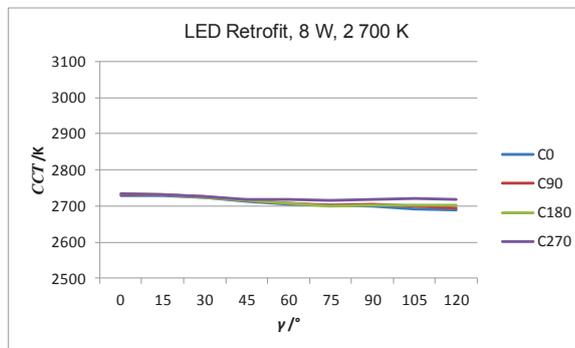


Figure 9: Δ CCT of 40 K for sample no. 2

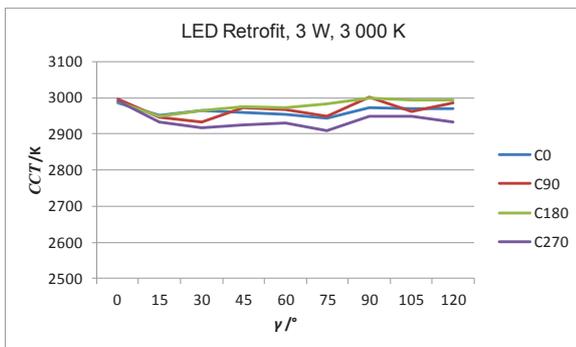


Figure 10: Δ CCT of 70 K for sample no. 5

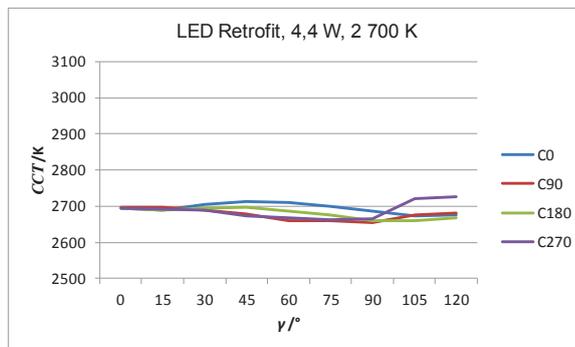


Figure 11: Δ CCT of 70 K for sample no. 6

3 Conclusions and Outlook

Compared to the tolerance thresholds for CCT deviations for warm white light sources in Table 1 no LED Retrofit shows a deviation that is below the threshold for barely recognized. In fact, more than half of the Retrofits show a deviation that is described as very disturbing.

A positive correlation between angle and direction of the deviation could not be found. For some samples with increasing angle γ the correlated colour temperature rises, for others it decreases.

Three of the sixteen samples combine white phosphor LEDs with an additional red LED. Though assumed, a correlation between the additional red LED and the CCT deviation could not be found.

The curves of the opal Retrofits do not differ between the measured C-planes. For these types the spectral distribution seems to be independent from the angle φ . For clear Retrofits a slight dependency between φ and the spectral distribution could be observed. The angular dependency of the correlated colour temperature of those types should be characterized for both angles.

As a measure to assure product quality information on the spectral power distribution of LED luminaires should always be provided by the manufacturers.

In summary, the results do not show precise correlations of the examined parameters which would explain CCT deviations. Studies from Chen et al. (2012) and López et al. (2010) state that the angular CCT dependency is based on the phosphor recipe, the processing in blue LED packaging and the chip structure. To gain information on the chip structure, the Retrofits need to be destroyed. This task is yet to come and results will be published in the near future.

4 References

Bensel, S., Völker, S. 2012. Spektrometriertes Verfahren zur Messung der Lichtstärkeverteilung von LED-Leuchten. In: Tagungsband Licht 2012, Berlin, 222-225.

Bieske, K. 2010. Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme. Dissertation 2010, TU Ilmenau.

Blattner, P. 2010. Basic Concepts in Photometry. METAS, Bern.

Chen, C.-Y., Chen, C.-C., Chiu, C.-Y., Peng, Y.-N., Wang, Y.-H., Yang, T.-H., Chung, T.-Y., Chung, C.-Y., Sun, C.-C. 2012. Optimal white LED package with high uniformity in angular CCT distribution. In: Proceedings of the 13th international symposium on the science and technology of lighting, 255-256.

IEC 2011. IEC/PAS 62722-2-1, Luminaire Performance - Part 2-1: Particular requirements for LED luminaires, 11.

