

TAGUNGSBAND • PROCEEDINGS

KARLSRUHE

LICHT 2016

25. SEPTEMBER

28. SEPTEMBER



Scientific
Publishing

Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (LiTG) (Hrsg.)

LICHT 2016

Karlsruhe, 25. – 28. September
Tagungsband – Proceedings

LICHT 2016

Karlsruhe, 25. – 28. September
Tagungsband – Proceedings

Herausgegeben von der
Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft e. V. (LiTG)

Umschlaggestaltung, Gestaltung Kapitelöffnung (S. 1) und Sponsoreseiten (S. 755-765):
zwo-elf Büro für Gestaltung, www.zwo-elf.de

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2016

ISBN 978-3-7315-0564-8
DOI 10.5445/KSP/1000057817

INHALTSVERZEICHNIS · TABLE OF CONTENTS

INNENBELEUCHTUNG · INTERIOR LIGHTING

- Raumwahrnehmung bei verschiedenen Leuchtdichteverteilungen im Büro** · Visual appearance under different luminance distributions
Raphael Kirsch 3
- Licht und Kooperation: Einfluss der Beleuchtung auf prosoziales Verhalten** · Light and cooperation: Impact of illumination on prosocial behavior
Olga Kombeiz, Anna Steidle, Erik Dietl 11
- Kontextsensitive Beleuchtung: Entwicklung einer neuartigen Versuchseinrichtung und Bewertung der Nutzerakzeptanz** · Context sensitive lighting: Development of an innovative test facility and assessment of the user acceptance
Carolin Hubschneider, Yuan Fang, Jan de Boer 19
- Einheitliche Bewertung von Lichtsituationen mit dem LiTG-Fragebogen – erste Erfahrungen** · Uniform assessment of lighting situations with the LiTG Questionnaire – first experiences
Cornelia Vandahl, Cornelia Moosmann, Carsten Funke 27
- Das Buch „Beleuchtungstechnik-Grundlagen“ 2016** · The Book “Beleuchtungstechnik-Grundlagen” 2016
Dirk Seifert, Meike Barfuß 35

AUSSENBELEUCHTUNG · EXTERIOR LIGHTING

- Eine Zukunftslösung für die bedürfnisgerechte Beleuchtung des öffentlichen Raums (smart lighting)** · Pioneering solution for dynamic public lighting
Jörg Haller 43
- Licht über Wien – Eine vollständige Vogelperspektive** · Light over Vienna – A complete aerial perspective
Günther Wuchterl 51

Außenlichtkonzept Hambacher Schloss · Outdoor lighting concept
Hambacher Schloss
Barbara Benkert 53

DIN 67528 „Beleuchtung von öffentlichen Parkbauten und öffentlichen Parkplätzen“ · DIN 67528 „Lighting in public car-parks and on public off-street parking spaces“
Thomas Klimiont 61

INNENBELEUCHTUNG · INTERIOR LIGHTING

Einfluss der Anordnung von strukturierten LED-Leuchten auf die Lesbarkeit von bedruckten Papieren und Tablet-PCs · Impact of the arrangement of non-uniform LED luminaires on the readability of printed papers and tablets
Carsten Funke, Cornelia Vandahl, Kay-Uwe Dingeldein, Bert Junghans, Christoph Schierz 67

Untersuchung des Einflusses der Lichtaustrittsfläche von LED-Leuchten auf die psychologische Blendung der Beobachter · Investigation of the influence of emitting area of LED luminaires on the psychological glare of the observers
Hristo Vasilev, Iva Petrinska, Petar Aleksiev, Dilyan Ivanov, Valchan Georgiev 75

Einfluss der Raumtemperatur auf den Umgang der Nutzer mit Kunst- und Tageslicht · The impact of the room temperature on users' interventions regarding artificial lighting and daylight
Cornelia Moosmann 83

Lichttechnisches und thermisches Gebäudeauswertetool · Tool for lighting and thermal evaluation in buildings
Matthias Werner, David Geisler-Moroder, Oliver Ebert, Bert Junghans 91

Dezentralisierte Beleuchtung in Großraumbüros · Localized lighting in open-plan offices
Christel de Bakker, Myriam Aries, Helianthe Kort, Alexander Rosemann 99

Energieeffizienz und Helligkeitseindruck im Verkauf · Energy efficiency and perceived brightness in retail lighting
Andreas Ampenberger, Siegmund Staggl, Wilfried Pohl 107

STRASSENBELEUCHTUNG · ROAD LIGHTING

- Erfahrung mit Beleuchtung für die Smart City Aspern** · Experience with street lighting of smart city Aspern
Gerald Wötzl 115
- Monitoring der tatsächlichen Energieeinsparung bei Einsatz von LED in der Straßenbeleuchtung am Beispiel der Stadt Norden** · Monitoring of the actual energy savings with LED street lighting - The example of the city of Norden
Sabine Piller, Susanne Korhammer 117
- Straßenbeleuchtung im westlichen Balkan – Erste Erfahrungen mit Einspar-Contracting am Beispiel Serbien und Montenegro** · Street lighting in the Western Balkans – First experience with energy performance contracting from Serbia and Montenegro
Sabine Piller, Siegfried Brenke, Zoran Kapor 125
- Effizienz in der Straßenbeleuchtung – nur möglich durch eine örtlich und zeitlich variable Lichtverteilung** · Efficiency in road lighting – only possible with local and temporal adaptive lighting distribution
Stephan Völker, Juri Steblau 133
- Photometrische Bestandsaufnahme der Straßenbeleuchtung einer Stadt** · Photometric inventory of street lighting in a city
Matthias Giesener 135
- Innovative Straßenbeleuchtung und Smart City Lösungen** · Innovative street lighting and smart city solutions
Ernst Smolka 137
- Intelligente, vernetzte Außenbeleuchtungssysteme der Zukunft** · Smart, networked exterior lighting systems for future applications
Martin Przewloka, Benedikt-Alexander Mokraß, Alexander Lenhardt, Helmut Wörner 139
- Erhebung der Kundenanforderungen für LED-Straßenleuchten im Bereich von Hauptverkehrsstraßen** · Ascertainment of customer's requirements for LED streetlights of main roads
Jens Kilian, Hildegard Manz-Schumacher, Eva Schwenzfeier-Hellkamp 147

LICHT UND GESUNDHEIT · LIGHT AND HEALTH

- Optimierte Spektren für Human Centric Lighting – Theoretische Grenzen** · Optimised emission spectra for human centric lighting – Theoretical constraints
Sebastian Knoche 155
- Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Aufmerksamkeitssteigerung durch biologisch wirksames Licht** · Investigation of the temporal process of improved attention by biologically effective light
Inga Rothert, Stephan Völker 163
- Der Einfluss von monochromatischem Licht auf Patienten mit einer Bipolar-I-Erkrankung im Vergleich zu gesunden Kontrollpersonen** · Influence of monochromatic light on people with bipolar affective disorder in comparison to healthy subjects
Falk Wieland, Philipp Ritter, Arne Kalbreyer 171
- Wirkung von dynamischer Beleuchtung auf Herzratenvariabilität und Wohlbefinden** · Effects of discernible illuminance changes on heart rate variability and well-being
Sarah Kroetz, Oliver Stefani, Achim Pross 179
- Die potentielle Bedeutung von Nahinfrarot-Strahlung für die Gesundheit von Auge und Haut** · Potential relevance of near infrared radiation for ocular and dermal health
Alexander Wunsch 187

LICHTMANAGEMENT UND LEUCHTEN · LIGHT MANAGEMENT AND LUMINAIRES

- Wartungsfaktoren zur Planung von LED-Leuchten** · Maintenance factors for LED luminaires
Jörg Minnerup 189
- Licht für industrielle Prozesse und Produktion** · Light for industrial processes and production
Sebastian Hesse, Frank Hofmann 197
- Lichtsteuerung beyond lighting** · Lighting controls beyond lighting
Peter Dehoff 203

Berührungslose Interaktion mit Licht am Arbeitsplatz · Touchless interaction with light <i>Christian Riedel, Matthias Bues, Raimund Dachsel</i>	211
Intelligentes Leuchten-System mittels Visible Light Communication · Intelligent Light-System by visible light communication <i>Tobias Hofer</i>	213
Beurteilung von Alterungsdaten von Farbsensoren für den Einsatz in Multikanal LED-Leuchten · Estimation and first ageing results of colour sensors for a feedback control in multichannel LED luminaires <i>Matthias Szarafanowicz, Sebastian Beck, Tran Quoc Khanh</i>	221
Adaptive tageslichtabhängige Lichtsteuerung für nicht-visuell wirksame Beleuchtung · Adaptive daylight responsive control for non-visual effective lighting <i>Nils Weber, Martine Knoop, Stephan Völker</i>	229
LICHT UND ARCHITEKTUR · LIGHT AND ARCHITECTURE	
Und – was Neues ... ? Was wirklich Neues ... ? · Anything new ... ? <i>Herbert Cybulska</i>	235
Das Licht in der gotischen Kathedrale – Herkunft und Bedeutung · Metaphysics, origin and meaning of light in the gothic cathedral <i>Sarah Christiane Ruppert</i>	243
Transformation einer Kirche in eine Schule · Transformation of a church into a school <i>Mario Rechsteiner</i>	249
Beleuchtung im Restaurant · Restaurant lighting <i>Carolin Fröhlich</i>	255
Es gilt die individuelle Identität des dörflichen und städtischen Raumes trotz Licht zu bewahren! · It is essential to preserve the individual identity of village and urban areas despite light! <i>Gudrun Schach</i>	263

LEUCHTENOPTIK · LUMINAIRE OPTICS

Entblendung von transparenten Flächenlichtleitern nach DIN EN 12464-1 durch Nanostrukturen · Glare suppression at transparent light guides according EN 12464-1 via nano structures
Norbert Fernkorn 269

Diffraktive Optiken zur chromatischen und thermischen Linsenkorrektur sowie zur Lichtformung · Diffractive optics in headlamp systems – Lens correction and generation of light distributions
Michael Schöne, Oliver Sandfuchs, Cornelius Neumann 277

Flache Transmissionsoptiken für die LED-Lichttechnik · Flat transmission optics for LED lighting
Mike Bülters, Tobias Kraus, Dominic Nußbaum, Christoph Stöver, Volkmar Boerner 285

Analytische Methode zur Berechnung von Verformungen in mikroprismatischen Lichtwellenleitern · An improved analytical technique for determining bending deformations in prismatic optical films
Berta García-Fernández, Antonio Alvarez Fernández-Balbuena, Daniel Vazquez 293

Freiformflächenoptiken für die Umsetzung von Dynamic-White Beleuchtungskonzepten · Complex surface optics for the realization of dynamic-white illumination concepts
Georg Spielberger, Christian Knoflach, Christian Reisecker 301

Integration von Lichtleitern in Geweben mit ortsabhängiger Seitenlichtauskopplung · Integration of optical fibers in woven fabrics with position-dependent sidelight emission
Daria Wehlage, Andreas Herrmann, Andrea Ehrmann 303