IES 2008. IES LM-79-08, Electrical and Photometric Measurements of Solid-State-Lighting Products, 11-13.

López, M., Lindemann, M., Véron, C., Betzold, N., Dämming, M., Sperling, A. 2010. Long-term stability and angular dependency of the chromaticity of high-power white LEDs. In: Abstracts of the CIE Expert Symposium on spectral and imaging methods for photometry and radiometry, 74-76.

Angular Dependent Spectral Power Distribution of LED Luminaires

Silvia Bensele, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

Proc. LUX Europa 2013, S. 507-512

Abstract

Photometric data of lamps are typically measured with integrating spheres. The main quantities of interest are the total luminous flux, the correlated color temperature and the color rendering index. On the other hand, luminaires are typically measured with goniophotometers. The main quantities of interest are the luminous intensity distribution as well as the light output ratio.

Since LED lamps cannot always be separated from luminaires, new measuring methods as well as standards need to be developed. By combination of goniophotometry with spectroradiometry, a thorough characterization of LED luminaires could be possible. One metric of interest that can be measured with goniospectroradiometry is the angular dependent spectral power distribution of LED luminaires. In this study measurement results from a survey of 12 neutral white LED outdoor luminaires are presented.

Keywords: Solid State Lighting, Angular CCT Deviation, Spatial Colour Distribution

1 Theoretical Background

So far, standards have recommended providing spatially averaged values for colour quantities (IES, 2008); (IEC 2011). For high power white LED chips, studies (Blattner, 2010); (López, 2010) have shown that contrary to incandescent lamps the correlated colour temperature can vary significantly with the viewing angle Θ and the azimuth angle φ . Therefore, the prEN13032-4 "Light and lighting - Measurement and presentation of photometric data - Part 4: LED lamps, modules and luminaires" describes the spatial chromaticity uniformity. It is defined as the largest deviation of chromaticity (u', v') from its spatially averaged chromaticity (u'_a, v'_a). The vertical angle interval should be 10° or less and the horizontal angle interval should be 90° or less. Data at angle points where the luminous intensity is less than 10% of the peak intensity shall be ignored.

A similar definition is given by IES LM-79-08. The so called spatial non-uniformity of chromaticity $\Delta u'v'$ is determined as the maximum deviation (distance on the CIE($u'v'$) diagram) among all measured points from the spatially averaged chromaticity coordinates. The chromaticity coordinates and luminous intensity or illuminance shall be measured at 10° or less for the vertical angle and 90° or less for the horizontal angle. The measurements only need to be made for those vertical angles where the average luminous intensity is more than 10% of the peak intensity.

Unfortunately, neither of the two standards describe how to evaluate $\Delta u'v'$ for certain applications and even though $\Delta u'v'$ should describe equally perceived colour differences, studies have shown that at least for sequentially presented stimuli tolerance and threshold values for chromaticity deviations are dependent on the light colour.

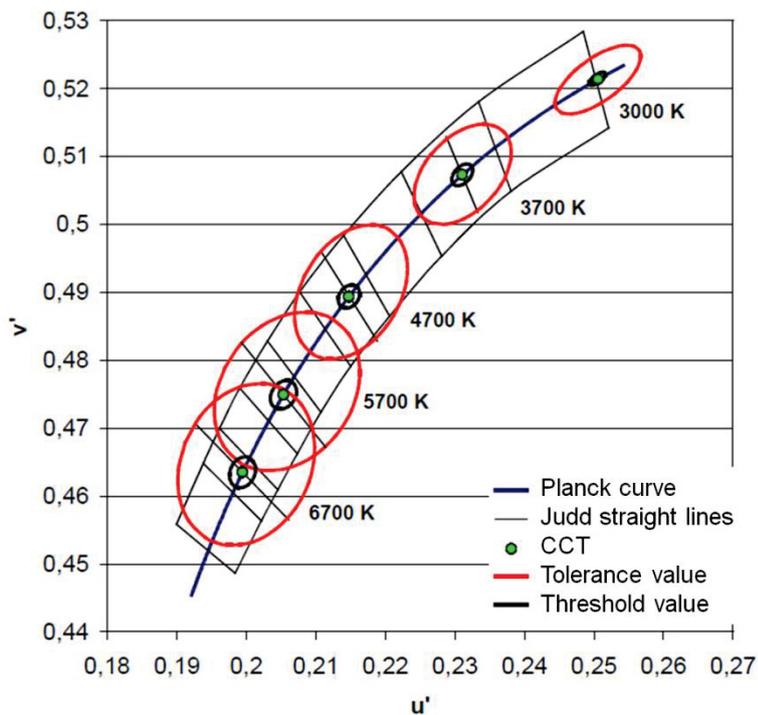


Figure 1: Tolerance and threshold values for sequentially presented stimuli (Bieske, 2010)

As shown in Figure 1, for warm white light sources the tolerance values are lower than for cold white sources. Threshold values for barely recognized, definitely seen and very disturbing deviations can be calculated from the following equations.