TAGESLICHT · DAYLIGHT

Qualitative und quantitative tageslichttechnische Fassadenplanung · Qualitative and quantitative design of facades with complex fenestration systems
Simon Wössner, Eike Budde, Jan de Boer, Daniel Witzel, Marco Seegers 311

Licht über viele Ebenen · Many levels of light
Arne Abromeit, Bernhard Lenz 319

Energetische Bewertung von Gebäuden – Einfluss des Sonnenschutzes · Energy performance of buildings – Impact of sun protection <i>Björn Schrader</i>	327
Praxisbericht über die lichttechnische Planung mit Sonnenschutz- und Tageslichtlenksystemen · Practice report about lighting design with blinds and light guidance systems <i>Simon Wössner, Eike Budde, Jan de Boer, Daniel Witzel, Marco Seegers, Dieter Polle</i>	335
Praktische Anwendbarkeit der spektralen Himmelsmodelle im städtischen Planungsprozess · Practical applicability of spectral sky models in the urban planning process <i>Aicha Diakite, Martine Knoop, Sebastian Bremer, Stephan Völker</i>	343
Tageslichtbeitrag zu einem künstlich beleuchteten Fußballfeld · Daylight contribution to an artificially lit football field <i>Martijn Pakkert, Myriam Aries, Wout van Bommel, Alexander Rosemann</i>	351
Quo vadis DIN 5034 – Die Europäische Tageslichtnorm kommt · Quo vadis DIN 5034 – A European daylight standard becomes reality <i>Wolfgang Cornelius</i>	359
KFZ-BELEUCHTUNG · AUTOMOTIVE LIGHTING	
Simulative Bewertung der indirekten Blendbelastung durch Kfz-Scheinwerfer · Simulative evaluation of the indirect glare exposure caused by headlights <i>Christian Werner, Benedikt Kleinert, Michael Marutzky, Sven Bogdanow</i>	361
Quantifizierung des Blend- und Ablenkpotenzials laserbasierter Scheinwerfersysteme · Quantifying the glare and distraction potential of laser based headlamp systems <i>Melanie Helmer, Cornelius Neumann</i>	369
Remote-Laser-Lichtquelle für das Automobil · Remote-Laser-Light Source in Automotive Lighting <i>Julien Hansen, Stephan Völker</i>	377

**Neue Methode zur Simulation von Volumenstreuung –
Anwendungsfall: Nebel und Regen im Straßenverkehr** · New
method for the simulation of volume scattering – application: fog and
rain in road traffic
Michael Marutzky, Benedikt Kleinert, Sven Bogdanow 385

**Entwicklung eines Versuchstandes zur orts aufgelösten
Leuchtdichtemessung von Fahrradscheinwerfern nach DIN 33958** ·
Development of a test facility to determine the spatially resolved
luminance of bicycle headlight with the LMK in accordance with
DIN 33958
*Ingo Herzog, Oliver Dannberg, Richard Roeder, Benjamin Rudolf,
Alexander Behr, Christoph Schierz* 393

INNENBELEUCHTUNG · INTERIOR LIGHTING

**Auswirkung der thermischen Sanierung der Gebäudehülle auf die
Innenraumbelichtung mit Tageslicht** · Impact of the thermal
renovation of façades on daylight levels in buildings
Roman Jakobiak 399

Der Lighting Retrofit Adviser des IEA-SHC Task 50 · The Lighting
Retrofit Adviser of the IEA-SHC Task 50
*Jan de Boer, Simon Wössner, Marc Fontoynt, Martine Knoop,
Bernard Paule, Jérôme Kaempf, Marie-Claude Dubois* 407

Nutzerzufriedenheit mit LED-Beleuchtung in Schulen · User
satisfaction with LED-lighting in schools
*Edith Holländer, Karin Schakib-Ekbatan, Annette Roser,
Stefanie Löcherer, Tran Qoc Khanh, Max Wagner* 415

Visualisierung von Lichtlösungen · Visualization of lighting solutions
Gregor Gärtner, Paul W. Schmits 423

**Softwaregestützte Lichtgestaltung und Wirtschaftlichkeitsanalyse
eines Beleuchtungssystems am Fallbeispiel Welfenschloss
Herzberg** · Lighting design and efficiency analysis for the lighting
system of the Herzberg castle based on software
Sabrina Hoppstock, Ulrich Fischer-Hirchert 431

Verkaufsbeleuchtung 4.0: Multifunktionales Leuchtenkonzept ·
Retail Lighting 4.0: Multifunctional luminaires
Meike Barfuß, Martin Kirsten 433

MESSTECHNIK · MEASUREMENT TECHNOLOGY

- Applikationsnahe Charakterisierung von Hochleistungs-LEDs für Projektionsanwendungen** · Application-related characterization of high-power LEDs for projection
Benjamin Schulz 441
- Einfluss des spectral mismatch correction factors (smcf) bei der Lichtstrombestimmung** · The influence of spectral mismatch correction factor (smcf) on luminous flux determination
Inca Leopoldo Sayanca, Klaus Trampert, Cornelius Neumann 449
- Entwicklung von Detektoren und Transfernormalen für moderne Lichtquellen** · Development of detectors and transfer standards for modern light sources
Philipp Schneider, Armin Sperling, Thorsten Gerloff, Stefan Pendsa 457
- Rückgeführte Licht- und Strahlungsmesstechnik für gepulst betriebene LED-Systeme** · Traceable light and radiation measurement technology for pulse-powered LED systems
Maissam EL Wardani, Christoph Schierz, Werner Jordan, Ulrich Binder, Walter Steudtner 465
- Streulichtkorrigierte Spektralradiometer in Anwendung** · Stray light corrected spectroradiometers in application
Denan Konjhodzic 475
- Entwicklung von LED-Endoskopen: Transmissionsverhalten von LED-Licht durch Gewebe am Beispiel des Ösophagus** · Development of LED-Endoscopes: Transmission of LED-light through tissue demonstrated at the example of the esophagus
Alexander Gärtner, Paola Belloni 483
- Messen der Beleuchtungsstärke mit dem Smartphone?** · Measuring illuminance via smartphone?
Klaus Bieckmann 491
- BETRIEBSGERÄTE UND LICHTQUELLEN · OPERATING DEVICES AND LIGHT SOURCES**
- Prüfung und faire Bewertung der Überspannungsfestigkeit von LED-Leuchten im Rahmen der Beschaffung** · Test and scoring for overvoltage-protection of LED-luminaires
Gerald Wötzl 499

Entwicklung von hocheffizienten Hochfrequenz-Wechselrichtern mit SiC-Power-Modulen · Development of highly efficient high frequency inverters with silicon carbide power modules <i>Fabian Denk, Karsten Hähre, Rainer Kling, Wolfgang Heering</i>	501
Mehrkanal Spot Light Engine für höchste Lichtqualität · Multi-channel spot light engine for highest light quality <i>Herbert Weiß, Farhang Afshar, Krister Bergenek, Meik Weckbecker</i>	509
Herausforderung beim Austausch von weißen LEDs in einer Applikation · Challenges of replacing white LEDs in existing applications <i>Andreas Steinbach</i>	517
SSL LEDs und die Anwendung der neuesten Spektralwertfunktionen – Die Geburt eines neuen Weißbinning · General Lighting LEDs and the application of the latest color matching functions – Genesis of a new white binning <i>Alexander Wilm, C. Horst, G. Heidel</i>	525
INNENBELEUCHTUNG · INTERIOR LIGHTING	
Beleuchtungssanierung in Krankenhäusern · Lighting renovation in hospitals <i>Stefan Gramm, Roman Jakobiak</i>	533
Methode zur Minimierung des Schädigungspotentials von Tageslicht in der Museumbelichtung · Safe exhibition of artworks with natural light <i>Santiago Mayorga Pinilla, Daniel Vázquez Moliní, Antonio Álvarez Fernández-Balbuena, Paola Belloni</i>	535
Modell zur Optimierung des Schädigungspotentials und der Farbwiedergabe von Kunstlicht in der Museumbelichtung · Mathematical model for optimizing damage and color fidelity in museum illumination <i>Daniel Vázquez Moliní, Antonio Álvarez Fernández-Balbuena, Berta García-Fernández, Paola Belloni</i>	545
LED-Beleuchtung für Mensch und Tier in einem Milchviehstall unter Berücksichtigung der biologischen Wirksamkeit · LED illumination for humans and animals in a dairy barn regarding to biological effectiveness <i>Daniel Werner, Michael Schneider, Maike Müller, Eva Schwenzfeier-Hellkamp, Klaus Reiter</i>	555

BLENDUNG · GLARE

Was ist die effektive Leuchtdichte oder effektive Fläche von strukturierten LED-Leuchten bei der Blendungsbewertung mit UGR? · What is the effective luminance or effective area of non-uniform LED-luminaires in discomfort glare rating with UGR?

Carsten Funke, Christoph Schierz

563

Anwendbarkeit einer spektralen Blendempfindlichkeit zur Bewertung der psychologischen Blendung breitbandiger Stimuli · Applicability of a spectral glare sensitivity to discomfort glare evaluation of broadband stimuli

Mathias Niedling, Stephan Völker

571

Simulation psychologischer Blendung mit Head Mounted Displays

· Discomfort glare simulation with head mounted displays
Roland Greule, Marc Briede, Alexandra Ehrlitzer, Matthias Kuhr, Johannes Schlenger, Nino Wessolowski

579

Bestimmung der Schleierleuchtdichte für periphere Sehobjekte ·

Determination of veiling luminance for peripheral visual objects
Carolin Tatulla, Oliver Maak, Stefan Wolf, Christoph Schierz

587

LICHT UND GESUNDHEIT · LIGHT AND HEALTH

Biodynamische Beleuchtung – Anwendungen und wissenschaftlicher Hintergrund · Biodynamic illumination – applications and scientific background

Wilfried Pohl, Markus Canazei, Katrin Tanzer

595

Spektrale winkel- und polarisationsabhängige Transmissionsgrade von 2-fach Verglasungen und Auswertung deren melanopischer Wirksamkeit · Influence of angle of incidence and polarization on the spectral transmittance of coated double glazings: assessment of the melanopic efficacy

Emiliano Proietti, Franz Feldmeier, Mathias Wambsganß

603

Lichtverhältnisse, Zufriedenheit, Benutzer-Wahrnehmung und Gesundheit in (tages)lichtbelegten Großraumbüros · Light ratios, satisfaction, user perception, and general health in (day)lit office landscapes

Juliette van Duijnhoven, Myriam Aries, Alexander Rosemann, Helianthe Kort

611

Intelligente Wohnraumbeleuchtung: Herausforderungen und Nutzerakzeptanz · Smart lighting for residential applications: challenges and user acceptance
Dennis Köhler, Silke Appelhans 619

Relevanz von Blaulichtgefährdung in TV-Studios und Theatern · Relevance of blue light hazard in TV studios and theaters
Roland Greule, Malte Kummrow, Marc Briede 627

Warum hat man Blauanteil reduzierte Bildschirmenüs? · Why are there blue diminished monitor menus?
Kazim Hilmi Or 635