Barely recognized:

$$\Delta u'v' = 0.0008 + CCT \cdot 2.1 \cdot 10^{-7} \quad (1)$$

Definitely seen:

$$\Delta u'v' = 0.0017 + CCT \cdot 5.2 \cdot 10^{-7} \quad (2)$$

Very disturbing:

$$\Delta u'v' = 0.0037 + CCT \cdot 1.1 \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

Table 1 presents the calculated threshold values for the examined colour temperature.

Table 1: Tolerance threshold for light colour deviations

	$\Delta u'v'$		
<i>CCT</i>	barely recognized	definitely seen	very disturbing
4 000 K	0.0016	0.0038	0.0081

2 Experimental Design

This section describes the setup for the measurement of the angular dependent spectral power distribution, the measured samples and the calculations for the measured data.

2.1 Measurement Setup

The measurement setup (Figure 2) consists of a centric moving mirror goniophotometer combined with an array spectroradiometer. The spectroradiometric detector can be moved in longitudinal direction. For the following measurements the detector is set at a distance of seven meters. A stray light elimination tube with different apertures is mounted in front of the optical probe of the spectrometer. Depending on the distance between light source and detector, the apertures can be adjusted. A simultaneous characterization of photometric, spectroradiometric and colorimetric data is possible.

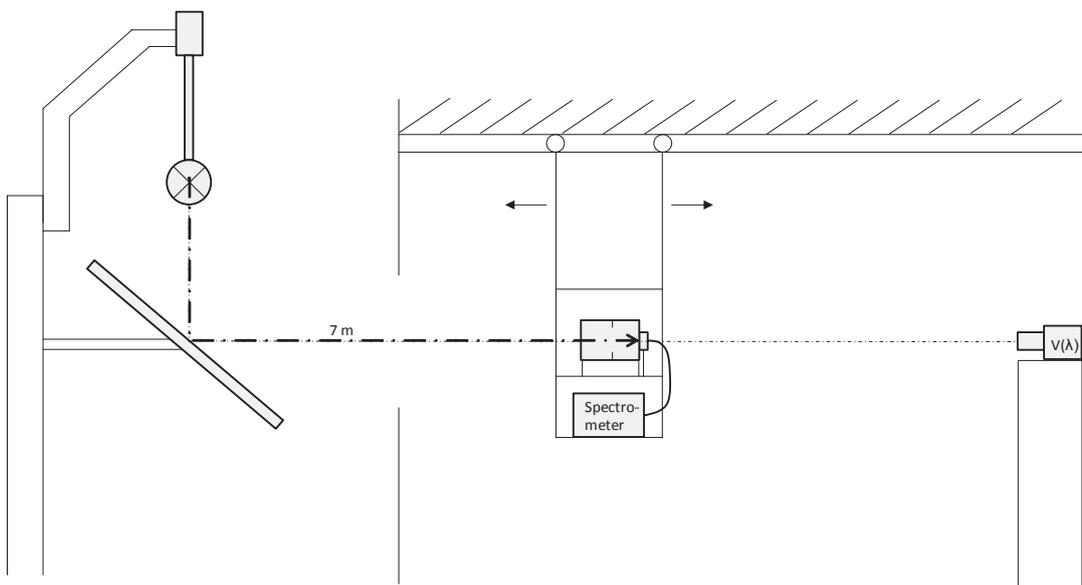


Figure 2: Measurement Setup

2.2 Measurement Method

According to prEN13032-4 and IES LM-79-08 the spectral power distributions of all neutral white LED outdoor luminaires (nominal CCT of 4 000 K) were measured at steps of 10° for the vertical angle Θ and steps of 45° for the horizontal angle φ . Due to the luminous intensity distributions the measurements were taken from 0° to 90° for Θ and from 0° to 90° for φ . The chromaticity coordinates as well as the illuminances measured at the three different C-planes (C0, C45, C90) were averaged for every angle Θ . Then the average chromaticity coordinate u'_a was calculated according to equation 4.