WAHRNEHMUNG · PERCEPTION

Die Quantifizierung der Lichtrichtung im Büro unter Tageslichtbedingungen · Quantifying the light direction and diffuseness of daylight in offices
Carolin Liedtke, Martin Frauenhofer, Martine Knoop 637

Bedeutung von Lichtrichtung und Schattigkeit für die visuell motorische Leistung · Impact of shadow characteristics on visuomotor performance
Jan Krüger, Christoph Schierz 645

Spektrale Empfindlichkeit für physiologische Blendung im mesopischen Bereich für periphere Detektionsobjekte – experimenteller Aufbau und Methode · Spectral sensitivity for disability glare in the mesopic range for detection objects in the periphery – setup and method
Daniel Englisch, Christoph Schiller, Nils Haferkemper, Tran Quoc Khanh 647

Detektion und Identifikationsuntersuchungen von achromatischen Sehzeichen im mesopischen Bereich · Detection and discrimination investigations for achromatic targets in mesopic range
Katharina Schneider, Nils Haferkemper, Tran Quoc Khanh 655

MESSTECHNIK · MEASUREMENT TECHNOLOGY

Rückgeführte goniospektrometrische Kalibrierung der spektralen Gesamtstrahlungsleistung von LEDs · Traceable goniospectroradiometric calibration of the total spectral radiant flux of LEDs
Thorsten Gerloff, Matthias Lindemann, Armin Sperling 663

Bestimmung von winkel- und orts aufgelösten spektralen Rayfiles · Towards spatial and angular resolved spectral rayfiles
Ingo Rotscholl, Klaus Trampert, Udo Krüger, Martin Perner, Inca Leopoldo Sayanca, Franz Schmidt, Cornelius Neumann 671

Das Beste aus zwei Welten – Kombination von Goniophotometrie und digitaler Bildverarbeitung · The best of two worlds – Combining goniophotometry and digital image processing
Christian Schwanengel, Thomas Reiners, Franz Schmidt, Carsten Diem 679

Die neue DIN EN 13032-4 zur Messung von Lampen und Leuchten – Praktische Anwendung im Lichtlabor · The new standard DIN EN 13032-4 for the measurement of lamps and luminaires – Implementation in lab practice
Juergen Weisshaar 681

LICHT UND GESUNDHEIT · LIGHT AND HEALTH

Erfahrungen aus zwei Jahren Betrieb einer biologisch wirksamen Lichtlösung in einem Produktionsgebäude · Operation and maintenance of a circadian lighting solution for a manufacturing plant – lessons learned after two years
Johannes Zauner, Mathias Wambsganß 689

Untersuchung der Auswirkung von personalisierten dynamischen Lichtszenarien auf dem Schreibtisch und auf dem Auge – Eine Feldstudie · Investigating the effect of personalized dynamic light scenarios on the desk and on the eye – A field study
Yvonne de Kort, Karin Smolders, Renske de Bruijn 697

Licht und Bildung – Nicht-visuelle Effekte auf die akademische Leistung · Light and education – Non-visual effects on academic performance
Philipp Novotny, Herbert Plischke 699

Circadiane Beleuchtung – Planungspraxis auf Basis der aktuellen Regelwerke und Planungsempfehlungen · Circadian lighting – Planning practice based on current standards and design guidelines
Matthias Boeser 707

FARBE · COLOUR

Ansätze zur Optimierung des Binnings weißer LEDs? · Approaches to optimize the binning of white LEDs?
Karin Bieske, Johannes Michl, Nicole Stubenrauch, Christoph Schierz, Anja Frohnafel, Alexander Wilm 709

Weiß? Minimierung der sichtbaren Farbtönigkeit bei verschiedenen Lichtfarben und Adaptationszuständen · White? Stabilisation of visible colour consistency for different light colours and adaptations
Birthe Tralau, Christoph Schierz 717

Wahrnehmungsunterschiede zwischen Licht- und Körperfarben · Differences in perception of light and body colors
David Ruland 725

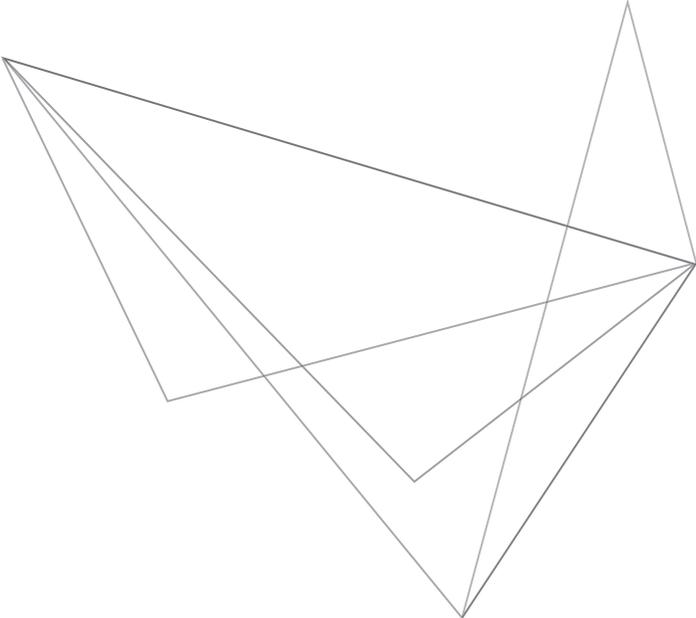
Gedächtnisfarben Teil I: Vergleich chinesischer und deutscher Probanden · Memory Colours Part I: Comparison of Chinese and German observers
Sebastian Fischer, Peter Bodrogi, Tran Quoc Khanh, Yuteng Zhu, Lihao Xu, Xiaoyu Liu, Guihua Cui, and M. Ronnier Luo 727

Variation von Spektralwertfunktionen für unterschiedliche Probanden und Lichtsituationen · Variation of the color matching functions for different subjects and lighting situations
Nicole Stubenrauch, Christoph Schierz 739

Veränderung des wahrgenommenen Lichtspektrums durch farbige Raumumschließungsflächen · Change of the perceived light spectrum by coloured room enclosure surfaces
Christina Königl, Mathias Wambsganß 747

TAGUNGSBEITRÄGE

CONFERENCE CONTRIBUTIONS



Raumwahrnehmung bei verschiedenen Leuchtdichteverteilungen im Büro

Dr. Raphael Kirsch, TRILUX GmbH & Co. KG

Problemstellung und Forschungsfragen

Licht beeinflusst Wohlbefinden am Arbeitsplatz über eine Reihe psychologischer Prozesse. Durch die vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten mit LED-Leuchten können Leuchtdichteverteilungen auf Raum und Nutzer zugeschnitten werden. Es ist daher notwendig, Leuchtdichteverteilungen und ihre Wirkung auf den Menschen genauer zu beschreiben. Daher ergeben sich folgende Forschungsfragen: Gibt es einen Einfluss der Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld auf die Wahrnehmung und Bewertung eines Büroarbeitsplatzes? Welche Leuchtdichteverteilungen führen dabei zu einer besseren/schlechteren Bewertung?

Stand der Wissenschaft/Technik

Der aktuelle Stand der Forschung beschreibt, dass die Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld die Bewertung der Raumwahrnehmung beeinflusst. Ergebnisse zu Richtung, Effektstärke und optimaler Verteilung sind jedoch inkonsistent.

Forschungshypothese

Schreibtischleuchtdichte und Verteilung der Hintergrundleuchtdichte beeinflussen die subjektive Raumwahrnehmung

Versuchsaufbau

Der Probandenversuch wurde im Bürolichtsimulator am FG Lichttechnik der TU Berlin durchgeführt. Unabhängige Variablen: 2 Schreibtischleuchtdichten, 6 leuchtdichtegleiche Hintergrundleuchtdichteverteilungen (2x6 Design mit Messwiederholung). Abhängige Variable: ‚room appearance judgement‘ Fragebogen von J. Veitch.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Die Bewertungen zeigten keinen signifikanten Effekt der Schreibtischleuchtdichte, aber eine signifikante Abhängigkeit von der Leuchtdichteverteilung. Das Raumerscheinungsbild wurde bei gleichmäßigerer Verteilung positiver bewertet. Maßgebliche Faktoren waren Kohärenz und Verständlichkeit des Raumes in Übereinstimmung mit Kaplans ‚Szenenkohärenz‘ und weiterer Forschung. Die Ergebnisse stehen scheinbar im Gegensatz zu anderen Ergebnissen, wo größere Ungleichmäßigkeit als attraktiver und heller bewertet wurde. Eine Erklärung liegt in der Betrachtungsweise der Probanden: Werden Kontrast oder Leuchtdichtemaxima bewertet, so erscheint der Raum bei ungleichmäßiger Leuchtdichte heller und attraktiver. Sind die Kontraste jedoch so stark, dass ein Teil des Raumes visuell ‚abgeschnitten‘ wird, so werden ggf. im Dunklen liegende Flächen stärker einbezogen, die Ergebnisse kehren sich um. Letzteres könnte im vorliegenden Versuch passiert sein, in dem bei den am schlechtesten bewerteten Szenen ein Teil des Raumes im Dunklen lag.

Visual appearance under different luminance distributions

Dr. Raphael Kirsch, TRILUX GmbH & Co. KG

Research issue

Lighting influences wellbeing at the workplace using a number of psychological processes. Current technological developments offer new design scopes and enable lighting designers to precisely adapt lighting and luminance distributions to spaces and users. Thus, an accurate description of the influence of luminance distributions on human perception is needed. Two research questions are investigated in this work: Is there an influence of the luminance distribution in the visual field on the visual appearance of an office workplace? Which distributions will lead to a better/worse appraisal?

State of science/technology

Current research describes an influence of the luminance distribution in the visual field on visual appearance. However, results on direction of the impact, effect sizes and ideal distributions are inconsistent.

Research hypothesis

Desktop luminance and background luminance distribution influence the appraisal of visual appearance.

Experimental setup

The experiment was conducted in the office lighting simulator at TU Berlin. Independent variables: 2 desktop luminances, 6 background luminance distributions at constant average luminance (2x6 repeated measures design). Dependent variable: 'room appearance judgement' by J. Veitch.

Results in comparison with previous findings

No significant effect could be found for the desktop luminance. However, there was a significant main effect of luminance distribution. Visual appearance was rated higher for more uniform distributions. Determining factors were coherence and legibility of the space in accordance with Kaplan's "coherence of a scene" and some other studies. The results seem to contradict other research where higher contrasts were perceived as brighter and more attractive. An explanation could be the participants' approach to the ratings: If contrast and maximum luminance represent the determining appraisal factor, a non-uniform space is perceived as brighter and more attractive. However, if contrasts are further increased to a level where a part of the space is visually "cut off", the resulting darker surfaces are taken into account increasingly. Thus, results may be reversed. This may have happened in this experiment. In the scenes with the lowest rating, a whole part of the space was dark and visually cut off.