$$u'_a = \sum_{i=1}^n u'(\Theta_i) \cdot w_i(\Theta_i) \quad (4)$$

with

$$w_i(\Theta_i) = \frac{E(\Theta_i) \cdot \Omega(\Theta_i)}{\sum_{i=1}^n E(\Theta_i) \cdot \Omega(\Theta_i)} \quad (5)$$

and

$$\Omega(\Theta_i) = \begin{cases} 2\pi [|\cos(\Theta_i) - \cos(\Theta_i + \frac{\Delta\Theta}{2})|]; \text{ for } \Theta_i = 0^\circ \\ 2\pi [|\cos(\Theta_i - \frac{\Delta\Theta}{2}) - \cos(\Theta_i + \frac{\Delta\Theta}{2})|]; \text{ for } \Theta_i = 10^\circ, 20^\circ, \dots, 90^\circ \end{cases} \quad (6)$$

The coordinate v'_a was calculated in the same way. The number of considered angles Θ varied depending on the luminous intensity/illuminance criterion.

3 Results

Table 3 shows the measured deviations for the LED outdoor luminaires. Samples 1, 2, 4, 5 and 10 have aluminium reflectors, all other samples have ancillary lenses.

Table 3: Light colour deviation of 12 neutral white LED outdoor luminaires

No.	<i>C0</i> / $\Theta 0^\circ - \Theta X^\circ$	<i>C45</i> / $\Theta 0^\circ - \Theta Y^\circ$	<i>C90</i> / $\Theta 0^\circ - \Theta Z^\circ$	u'_a	v'_a	$\Delta u'v'$
	X	Y	Z			
1	80°	80°	70°	0.2208	0.5040	0.0032
2	80°	40°	30°	0.2224	0.4998	0.0035
3	70°	50°	50°	0.2209	0.5143	0.0054
4	80°	80°	70°	0.2241	0.5043	0.0064
5	70°	70°	60°	0.2167	0.5130	0.0081
6	70°	60°	50°	0.2182	0.5026	0.0085
7	70°	70°	60°	0.2210	0.5021	0.0087
8	60°	70°	70°	0.2217	0.5019	0.0124
9	70°	70°	60°	0.2215	0.5018	0.0126
10	80°	70°	50°	0.2238	0.5137	0.0136
11	70°	70°	60°	0.2231	0.5043	0.0142
12	70°	70°	50°	0.2207	0.5018	0.0175

For the spatial non-uniformity of chromaticity $\Delta u'v'$ values from 0.0032 to 0.0175 were found. Compared to the calculated tolerance thresholds in Table 1 two-thirds of the measured deviations would be considered very disturbing. The threshold values are valid for sequentially presented stimuli in foveal vision. For simultaneously presented stimuli the threshold for definitely seen deviations is even lower ($\Delta u'v' \approx 0.002$, Kramer, 2013).

A comparison of the polar diagrams of samples no. 1 and 12 (Figure 2 and 3) for the measured C-planes indicates a correlation between the curve shape and the deviation. It seems that a narrow distribution with a strong peak leads to a higher deviation. Though, a comparison of the polar diagrams of all other samples could not confirm this correlation.

For sample no. 1 the point with the largest deviation of chromaticity is at C0 and $\Theta=30^\circ$. This point has an average illuminance value. For sample no. 12 the point with the largest deviation of chromaticity is at C45 and $\Theta=70^\circ$. This point has the lowest measured illuminance of the distribution. A strong correlation between the illuminance level and the deviation could not be found.

For all measured samples the location of the blue peak does not change over the measured angles but for example for sample no. 1 the ratio between the peak wavelength and the dominant wavelength does not change whereas for sample no. 12 the ratio does change in the angle area where the largest deviation of chromaticity was measured. The analysis of all samples shows a random distribution of the change in the ratio and the deviation.

4 Conclusion

The angular dependent spectral power distribution of 12 LED luminaires was measured and the spatial non-uniformity of chromaticity $\Delta u'v'$ was calculated. The discovered values fall within a range where the deviation of chromaticity can be seen.

The American National Standard "Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products" (ANSI, 2008) recommends chromaticity tolerances for general indoor lighting applications that correspond to those of 7-step MacAdams ellipses although a colour difference can already be seen for a 2-step MacAdam ellipse. There is no equivalent standard that covers outdoor lighting applications but for these applications even higher chromaticity tolerances are expected. That means, even though the measured deviations in this study can be seen, they do not seem to be disturbing for the actual application. Nevertheless, the calculation of the spatial non-uniformity of chromaticity is recommended for any LED luminaire. Therefore, an adequate evaluation matrix that is adapted to the respective application needs to be developed.