Raumwahrnehmung bei verschiedenen Leuchtdichteverteilungen im Büro

Dr. Raphael Kirsch

TRILUX GmbH & Co. KG, Heidestr. 4, 59759 Arnsberg

Summary

This work investigates the effect of desktop luminance and background luminance distribution on visual appearance in a cell office. Participants filled in a “room appearance judgement” questionnaire for different luminance distributions with constant average luminance in a 40° horizontal band. A principal component analysis resulted in two components, visual lightness and visual attractiveness. There was no measurable effect of desktop luminance on visual appearance. Visual lightness and visual appearance responses correlated significantly on the maximum to minimum luminance ratio in the 40° horizontal band. Scenes with a higher luminance-coherence throughout the space were rated better than lighting focused on one part of the space only. The experimental results should further encourage lighting designers to consider luminance distributions in their designs.

Keywords: Lichtqualität, Raumwahrnehmung, Leuchtdichteverteilung, Bürobeleuchtung

1 Einleitung

Über verschiedene zugrundeliegende psychologische Prozesse (Veitch, 2001) können Wohlbefinden, die Zufriedenheit am Arbeitsplatz und die subjektive Qualität der Arbeitsumgebung direkt durch die Lichtverhältnisse am Arbeitsplatz beeinflusst werden. Forschungsergebnisse zeigen unter anderem einen Einfluss der Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld auf die Wahrnehmung und das Erscheinungsbild eines Raumes (Tiller & Veitch, 1995), (Loe, Mansfield, & Rowlands, 1994). Durch die Verwendung von LED ergeben sich erweiterte technische Möglichkeiten im Bereich der Lichtlenkung, die einen höheren Anpassungsgrad der Lichtverteilung an die spezifische Beleuchtungsaufgabe ermöglichen. Nur über eine genauere Bestimmung des Einflusses der Leuchtdichteverteilung im Raum auf die visuelle Qualität von Arbeitsplätzen können diese Möglichkeiten optimal und im Sinne des Nutzers angewandt werden. Die Auswirkung verschiedener Hintergrundleuchtdichteverteilungen auf das Erscheinungsbild des Raumes werden in diesem Artikel hinsichtlich der Anwendung in Büros mit Einzel- und Doppelarbeitsplätzen untersucht.

2 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden im Bürobeleuchtungssimulator an der Technischen Universität Berlin durchgeführt. Der Simulator wurde in den Dimensionen 4m x 5m x 2,8m (Länge x Breite x Höhe) in Anlehnung an ein typisches Dreiachsbüro (vgl. AMEV, 2011) mit Doppelarbeitsplatz ausgelegt. Beleuchtungsstärken im Bereich der Sehaufgabe und im Umgebungsbereich, Wand- und Deckenleuchtdichten sowie deren Verteilungen konnten über verschiedene optische Systeme unabhängig voneinander eingestellt und austariert werden, um eine genaue Trennung von unabhängiger Forschungsvariablen zu ermöglichen.

Über eine austauschbare Schreibtischoberfläche konnten bei ansonsten gleichbleibenden lichttechnischen Parametern verschiedene Schreibtischleuchtdichten eingestellt werden. Eine genaue Beschreibung des Simulators findet sich in (Kirsch & Völker, 2013).

3 Methodik

Folgende Hypothesen wurden im Probandenversuch getestet:

- Die Verteilung der Hintergrundleuchtdichte beeinflusst die Raumwahrnehmung
- Die Schreibtischleuchtdichte beeinflusst die Raumwahrnehmung

3.1 Versuchsdesign und unabhängige Variablen

Das Experiment wurde als 2 x 6 -Design mit Messwiederholung durchgeführt. Dabei wurde die Schreibtischleuchtdichte in zwei Stufen variiert und sechs verschiedene Leuchtdichteverteilungen an Wänden und Decke präsentiert. Die mittlere Schreibtischleuchtdichte wurde zwischen 60 cd/m^2 , was einer präferierte Schreibtischleuchtdichte in (Veitch & Newsham, 2000) entspricht, und einem helleren Schreibtisch mit 95 cd/m^2 variiert.

Die sechs Wand- und Deckenleuchtdichteverteilungen waren leuchtdichtegleich in einem horizontalen 40° Band, wie von Loe (1994) beschrieben (40 cd/m^2 für den dunkleren, 50 cd/m^2 für den helleren Schreibtisch). Eine Variation fand also nur in der Verteilung der Leuchtdichte statt. Die Verteilungen wurden so ausgewählt, dass eine große Bandbreite von diffusem wall-washing bis hin zu sehr ungleichmäßigen Leuchtdichteverteilungen mit scharfen Helligkeitskontrasten abgedeckt wurde. Diese ungleichmäßigen Verteilungen wurden jeweils auf zwei verschiedene Arten dargestellt. In der ersten Variante wurde der Lichtschwerpunkt in den Bereich der Beobachterposition gelegt, in der zweiten in die Tiefe des Raumes. Bezeichnungen und qualitative Verläufe der Leuchtdichte auf der Wand können Abb. 1 entnommen werden.

Bei allen präsentierten Lichtszenen wurde eine konstante mittlere Beleuchtungsstärke im Arbeitsbereich von 500 Lux beibehalten. Der horizontale Umgebungsbereich hatte eine konstante mittlere Beleuchtungsstärke von 100 Lux .

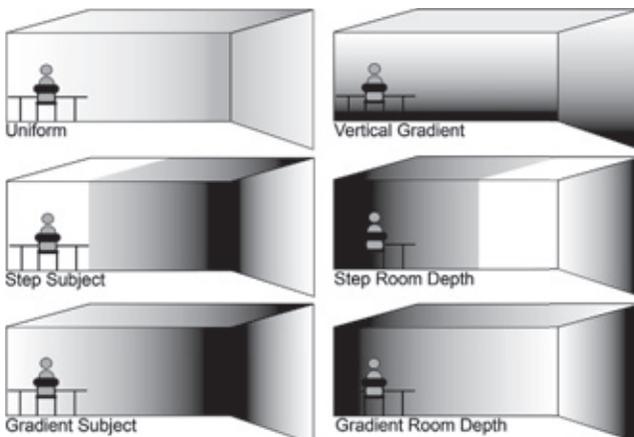


Abb. 1: Bezeichnung und Beschreibung der Leuchtdichteverteilungen

3.2 Abhängige Variable

Um die Raumwahrnehmung in Anhängigkeit der Beleuchtungsparameter zu evaluieren wurde eine deutsche Übersetzung des "room appearance judgement" Fragebogens (Veitch, Newsham, Mancini, & Arsenault, 2010) verwendet. Der ins Deutsche übersetzte Fragebogen wurde mittels Hauptkomponentenanalyse bei einer Stichprobengröße von >100 aus mehreren Experimenten auf zwei Komponenten reduziert, über die die Raumwahrnehmung beschrieben werden kann: visuelle Attraktivität und visuelle Helligkeit. Die visuelle Helligkeit beschreibt dabei nicht einen Helligkeitseindruck einer oder mehrerer Flächen, sondern beinhaltet die empfundene Helligkeit im Kontext von Raum, Materialien und Nutzung (engl.: visual *lightness* im Gegensatz zu *brightness* (vgl. IES, 2011)). Die beiden gefundenen Komponenten stimmen mit den Ergebnissen in englischer Sprache überein. Der übergeordnete Begriff „Raumwahrnehmung“ umfasst deutlich mehr Dimensionen als die beiden verwendeten Komponenten. Die visuelle Attraktivität und Helligkeit mit der ein Raum oder eine Szene bewertet werden sind jedoch wichtige Faktoren, um die subjektive Bewertung von Beleuchtung zu beschreiben und werden daher in dieser Arbeit als Raumwahrnehmung bezeichnet.

3.3 Versuchsteilnehmer

Um bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$ eine statistische Power von $1-\beta \geq 0,95$ und damit valide Ergebnisse zu erhalten wurde eine Mindeststichprobengröße von 30 Teilnehmern ermittelt (Faul, Erdfelder, Lang, & Buchner, 2007). Die tatsächlich gewählte Stichprobengröße umfasste 34 Teilnehmer (Tab. 1).

Tab. 1: Probandenstruktur

Alter		
Range	20-42 Jahre	
Mittelwert	26,79 Jahre	
Median	25 Jahre	
SD	5,72 Jahre	
	n	%
Geschlecht		
f	16	47
m	18	53

4 Ergebnisse

Eine multivariate Varianzanalyse (MANOVA) zeigte keine signifikanten Haupt- oder Interaktionseffekte der Schreibtischleuchtdichte bezüglich der Raumwahrnehmung. Es gab jedoch einen signifikanten Haupteffekt der Leuchtdichteverteilung. Beide Komponenten, visuelle Attraktivität und Helligkeit, wurden durch Veränderung der Leuchtdichteverteilung auf Wänden und Decke beeinflusst, obwohl die mittlere Leuchtdichte in einem 40 ° horizontal Band konstant gehalten wurde. Eine einfache Pearson Korrelationsmatrix zeigte, wie aus den Ergebnissen der MANOVA zu erwarten, keinerlei Korrelation der Helligkeits- oder Attraktivitätsbewertung mit der gemessenen mittleren Leuchtdichte im Gesichtsfeld – trotz der deutlichen Leuchtdichteänderungen durch die verschiedenen Tischbeläge. Eine nachfolgende Kontrastanalyse (nicht-orthogonale „simple contrasts“) zeigte, dass bei den deutlich ungleichmäßigen Leuchtdichteverteilungen, die auf den Arbeitsbereich konzentriert waren („step subject“ und „gradient subject“) die Komponenten Attraktivität und Helligkeit signifikant schlechter bewertet wurden, als bei gleichmäßigen oder auf die Raumtiefe fokussierten Verteilungen. Insgesamt erzielte die gleichmäßige Verteilung („uniform“) der höchsten Bewertung in beiden Bewertungskriterien. Im Vergleich zu den Verteilungen mit der niedrigsten Bewertung („step subject“ und „gradient subject“) konnten hier mit Cohen´s $d=1,6$ für die Helligkeitsbewertung und $d=1,3$ für die visuelle Attraktivität große Effektstärken gemessen werden.

Die Bewertungsmuster der einzelnen Lichtszenen zeigten eine hohe Korrelation mit dem Verhältnis von maximaler zur minimaler Leuchtdichte im beschriebenen 40°-Band. Dabei führte eine höhere Gleichmäßigkeit zu besseren Bewertungen. Mithilfe eines hierarchischen linearen Modells wurden Parameterabschätzungen der Bewertungen an den einzelnen Stützstellen berechnet. Ein anschließendes Kurvenanpassungsverfahren zeigte, dass Bewertungen von Helligkeit und Attraktivität mit hohen Determinationskoeffizienten ($R^2=0,75-0,85$) durch einer Potenzfunktion des Verhältnisses von maximaler zu minimaler Leuchtdichte angenähert werden können. Eine zusätzliche grafische Evaluation der Daten in Verbindung mit einer visuellen Beurteilung der gezeigten Szenen zeigten darüber hinaus auch eine Abhängigkeit von der Kohärenz der vertikalen Leuchtdichten entlang der horizontalen Ausdehnung des Gesichtsfeldes.