5 References

ANSI NEMA ANSLG C78.377-2008, Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products, 2008.

Bieske, K. Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme. *Dissertation* 2010, TU Ilmenau.

Blattner, P. Basic Concepts in Photometry. METAS 2010, Bern.

IEC/PAS 62722-2-1, Luminaire Performance - Part 2-1: Particular requirements for LED luminaires 2011, 11.

IES LM-79-08, Electrical and Photometric Measurements of Solid-State-Lighting Products 2008, 11-13.

López, M., Lindemann, M., Véron, C., Betzold, N., Dämming, M., Sperling, A. 2010. Long-term stability and angular dependency of the chromaticity of high-power white LEDs. In: Abstracts of the CIE Expert Symposium on spectral and imaging methods for photometry and radiometry, 74-76.

Kramer, G. Personal Communication. June 10, 2013.

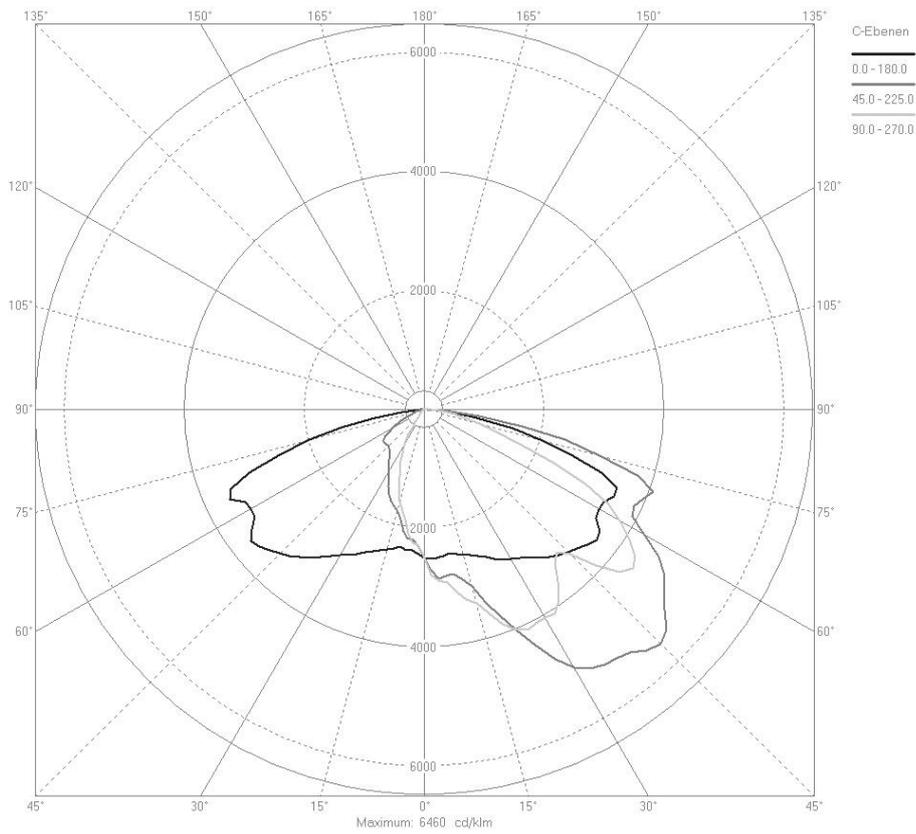


Figure 3: Polar diagram for sample no. 1

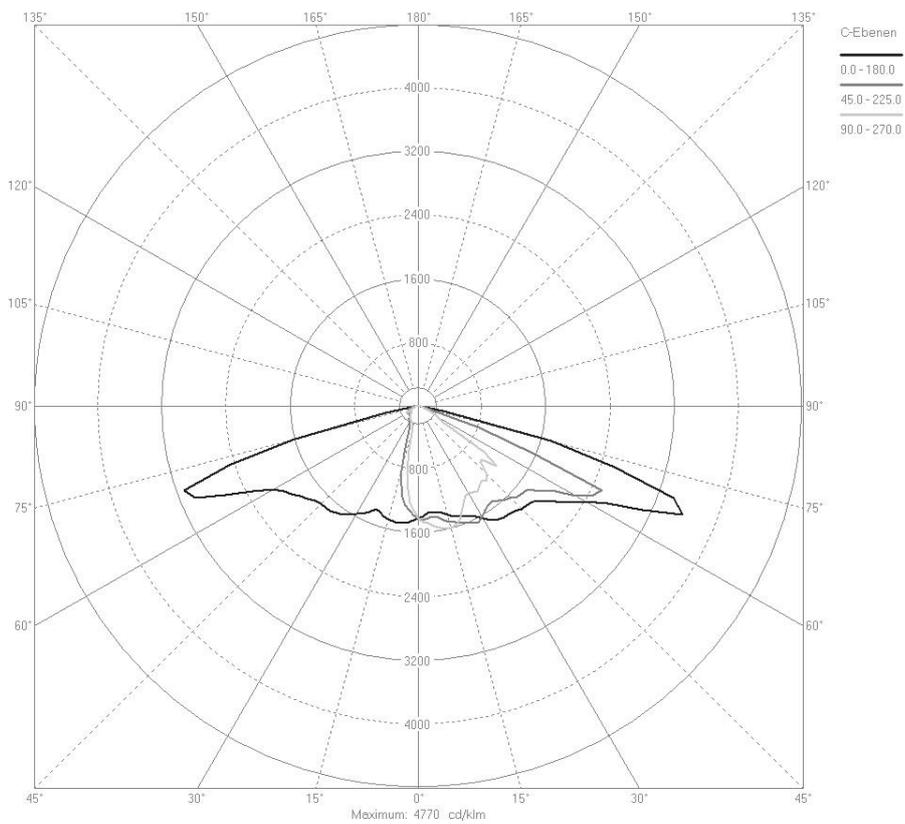


Figure 4: Polar diagram for sample no. 12

Lichtstärkeverteilungen getrennt emittierender Bereiche

Silvia Bense, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

Tagung Lux Junior Dörfeld, 2013

1 Einleitung

Zur Bestückung von modernen technischen Leuchten werden immer häufiger Hochleistungsleuchtdioden verwendet. Der Einsatz von LEDs ermöglicht eine neue Designfreiheit, die dazu führt, dass nicht in allen Fällen eine homogen leuchtende Fläche innerhalb der Leuchte realisiert wird. Diese getrennt emittierenden Bereiche korrekt zu photometrieren, stellt jedoch eine besondere Herausforderung dar.

2 Aktueller Stand der Technik und Normung