5 Diskussion

Obwohl die Schreibtischleuchtdichte einen nicht unerheblichen Teil des Gesichtsfeld ausfüllte (~15%) und dadurch einen Einfluss auf die mittlere Leuchtdichte im Gesichtsfeld hatte, konnte im Rahmen des Experiments kein signifikanter Effekt auf die visuelle Helligkeit oder Attraktivität des Raumes festgestellt werden. In diesem Fall war also insbesondere die Helligkeitsbewertung des Raumes von der mittleren Leuchtdichte entkoppelt, was durch Korrelationsberechnungen bestätigt wurde. Dass sich trotzdem signifikante Unterschiede in der Bewertung ergaben zeigt, dass die mittlere Leuchtdichte allein als Kriterium für die Helligkeits- und Attraktivitätsbewertung eines Raumes nicht ausreicht. Während die Bewertung der visuellen Attraktivität naturgemäß eine affektive Beurteilung einer Szene enthält, geht auch das Konzept der visuellen Helligkeit über ein einfaches Reiz-Antwort-System hinaus. Die mittlere Leuchtdichte im Gesichtsfeld spielt sicherlich eine wichtige Rolle bei der Helligkeitsbewertung. Trotzdem kann beispielsweise Kaplans psychologisches Konzept der Kohärenz einer Szene (vgl. Kaplan, 1987 zusammen mit den anderen

dort beschriebenen Dimensionen "Komplexität" und "Mystery") weitere wichtige Erklärungen zu den hier ermittelten Bewertungsmustern liefern. Die diffus-gleichmäßige Leuchtdichteverteilung („uniform“) stellte selbstverständlich die kohärenteste der dargestellten Szenen dar und erhielt somit auch die besten Bewertungen.

Die Verteilungen „gradient subject“ und „gradient room depth“ zeigten eine ähnliche Leuchtdichte- und somit Helligkeitsverteilung und Gleichmäßigkeit, wenn nur Wände und Decke betrachtet wurden. Unter Berücksichtigung des gesamten Gesichtsfeldes oder des 40°-Bandes variierte der Lichtschwerpunkt und damit die Kohärenz der Beleuchtung jedoch wesentlich. Die „gradient subject“ Verteilung fokussiert Licht fast ausschließlich auf den Arbeitsbereich, den unmittelbaren Hintergrundbereich und damit auf die Beobachterposition, während die Raumtiefe sehr dunkel blieb. Visuell wird hier ein Teil des Raumes abgeschnitten und somit losgelöst vom restlichen Raum gewertet. Die „gradient room depth“ Verteilung zeigte dem Teilnehmer im Gegensatz dazu eine Wand in Hauptblickrichtung, die ihren Lichtschwerpunkt in der Raumtiefe hatte. Da sich durch den beleuchteten Schreibtisch noch ein helles Element in der Nähe der optischen Achse befand, war so der horizontale Gesamtverlauf der Leuchtdichte deutlich gleichmäßiger, kohärenter. Raumtiefe und Arbeitsbereich „hängen [visuell] zusammen“ (Kaplan, 1987, p. 9) und erzielten daher bessere Bewertungen. Ähnliche Beobachtungen ergeben sich für die „step subject“ und „step room depth“ Verteilungen. Somit erzielten die jeweils annähernd gespiegelten Verteilungen auf Wand deutlich unterschiedliche Stufen der Helligkeits-Kohärenz im Sichtfeld der Teilnehmer und somit signifikant unterschiedliche Bewertungen.

Vergleicht man die Ergebnisse dieser Studie mit anderer Forschung, so scheint sich zunächst ein Widerspruch zu ergeben. Während in einigen Experimenten eine ungleichmäßige Beleuchtung als heller (Tiller & Veitch, 1995) und attraktiver (Bean & Hopkins, 1980) wahrgenommen wurde, ergeben sich aus dieser Arbeit zunächst gegenteilige Ergebnisse, wie sie mit Einschränkungen auch von Moore et al. (2003) beschrieben wurden. Eine Erklärung dafür könnte in der Frage liegen, welche Bereiche der Beleuchtung die Versuchsteilnehmer für ihre Bewertung nutzen (Tiller, Veitch, & Pasins, 1995). Bei einer ungleichmäßigen Leuchtdichteverteilung sind die dunklen Bereiche dunkler, die hellen Bereiche heller als dies bei einer gleichmäßigen Beleuchtung der Fall ist. Bei einer Akzentbeleuchtung erscheint die Beleuchtung durch die höheren Kontraste meist heller, es werden also die hellen Bereiche bewertet. In der vorliegenden Studie waren aber ganze Bereiche des Raums sehr schwach beleuchtet. Eine Eigenständigkeit des dunklen, abgeschnittenen Bereiches und damit eine zusätzliche Bewertung der dunkleren Flächen ist hier wahrscheinlich und könnte die vorliegenden Ergebnisse plausibel erklären.

Für die Anwendung in der Bürobeleuchtung sollte die Kohärenz als Stilmittel in Lichtkonzepten berücksichtigt werden. Eine abwechslungsreiche Akzentbeleuchtung hilft eine Szene interessant und attraktiv erscheinen zu lassen (vgl. Loe et al., 1994) und verleiht dem Raum Komplexität. Ein ausgewogenes Verhältnis aus Bereichszonierung, die dem besseren Verständnis des Gesehenen dient und einer durch Beleuchtung unterstützten Kohärenz des Raumes bedient die verschiedenen in dieser Arbeit betrachteten Dimensionen der Raumwahrnehmung und führt zu einem hellen, attraktiven Raumeindruck.

Literatur

- AMEV. (2011). *Hinweise für die Innenraumbeleuchtung mit künstlichem Licht in öffentlichen Gebäuden (Beleuchtung 2011)*. Berlin, D: Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV).
- Bean, A. R., & Hopkins, A. G. (1980). Task and background lighting. *Lighting Research and Technology*, 12(3), 135–139.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 175–191.
- IES. (2011). *The Lighting Handbook*. (D. L. Dilaura, K. W. Houser, R. G. Mistrick, & G. R. Steffy, Eds.) (10th ed.). New York, USA: Illuminating Engineering Society of North America.
- Kaplan, S. (1987). Aesthetics, Affect, and Cognition: Environmental Preference from an Evolutionary Perspective. *Environment and Behavior*, 19(1), 3–32.
- Kirsch, R., & Völker, S. (2013). Neukonzipierter Lichtsimulator im Fachgebiet Lichttechnik an der Technischen Universität Berlin. *Licht*, 65(5), 68–70.
- 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), 119–133.
- Moore, T., Carter, D. J., & Slater, A. I. (2003). A qualitative study of occupant controlled office lighting. *Lighting Research and Technology*, 35(4), 297–314.
- Tiller, D. K., & Veitch, J. A. (1995). Perceived room brightness: Pilot study on the effect of luminance distribution. *Lighting Research and Technology*, 27(2), 93–101.
- Tiller, D. K., Veitch, J. A., & Pasins, I. C. (1995). The Effects of Luminance Distribution on Perceived Room Brightness. In *Proceedings of the CIE 23rd Session, Neu Dehli* (pp. 144–147). Vienna, Austria: CIE.
- Veitch, J. A. (2001). Psychological processes influencing lighting quality. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 30(1), 124–140.
- Veitch, J. A., Newsham, G. R., Mancini, S., & Arsenault, C. D. (2010). *Lighting and office renovation effects on employee and organizational well-being (NRC-IRC RR-306)*. Ottawa, ON.
- Veitch, J., & Newsham, G. (2000). Preferred luminous conditions in open-plan offices: research and practice recommendations. *Lighting Research and Technology*, 32(4), 199–212.

Licht und Kooperation: Einfluss der Beleuchtung auf prosoziales Verhalten

Olga Kombeiz, Anna Steidle, Erik Dietl, Universität Hohenheim

Problemstellung und Forschungsfragen

In der vorliegenden Studie wurde der Einfluss des Lichts auf prosoziales Verhalten untersucht. Das Ziel der Studie war aufzuklären, ob Kooperation und prosoziales Verhalten von verschiedenen visuellen Botschaften in Räumen (Boyce, 2003, 2014) oder durch den positiven Affekt begünstigt werden, den eine angenehme Umgebung induziert (Baron, 1990).

Stand der Wissenschaft/Technik

Frühere Studien haben gezeigt, dass das gedimmte Licht die Kooperation fördert (Steidle, Hanke, & Werth, 2013) und dass Personen einen kooperativen Konfliktstil im warmen Licht präferieren (Baron et al., 1992). Andere Studien zeigen Unterschiede in der sozialen Wahrnehmung aufgrund unterschiedlicher Lichtbedingungen. So schrieben Probanden im gedimmten Licht einer fiktiven Person mehr positive Eigenschaften zu als im hellen Licht (Baron et al., 1992). Auf der anderen Seite zeigt eine Reihe von Studien (Veitch et al, 2008; 2013), dass nur die subjektive Präferenz bestimmter Lichtbedingungen positiven Affekt hervorruft und zu unterschiedlichen positiven Outcomes wie Leistung und Wohlbefinden führt.

Forschungshypothesen

Wir nahmen an, dass die Lichtbedingungen, die eine visuelle Botschaft der sozialen Wärme beinhalten, Kooperation und prosoziales Verhalten fördern, beispielsweise Hilfeverhalten. Darüber hinaus haben wir getestet, ob Lichtverhältnisse, die (subjektiv) als angenehm empfunden werden, einen kooperationsförderlichen positiven Affekt hervorrufen.

Versuchsaufbau

In zwei Laborexperimenten (N = 86, N = 160) wurden verschiedene Beleuchtungsbedingungen erzeugt, in denen die Helligkeit (150 lx vs. 1500 lx), die Farbtemperatur (5500 K vs. 2500 K) oder die Farbe des Lichts (rot vs. blau und weiß) manipuliert wurden.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Wie erwartet zeigten die Lichtbedingungen, die eine visuelle Botschaft der sozialen Wärme übertragen haben, einen positiven Effekt auf die Kooperation und prosoziales Verhalten. Die theoretische Annahme des durch die Umwelt induzierten positiven Affekts und dadurch entstandenes prosozialen Verhaltens konnte teilweise bestätigt werden. Der theoretische Mehrwert, Einschränkungen sowie praktische Implikationen werden diskutiert.

Light and cooperation: Impact of illumination on prosocial behavior

Olga Kombeiz, Anna Steidle, Erik Dietl, University of Hohenheim

Research issue

In the present study, we investigated the impact of light on prosocial behavior. We aimed at clarifying whether cooperation and prosocial behavior are promoted by different visual messages in rooms (Boyce, 2003, 2014) or by environmentally induced positive affect (Baron, 1990).

State of science/technology

Previous studies have shown that dim light promotes cooperation (Steidle, Hanke, & Werth, 2013) and that individuals prefer a collaborative conflict style in warm (compared to cold) light (Baron et al., 1992). Other studies indicate differences in social perception depending on light: Baron et al. (1992) found more attributions of positive characteristics for the same fictitious person in dim than in bright light. On the other hand, a series of studies (Veitch et al., 2008; 2013) showed that only the subjective preference of certain lighting conditions is linked to positive affect and leads to different (performance) outcomes.

Research hypothesis

We propose that lighting conditions that trigger a visual message of social warmth promote cooperation and elicit prosocial behavior such as readiness to help. Additionally, we tested whether lighting conditions that are (subjectively) experienced as pleasant serve as a positive affective cue for social interactions.

Experimental setup

We conducted two laboratory experiments (N=86, N=160) with different lighting conditions, where brightness (150 lx vs. 1500 lx), color temperature (5500 K vs. 2500 K), or color of light (red vs. blue and white) were manipulated.

Results in comparison with previous findings

As expected, lighting conditions that convey a visual message of socially beneficial light promoted cooperation and elicited prosocial behavior. The theoretical perspective of environmentally induced positive affect and therefore more prosocial behaviour could be partly supported. The theoretical value, limitations, and practical implications will be discussed.

Light and cooperation: Impact of illumination on prosocial behavior

*Olga Kombeiz, Anna Steidle, Erik Dietl
Business and Organizational Psychology, University of Hohenheim
Wollgrasweg 49, 70599 Stuttgart*

Summary

Can light impact cooperation? In the present research we aimed at clarifying whether cooperation and prosocial behavior are triggered by the atmospheric qualities of certain lighting conditions. In two studies, lighting conditions were manipulated in terms of illuminance (150 lx vs. 1500 lx), color temperature (5500 K vs. 2500 K), or color of light (red vs. blue and white). We proposed that lighting conditions that create a socially inviting atmosphere promote different kinds of prosocial behaviors, such as successful integrative negotiation and readiness to help. The results mainly confirmed our ideas. The theoretical value, limitations, and practical implications will be discussed.

1 Theoretical perspectives for lighting effects on prosocial behavior

Environmental psychology research suggests that environmental features, such as light (e.g., Baron et al., 1992; Knez, 1995; Steidle et al., 2013) and room temperature (e.g., Gockel et al., 2014), can influence social perception and behavior. However, up until now, it is still not clear what type of lighting is optimal for interpersonal processes, particularly integrative negotiations and helping behavior.

Previous theoretical considerations and empirical findings indicate that light may impact social behavior in two ways. On the one hand, light may send a visual message (Boyce, 2014) of social warmth by creating a cozy and freeing room atmosphere (Kuijsters et al., 2015; Vogels et al., 2008). Such an atmosphere should facilitate social proximity and invite cooperation. This idea suggests that lighting effects happen automatically without actually changing an individual's emotional state (Friedman & Förster, 2011). A cozy room atmosphere can be created by employing dim warm light or red colored light (Kuijsters et al., 2015). This idea is supported by a study (Takahashi, 2009) that showed higher scores of perceived friendliness and positivity of conversation partners in red (vs. white) light.

On the other hand, light may induce positive affect, which in turn leads to more prosocial or cooperative behavior (Baron et al., 1992). This theoretical perspective of environmentally induced positive affect was partly supported by Baron et al. (1992), but not replicated by Boyce et al. (2003). Kruthof's work (1941) can be referred to for suggestions on how generally pleasant lighting may induce positive affect. Of particular interest is the proposal that special combinations of color temperature and illuminance levels are generally pleasant. Such pleasant conditions include dim warm and bright cold light.

1.1 Indicators of prosocial behavior

We focused on actual behavior as objective signs of prosocial behavior. One indicator is observed helping behavior (Johnson & Lord, 2010), as it shows spontaneous prosocial

behavior toward others. Another indicator is successful integrative negotiation (Carnevale & ISEN, 1986), which results in joint benefits. Achievement of high joint benefits indicates high cooperation of negotiation partners.

1.2 Overview of the present research

Building on previous research, we propose that dim warm light (Study 1) and red colored light (Study 2) trigger an automatic visual message of socially beneficial light and promote different types of cooperation: readiness to help (Study 1) and successful integrative negotiation (Study 2). Additionally, we directly tested the notion of environmentally induced positive affect, that positive feelings mediate the effect of pleasant lighting conditions on pro-social behavior.

To increase statistical power, all analyses were performed using one-tailed tests since hypotheses were predicted a priori.

2 Study 1: Light and helping behavior

In Study 1, we investigated the effect of light on helping behavior. Participants ($N = 160$) were randomly assigned to one of the four lighting conditions: bright cold (1500 lx, 5500 K), bright warm (1500 lx, 2500 K), dim cold (150 lx, 5500 K) and dim warm light (150 lx, 2500 K).

The measure of helping behavior was based on Johnson & Lord's (2010) method. At the end of the experiment, participants came to the experimenter who as if accidentally dropped four pencils that were lying on the table, waited for 2 seconds and then began picking up the pencils. The number of pencils that participants picked up served as a measure of helping behavior. As we have up to two participants at once, the sum of picked up pencils at a session was the indicator of helping behavior including control for number of participants at a session in further analyses ($N = 104$).

As expected, the results revealed higher helping behavior in both, as defined by Kruithof "generally pleasant" lighting conditions, dim warm and bright cold light ($F(1, 101) = 3.78$, $p = .02$, $\eta^2 = .04$) and in dim warm light versus other lighting conditions ($F(1, 101) = 2.81$, $p = .04$, $\eta^2 = .03$), see Figure 1.

Thus, the results partly support both theoretical perspectives: a visual message of social warmth and environmentally induced positive affect. Both pleasant conditions (dim warm and bright cold light) promoted helping behavior, which indicates that positive affect may play an important role. In addition, the inclination to help was strongest in dim warm light, which should create a cozy, socially inviting atmosphere.

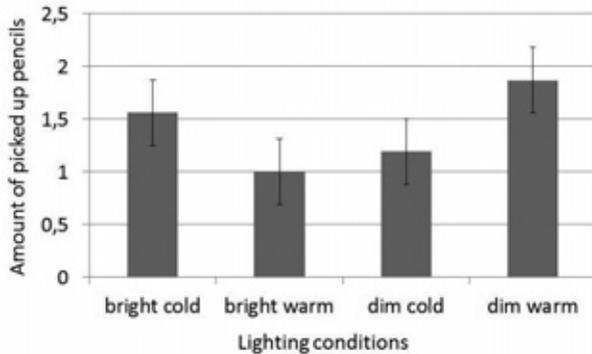


Fig. 1: Helping behavior in four lighting conditions.

3 Study 2: Colored light and integrative negotiations

In previous research, red light has been shown to lead to friendly interpretations of conversations (Takahashi, 2009). Based on the idea that red colored light sends a visual message of social warmth, we suggested that red light compared to blue and white light would promote integrative solutions in face-to-face negotiations. In a laboratory study, we used a scenario that described a discussion between a mountain climber (role 1) and a financial investor for a mountain expedition (role 2). The two negotiators had several different goals (e.g., the date of departure), each awarded with a number of points. The participants were instructed to obtain together as many points as possible. Participants (43 dyads in total) were randomly assigned to one of two roles. The successful negotiation was measured by points achieved together by a dyad.

As expected, in red colored light, participants achieved more points in integrative negotiation than in the other two conditions ($T(41) = 1.95, p = .03, d = .60$; see Table 1 for mean values). The effect of colored light on mood and satisfaction with the lighting were not significant and did not relate to the amount of points achieved in negotiation. Hence, the reported effects cannot be attributed to differences in mood or satisfaction with the lighting conditions.

Overall, these results are consistent with the idea that light promotes prosocial behavior if it sends a message of social warmth, but not with the idea that pleasant lighting conditions improve individuals' mood and, in turn, their behavior.

Tab. 1: Color of light and achieved points in integrative negotiation

Color of light	<i>N</i> (dyads)	mean	<i>SD</i>
red	17	13585.88	1968.73
blue	17	12523.53	1632.90
white	9	12276.67	2267.39

4 Summary

The current research investigated different lighting conditions that convey a visual message of social warmth and promote cooperation in integrative negotiation and elicit helping behavior. Two experiments revealed that red colored light as well as dim warm light may elicit cooperation and generally pleasant lighting may lead to higher helping behavior. The present research has several practical implications. Dim warm or red colored light could be implemented in rooms where cooperation is important (e.g., meeting rooms) to contribute to cooperative discussions and to heighten joint benefits. To elicit helping behavior in work and private contexts, it may be helpful to provide pleasant lighting. Nevertheless, the subjective preferences for lighting conditions as well as personal control (Veitch, 2008) should be taken into account. Moreover, in field situations, the effect of light on cooperation may interact with other environmental features, such as room temperature, air quality, or noise. Furthermore, the generalizability of these effects has to be considered in other lighting conditions, such as daylight.

5 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*, 1-33.
- Boyce, P. R. (2014). *Human factors in lighting*. Crc Press.
- Boyce, P. R., Veitch, J. A., Newsham, G. R., Myer, M., & Hunter, C. (2003). *Lighting quality and office work: A field simulation study* (PNNL 14506). Richland, WA, USA: Pacific Northwest National Laboratory.
- Carnevale, P. J., & Isen, A. M. (1986). The influence of positive affect and visual access on the discovery of integrative solutions in bilateral negotiation. *Organizational Behavior and Human Decision Processes, 37*, 1-13.
- Gockel, C., Kolb, P.M., Werth, L. (2014). Murder or not? Cold temperature makes criminals appear to be cold-blooded and warm temperature to be hot-headed. *PLoS ONE, 9*, e96231.
- Friedman, R. S., & Förster, J. (2001). The effects of promotion and prevention cues on creativity. *Journal of Personality and Social Psychology, 81*, 1001-1013.
- Johnson, R. E., & Lord, R. G. (2010). Implicit effects of justice on self-identity. *Journal of Applied Psychology, 95*, 681-695.
- Knez, I. (1995). Effects of indoor lighting on mood and cognition. *Journal of Environmental Psychology, 15*, 39-51.
- Kruithof, A. A. (1941). Tubular luminescence lamps for general illumination. *Philips Technology Review, 6*, 65-96.
- Kuijsters, A., Redi, J., de Ruyter, B., & Heynderickx, I. (2015). Lighting to make you feel better: Improving the mood of elderly people with affective ambiances. *PLoS ONE, 10*, 1-22.
- Steidle, A., Hanke, E., & Werth, L. (2013). In the dark we cooperate: The situated nature of procedural embodiment. *Social Cognition, 31*, 275-300.

Takahashi, S. (2009). Effects of coloured lighting on judgement of emotional expression. *Journal of the International Colour Association, 4*, 1-9.

Veitch, J. A., Newsham, G. R., Boyce, P. R., & Jones, C. C. (2008). Lighting appraisal, well-being and performance in open-plan offices: A linked mechanisms approach. *Lighting Research and Technology, 40*, 133-151.

Vogels, I.M.L.C., de Vries M., & van Erp, T.A.M. (2008). *Effect of coloured light on atmosphere perception*. Proceedings of the AIC Interim Meeting, Swedish Colour Centre Foundation. Stockholm: AIC, pp.15–18.