Die Messung einer Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) im Fernfeld erfolgt unter der Annahme einer punktförmigen Lichtquelle. Bei LED-Leuchten kann es jedoch zu größeren unbeleuchteten Bereichen zwischen leuchtenden Flächen kommen, die durch eine visuelle Prüfung im Fernfeld bereits erkennbar sind. Würde man eine Gesamt-LVK der Leuchte messen, könnte es passieren, dass der Lichtschwerpunkt in einem nicht emittierenden Bereich innerhalb der Leuchte angesetzt wird. Dies könnte wiederum zu einer Fehlbewertung lichttechnischer Größen in der Beleuchtungsplanung führen. Die aktuelle Normung [1] empfiehlt daher Toleranzbedingungen für Prüferentfernungen in der Fernfeld-Photometrie. Bei Prüfobjekten, die große unbeleuchtete Bereiche zwischen den beleuchteten Bereichen aufweisen, wird eine photometrische Mindestentfernung r empfohlen, die sich nach Gleichung 1 wie folgt berechnen lässt:

$$r \geq 15 \cdot (D + S) \quad (1)$$

mit

D maximales leuchtendes Maß des Prüfobjekts

und

S größter Abstand zwischen zwei angrenzenden leuchtenden Bereichen

3 Messungen

Zur Prüfung des Einflusses nicht emittierender Bereiche auf die Lichtstärkeverteilung wurden zunächst Messungen an einer LED-Musterleuchte (Abb. 1) mit einem Fernfeld-Drehspiegel-Goniophotometer GO-DS 2000 durchgeführt. Die Entfernung zwischen Messobjekt und Empfänger beträgt 17,67 m, bei Nutzung eines Umlenkspiegels beträgt der Abstand zwischen Messobjekt und Empfänger 30,15 m. Durch die Größe des Umlenkspiegels ist der maximale Durchmesser des zu messenden Objekts jedoch auf 0,9 m begrenzt.