Kontextsensitive Beleuchtung: Entwicklung einer neuartigen Versuchseinrichtung und Bewertung der Nutzerakzeptanz

Dr.-Ing. Carolin Hubschneider, Dipl.-Ing. Yuan Fang, Dr.-Ing. Jan de Boer, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart

Problemstellung und Forschungsfragen

Die kontextsensitive Anpassung der Beleuchtung an variierende Nutzungsanforderungen in Räumen scheiterte bisher aufgrund des statischen Leuchtenbaus (wie große Lumenpakete von Leuchtstofflampen) und mangelnder Sensorik. Mit der Verfügbarkeit von LED-Systemen und raumauflösender Sensorik ergeben sich heute vielfältige Möglichkeiten, die Beleuchtung besser und effizienter – zeitlich und örtlich variabel - auf jeweilige Raum- und Nutzungssituationen anzupassen. Ziel des vom BMWi geförderten Forschungsvorhabens ist, zunächst ein kontextsensitives Beleuchtungssystem zu entwickeln und anschließend die Nutzerakzeptanz unterschiedlicher neuer Lichtsteuerungskonzepte zu untersuchen.

Stand der Wissenschaft / Technik

Die vertiefte Betrachtung kontextsensitiver Beleuchtung (z. B. bei verschiedenen Tätigkeiten und Arbeitspositionen im Büro) steht bis dato aus. So wurde die Nutzerakzeptanz hiermit möglicher dynamischer Lichtszenarien und auch das Zusammenspiel mit dem Energiebedarf bisher noch nicht umfassend untersucht.

Forschungshypothesen

Die Haupthypothese der Arbeiten ist: „Durch kontextsensitive Beleuchtung kann die Nutzerakzeptanz, bei gleichbleibendem oder gesenktem Energiebedarf, gehalten oder gesteigert werden“. Sie wird durch Subhypothesen ergänzt.

Versuchsaufbau

Die neue Versuchseinrichtung zur kontextsensitiven Beleuchtung besteht aus einem Laborraum mit 144 einzeln steuerbaren LED-Modulen und ermöglicht eine örtlich differenzierte Beleuchtung der Raumumschließungsflächen (spektrale Variabilität: CCT: 2.000 K bis über 10.000 K, R_a bis 95, Beleuchtungsstärken bis max. 5.000 lx). Die Verbindung mit einem Positionserfassungssystem (IR-Tiefenbildkamerasystem) gestattet die Kopplung von Lichtszenarien an Nutzerposition und -tätigkeit. In insgesamt 6 Studien wurden statische und dynamische Szenarien in Einzel- und Gruppenbürosituationen mit variierenden Leuchtedichteniveaus und Änderungsgeschwindigkeiten betrachtet. Zur Untersuchung der Nutzerakzeptanz wurden Leistungstests und Fragebögen verwendet.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Die Auswertung der insgesamt 6 Studien wird im Frühjahr 2016 abgeschlossen. Vorläufige Auswertungen zeigen, dass die Nutzerakzeptanz bei teils erheblich geringerem Energieverbrauch gehalten, in Teilen sogar gesteigert werden kann.

Context sensitive lighting: Development of an innovative test facility and assessment of the user acceptance

Dr.-Ing. Carolin Hubschneider, Dipl.-Ing. Yuan Fang, Dr.-Ing. Jan de Boer, Fraunhofer Fraunhofer Institute for Building Physics, Stuttgart

Research issue

So far context sensitive adjustment of the lighting situation was impeded by the rather static construction of luminaires (e.g. big amount of luminous flux in fluorescent tubes) and lacking sensor technology. Today's LED systems (flexible light intensity, distribution and colour) and spatially resolving sensors open different possibilities to adapt light in indoor spaces in a better and more efficient way. The aim of the research project (supported by the German federal ministry of economic affairs and energy, BMWI) was to develop a context sensitive lighting system and to analyse the user acceptance of different innovative concepts of lighting controls.

State of science/technology

A detailed investigation of context sensitive lighting (e.g. different tasks and working positions in offices) has not been yet conducted. The user acceptance of dynamic lighting situations and the resulting energy demand was not analysed in a comprehensive manner yet.

Research hypothesis

The main hypothesis of the work conducted is: "By context sensitive lighting, the user acceptance is, at constant or reduced energy demand, maintained or increased."

Experimental setup

The innovative test facility for context sensitive lighting consists of an office-like laboratory with 144 individual controllable LED-modules. It allows a locally differentiated illumination of the room surfaces (spectral variability: CCT: 2000 K to more than 10000 K, R_a up to 95, illuminance up to 5000 lx). The connection with a system for position determination (IR-depth-sensor) allows the coupling of lighting situations to the position and task of the user. Altogether 6 studies were conducted to analyse static and dynamic lighting scenarios in individual and group offices with varying levels of illuminance and varying rates of change. For the assessment of the user acceptance, performance measurements and questionnaires were used.

Results in comparison with previous findings

The evaluation of the performed studies showed that reduction of illuminance levels outside the task area where only partly accepted. If on the other hand, a given "light budget" is redistributed, for instance more light in the task area – less light in other not used areas, user acceptance can be increased, while at the same time energy consumption decreases.

Kontextsensitive Beleuchtung: Entwicklung einer neuartigen Versuchseinrichtung und Bewertung der Nutzerakzeptanz

*Dr.-Ing. Carolin Hubschneider, Dipl.-Ing. Yuan Fang, Dr.-Ing. Jan de Boer,
Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart*

Zusammenfassung

Ein erheblicher Anteil des Energieverbrauchs in Bürogebäuden entfällt auf die Beleuchtung. Durch eine heute mit Hilfe von LED-Systemen und neuen Sensoriken mögliche, erheblich differenziertere, kontextsensitive Bereitstellung von Licht in relevanten Arbeitsbereichen kann versucht werden, diesen Anteil zu reduzieren. Neben dem Bau einer neuen Versuchseinrichtung zur Untersuchung derartiger Beleuchtungslösungen wurde in sechs verschiedenen Teilstudien untersucht, inwieweit diese Flexibilisierung sich auf Nutzerakzeptanz und Energieeffizienz auswirkt. Bei in etwa gleichbleibender in Teilstudien erhöhter Nutzerakzeptanz waren ermittelte Energieeinsparungen teils erheblich.

1 Einleitung und Problemstellung

Eine kontextsensitive Anpassung der Beleuchtung an variierende Nutzungsanforderungen in Räumen scheiterte bisher aufgrund des statischen Leuchtenbaus (wie große Lumenpakete von Leuchtstofflampen) und mangelnder Sensorik. Mit der Verfügbarkeit von LED-Systemen und neuer Sensorsysteme ergeben sich heute vielfältige Möglichkeiten, die Beleuchtung - zeitlich und örtlich variabel - auf jeweilige Raum- und Nutzungssituationen (wie unterschiedliche Tätigkeiten) anzupassen. Ziel eines vom BMWi geförderten Forschungsvorhabens war es, zunächst ein kontextsensitives Beleuchtungssystem zu entwickeln und anschließend die Nutzerakzeptanz unterschiedlicher neuer Lichtsteuerungskonzepte zu untersuchen. Im Rahmen mehrerer Teilstudien wurde überprüft, inwieweit diese Flexibilisierung sich auf Nutzerakzeptanz und Energieeffizienz auswirkt.

2 Stand der Technik und des Wissens

Kontextsensitive Beleuchtungslösungen wurden in Ansätzen bereits realisiert. So wurde in [1] gezeigt, dass mit stärker nutzerbezogener Beleuchtung mit Hilfe individuell steuerbarer Leuchten im Großraumbüro Energie eingespart werden kann. In [2] wurden Lichtmanagementsysteme basierend auf einer sogenannten „Schwarmintelligenz“ (vernetzte Stehleuchten) vorgestellt – Lösungen, die mittlerweile im Markt erhältlich sind.

Relevante Systemparameter, die sich auf die Nutzerakzeptanz auswirken, wie das Niveau der Umgebungsbeleuchtung und die Änderungsgeschwindigkeit, wurden teilweise bereits untersucht. Ausgehend von einer Arbeitsplatzbeleuchtung von 500 lx ist das Absenken der Umgebungsbeleuchtungsstärke nach [3], [4] auf 350 lx bis 165 lx ohne Einschränkung der Nutzerakzeptanz möglich. Hinsichtlich der Änderungsgeschwindigkeit der Beleuchtungsstärke zeigen [5], [6] dass mit einer Wahrnehmungsgrenze von etwa 5 %/s gerechnet werden muss. Als störend werden Änderungsgeschwindigkeiten ab 15 %/s bis 20 %/s empfunden. Vertiefende Untersuchungen zu kontextsensitiver Beleuchtung (z. B. bei verschie-

denen Tätigkeiten und Arbeitspositionen im Büro) standen bis dato aus. So wurden die Nutzerakzeptanz möglicher dynamischer Lichtszenarien und auch deren Zusammenspiel mit dem Energiebedarf bisher noch nicht umfassend untersucht.

3 Forschungsziel

Es sollte identifiziert werden, welche Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs ohne eine Verschlechterung der Nutzerakzeptanz möglich sind. Des Weiteren sollte untersucht werden, ob durch eine Umverteilung des Lichtstroms die Nutzerakzeptanz gesteigert werden kann. Ein in Abbildung 1 dargestellter Ordnungsrahmen stellt die Parameter Belegungs-dichte, Energieverbrauch und Akzeptanz gegenüber.

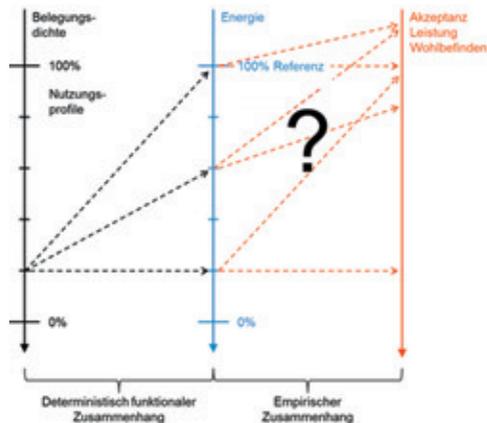


Abb. 1: Darstellung eines Ordnungsrahmens für die durchgeführten Teilstudien.

4 Neuartige Versuchseinrichtung

Es wurde eine in Bild 2 dargestellte Versuchsanlage entwickelt, die es erlaubt, 144 einzelne LED-Module, verteilt auf 8 Leuchten in Intensität, Verteilung und Farbe zu steuern (Beleuchtungsstärken bis 5000 lx, CCT: 2000 K - 10000 K, Ra bis zu 95). Das Beleuchtungssystem wurde in einem als Einzelbüro genutzten Laborraum (6,0 m x 3,5 m x 3,0 m) installiert. Mit einem IR-Tiefenbildkamerasystem und einer für die Anlage entwickelten Software können Nutzerpositionen einstellbare Lichtszenen zugeordnet werden. Wird eine bestimmte Position besetzt, wird die entsprechende Lichtszene aktiviert. Zusätzlich wurde ein System auf Basis eines konventionellen Beleuchtungssystems in einem als Gruppenbüro genutzten Laborraum (6,6 m x 6,6 m x 2,8 m) installiert. Hier wurden neun Leuchtengruppen mit jeweils einem Präsenzsensoren ausgestattet. Eine Software weist auch hier den jeweils genutzten Positionen vordefiniert Lichtszenen zu. Dynamische Übergänge zwischen den Lichtszenen können parametrisiert werden.