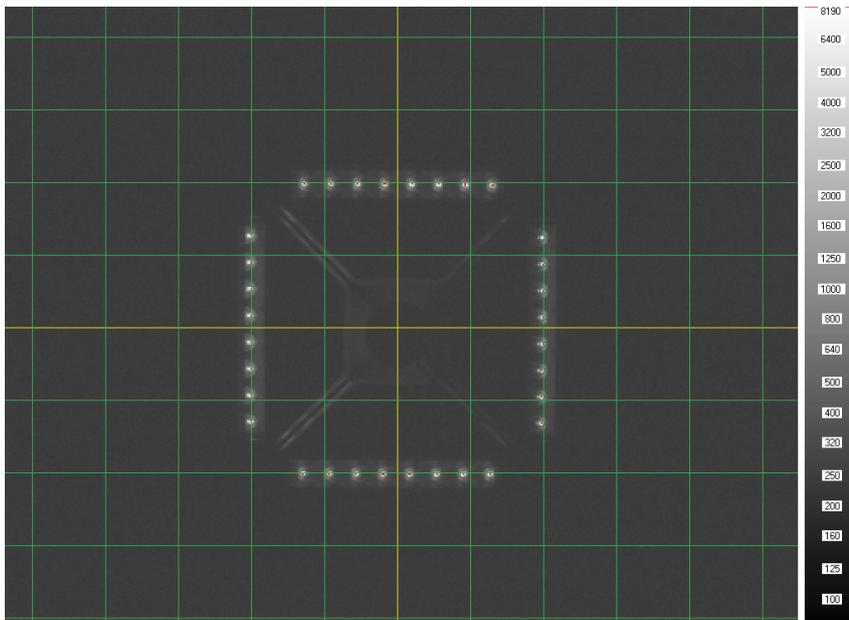


Abbildung 1: Leuchtende und unbeleuchtete Bereiche der LED-Musterleuchte

Aus der Geometrie der Musterleuchte ergab sich die photometrische Mindestentfernung r zu $r = 25,5$ m. Aufgrund der Leuchtendiagonale von 0,99 m war eine Messung mit Umlenkspiegel nicht möglich. Trotz Unterschreitung der empfohlenen Mindestentfernung wurde die Lichtstärkeverteilungskurve daher mit einem Messabstand von $r = 17,66$ m gemessen. Dabei wurde der Lichtschwerpunkt der Leuchte im geometrischen Zentrum angenommen. Die Lichtstärkeverteilungskurve wurde anschließend mit einem Nahfeld-Goniophotometer RiGO 801 gemessen. Die Winkelschritte (φ in 1° , ϑ in $2,5^\circ$) der Fernfeldmessung wurden beibehalten. Tabelle 1 stellt die Messbedingungen der Fernfeld- und Nahfeldmessung gegenüber.

Tabelle 1: Messparameter bei Fernfeld- und Nahfeldmessung

	Spannung	Strom	Leistung	f_1'	Raumtemperatur
RiGO 801	230,0 V	0,371 A	81,0 W	1,47 %	23,7°C
GO-DS 2000	229,2 V	0,372 A	80,6 W	0,90 %	24,6°C

4 Ergebnisse

Die Polardiagramme der Lichtstärkeverteilungen in den 6 Ebenen C0 - C180, C45 - C225 und C90 - C270 für die nahfeld-goniophotometrische sowie die fernfeld-goniophotometrische Messung der LED-Musterleuchte sind in Abbildung 2 gegenüber gestellt.

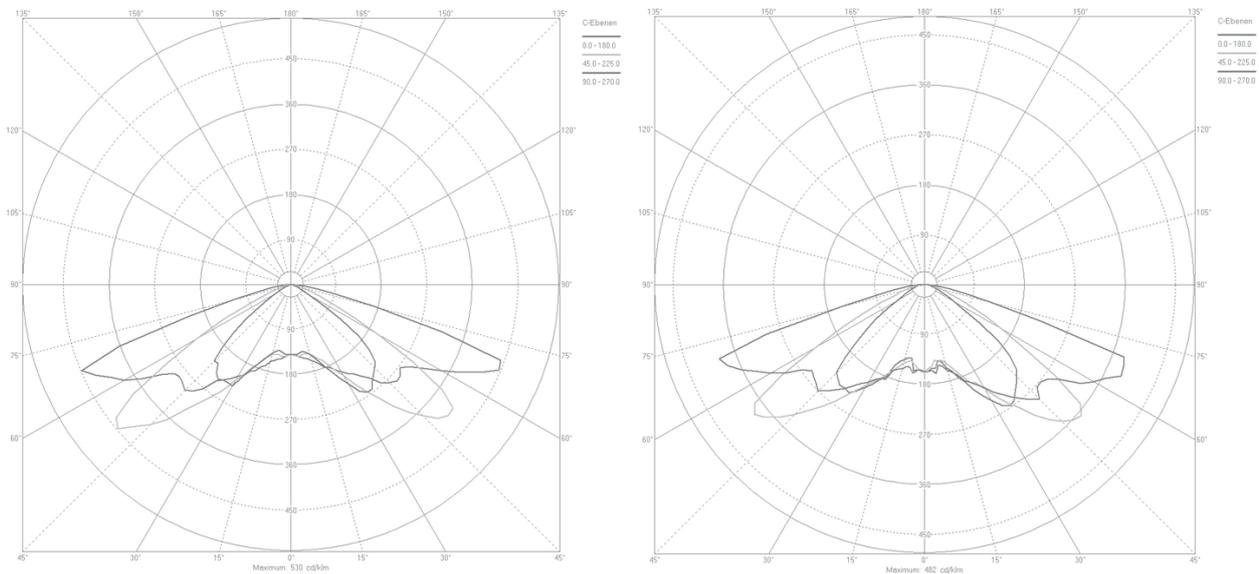


Abbildung 2: Polardiagramme der LED-Musterleuchte, links: Nahfeld, rechts: Fernfeld

Die relativen Verläufe ähneln sich stark. Die gemessenen Gesamtlichtströme betragen:

$\Phi = 5.950 \text{ lm}$ für die Fernfeldmessung und

$\Phi = 5.974 \text{ lm}$ für die Nahfeldmessung.

Die Abweichung der gemessenen Gesamtlichtströme beträgt $< 0,5\%$.

Die Berechnungsergebnisse der Simulation mit beiden Messungen ergaben mittlere horizontale Beleuchtungsstärken im Bewertungsfeld von:

$E_m = 17,6 \text{ lx}$ für die Fernfeldmessung und

$E_m = 18,1 \text{ lx}$ für die Nahfeldmessung.

Die Abweichung der mittleren Beleuchtungsstärken im Bewertungsfeld beträgt $< 3\%$.

5 Fazit und Ausblick

Trotz deutlicher Unterschreitung der empfohlenen Mindestentfernung für die Fernfeldmessung um 30% ergaben sich bei der Fernfeld- sowie der Nahfeldmessung kaum Unterschiede in der Lichtstärkeverteilung und dem gemessenen Gesamtlichtstrom. Dies deutet darauf hin, dass der Faktor 15 in der Berechnungsvorschrift für die Mindestentfernung womöglich zu hoch angesetzt ist. Um weitere Aussagen über den Einfluss getrennt emittierender Bereiche auf die Gesamt-LVK und die daraus abgeleiteten Größen treffen zu können, wird im Rahmen eines Forschungsprojektes an der TU Berlin eine Musterleuchte mit einzeln steuerbaren LED-Modulen in Matrixform aufgebaut. Anhand dieser Musterleuchte wird die nicht leuchtende Fläche zwischen emittierenden Bereichen variiert und die Abweichung der Gesamt-LVK zu den jeweils einzeln gemessenen Verteilungen untersucht. Zudem werden nahfeld-goniophotometrisch sowie fernfeld-goniophotometrisch gemessene LVKs verglichen. Die Ergebnisse werden in einer Handlungsempfehlung für Anwender zusammengefasst.

6 Literatur

- [1] prEN 13032-4:2013. Licht und Beleuchtung - Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten - Teil 4: LED-Lampen, -Module und -Leuchten, Kapitel 4.2.4.4

UNILED – Erfassung und Beseitigung von Innovationshemmnissen beim Solid State Lighting

Im Rahmen des Verbundvorhabens UNILED erforschten die vier lichttechnischen Fachgebiete an deutschen Universitäten – TU Berlin, TU Darmstadt, TU Ilmenau und KIT Karlsruhe – gemeinsam die Hemmnisse, welche den Einsatz von Solid-State-Lighting verzögern oder behindern können. Eine exakte wissenschaftliche Beschreibung der LED-Technologie wurde vorgenommen. Der vorliegende Forschungsbericht fasst die bisherigen Projektergebnisse zusammen. Die gesammelten Beiträge der im Projekt tätigen wissenschaftlichen Mitarbeiter beschreiben die Innovationshemmnisse beim Einsatz von Solid-State-Lighting umfassend und geben Lösungsansätze für deren Beseitigung.

ISBN 978-3-7983-2707-8 (print)
ISBN 978-3-7983-2708-5 (online)



ISBN 978-3-7983-2707-8



<http://verlag.tu-berlin.de>