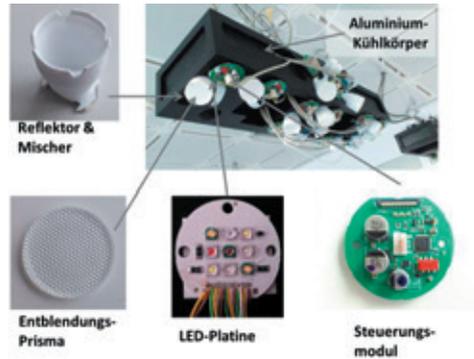


Abb. 2: Laborleuchten zur kontextsensitiven Beleuchtung in dem als Einzelbüro genutzten Laborraum.

5 Methode und Studiendesign

5.1 Übersicht durchgeführte Teilstudien

Die durchgeführten sechs Teilstudien [7] sind in Tabelle 1 einander gegenübergestellt.

Tab. 1: Fragestellung und Kurzbeschreibung Teilstudien.

Titel	Fragestellung	Kurzbeschreibung der Durchführung
Beleuchtungsstärkereduktion benachbarter Arbeitsplatz	Beeinflusst die Beleuchtungsstärkereduktion an einem benachbarten Arbeitsplatz andere Nutzer?	Test von drei verschiedenen Lichtszenarien hinsichtlich der Beleuchtungsstärkereduktion ausgelöst durch Abwesenheit des Aktors.
Insellösung Einzelbüro	Welche Mindestumgebungsbeleuchtungsstärke wird akzeptiert?	Test unterschiedlicher Umgebungsbeleuchtungsstärken, bei konstanter Arbeitsplatzbeleuchtung.
Insellösung Gruppenbüro	Welche Mindestumgebungsbeleuchtungsstärke wird von Einzelperson akzeptiert?	Test unterschiedlicher Umgebungsbeleuchtungsstärken, bei konstanter Arbeitsplatzbeleuchtung.
Positionswechsel Einzelbüro	Welche Beleuchtungsstärkereduktion und Änderungsgeschwindigkeit wird am verlassenen Arbeitsplatz akzeptiert?	Proband ändert Position im Einzelbüro. Die Lichtsituation an nicht genutzten Arbeitsplätzen variiert in Beleuchtungsstärke und Änderungsgeschwindigkeit.
Positionswechsel Gruppenbüro	Welche Beleuchtungsstärkereduktion und Änderungsgeschwindigkeit wird am verlassenen Arbeitsplatz akzeptiert?	Proband ändert Position im Gruppenbüro. Die Lichtsituation an nicht genutzten Arbeitsplätzen variiert in Beleuchtungsstärke und Änderungsgeschwindigkeit.
Lichtbudget	Kann durch Umverteilung des Lichtstroms eine der Referenz gegenüber erhöhte Nutzerakzeptanz erreicht werden?	Test von sechs verschiedenen Bedingungen, die sich hinsichtlich Lichtverteilung unterscheiden.

5.2 Ausgewählte Teilstudien

Nachfolgend werden zwei der sechs durchgeführten Teilstudien kurz vorgestellt.

„Positionswechsel Einzelbüro“

Im Einzel- / Gruppenlabor wurden verschiedene Arbeitsplätze (AP) eingerichtet, hier am Beispiel des Einzelbüros (mit Angabe der jeweiligen Aufgabe): Detail (Zahlenverbinden), Regal (Suchen von Büchern) und PC (Büroarbeit und Fragebögen). Der Proband bewegte sich nach einem festgelegten Muster durch den Raum (AP Detail → AP Regal → AP PC). Betrat der Proband einen Arbeitsplatz, wurde die Zielbeleuchtungsstärke in etwa 5 Sekunden erreicht. Die Beleuchtungsstärke der verlassenen Arbeitsplätze wurde auf 0 lx (bzw. Restlicht), „Dyn1/Dyn2“, und 200 lx, „Dyn3/Dyn4“ dynamisch angepasst oder als „Referenz“ statisch bei 500 lx belassen, siehe Abbildung 3. Die Änderungsgeschwindigkeit am verlassenen Arbeitsplatz wurde zwischen einer schnelleren (11,5 lx/s (Schrittweite 2 s) bzw. 10 %/s) und einer langsameren Änderung (5,5 lx/s (Schrittweite 2 s) bzw. 5 %/s) variiert, siehe dazu Tabelle 1).



Abb. 3: Teilstudie „Positionswechsel Einzelbüro“: Photographische Darstellung der Lichtszenen für den Arbeitsplatz „Detail“.

Tab. 2: Beschreibung der Lichtszenarien Studie „Positionswechsel Einzelbüro“.

LichtszENARIO		Dyn 1	Dyn 2	Dyn 3	Dyn 4	Referenz
Änderungsgeschw. bei Verlassen [%/s]		5	10	5	10	-
Position Proband: Detail	E am AP „Detail“ [lx]	750	750	750	750	500
	E an APs nicht genutzt [lx]	0	0	200	200	500
Position Proband: Regal	E am AP „Regal“ [lx]	300	300	300	300	500
	E an APs nicht genutzt [lx]	0	0	200	200	500
Position Proband: PC	E am AP „PC“ [lx]	500	500	500	500	500
	E an APs nicht genutzt [lx]	0	0	200	200	500

„Lichtbudget“

Es wurden sechs verschiedene Lichtszenarien gegenübergestellt, welche sich bei gleichem verwendetem Lichtstrom hinsichtlich der Verteilung des Lichts im Raum unterscheiden. Untersucht wurde, wie bei gleichbleibendem energetischen Aufwand bessere Bedingungen für den Nutzer erreicht werden können. In Abbildung 4 sind die Szenarien „Referenz“ (Arbeitsplatz 500 lx, Umgebung 300 lx), „Deckenaufhellung“ (starke Aufhellung der Decke, Arbeitsplatz 500 lx) und „Arbeitsplatzaufhellung“ (Arbeitsplatz über 500 lx) dargestellt.



Abb. 4: Teilstudie „Lichtbudget“: Photographische Darstellung untersuchter Szenarien.

In den vorgestellten Studien wurden bürorelevante Maße zur Erfassung der Leistung (visuell und kognitiv) und des Empfindens (wie „Wohlbefinden“, „Akzeptanz“, „Ermüdung“, „wahrgenommene Leistungsatmosphäre“) erhoben.

6 Ergebnisse

Ausgewählte Ergebnisse der zwei o. g. Teilstudien werden wie folgt zusammengefasst:

- Eine Reduktion der Umgebungsbeleuchtungsstärke bis auf 200 lx wird von Nutzer weitestgehend akzeptiert. Gegenüber der Referenzbedingung ergaben sich keine Veränderungen hinsichtlich der Maße „Wohlbefinden“ (vgl. Abbildung 5), „Akzeptanz“, „Ermüdung“ und „wahrgenommene Leistungsatmosphäre“. „Ablenkung“ und „Störpotential“ wurden jedoch als schlechter bewertet.

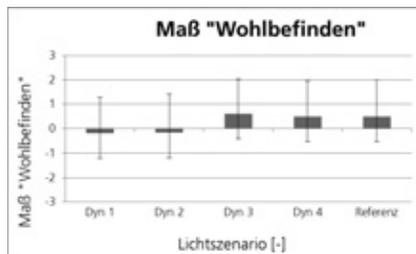


Abb. 5: Teilstudie „Positionswechsel Einzelbüro“: Einfluss der Lichtszenarien auf das Wohlbefinden (+3: sehr gut; -3: sehr schlecht).

- Die Änderungsgeschwindigkeit nahm nur im Gruppenlabor Einfluss auf den Nutzer. Bei mittlerer Umgebungsbeleuchtungsstärke wirkte sich eine geringe Änderungsgeschwindigkeit positiv auf die „Akzeptanz“ und die „Ablenkung“ aus. Es wurden Änderungsgeschwindigkeiten von 5 %/s bzw. 10 %/s akzeptiert.
- Die Umverteilung eines gegebenen „Lichtbudgets“ führte zu unterschiedlicher empfundener Eignung für verschiedene Tätigkeiten. Die Deckenaufhellung wurde für Bildschirmarbeit bevorzugt. Eine stärker auf den Arbeitsplatz bezogene Beleuchtung mit deutlich gesteigerter Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche wurde für Tätigkeiten als passend empfunden, welche höhere Sehleistungen fordern.
- Bei weitest gehender Nutzerakzeptanz konnte eine Energieeinsparung von ca. 30 % im Gruppenlabor und ca. 60 % im Einzellabor ermittelt werden (siehe Abbildung 6).

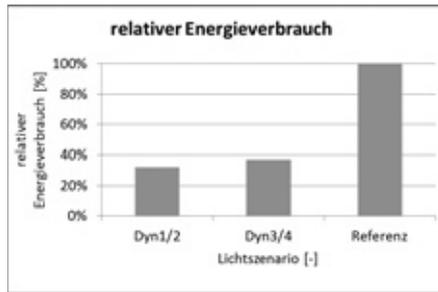


Abb. 6: Teilstudie „Positionswechsel Einzelbüro“: Vergleich relativer Energieverbräuche der Lichtszenarien.

7 Diskussion und Ausblick

Aus den Studien lässt sich ableiten, dass Beleuchtungsstärkereduktionen außerhalb des Bereichs der Sehaufgabe nur teilweise akzeptiert werden. Wird dagegen ein vorgegebenes „Lichtbudget“ umverteilt, z. B. im Bereich der Sehaufgabe mehr Licht bereitgestellt, in nicht genutzten Bereichen weniger Licht, kann die Nutzerakzeptanz erhöht werden bei gleichzeitig verringertem Energieverbrauch.

Im Vergleich zu einem ganzen Arbeitstag waren die Studiendauern kurz. Eventuelle Langzeitwirkungen der Umgebungsbeleuchtung konnten somit nicht betrachtet werden. Zusätzlich handelte es sich bei den Probanden um Studenten, deren Alter nicht dem des typischen Nutzers entspricht. Die gewonnen Erkenntnisse sollten zukünftig im Rahmen einer Feldstudie mit tatsächlichen Büronutzern weiter verifiziert werden. In einem weiteren Schritt sollte das Zusammenspiel der hier untersuchten kontextsensitiven elektrischen Beleuchtung mit Tageslicht betrachtet werden. Mittelfristig sollten die gewonnenen Erkenntnisse in Lichtlösungen für die praktische Anwendung übertragen werden.

8 Referenzen

- [1] Wen, Y.-J.; Agogino, A. M.: Control of Wireless-Networked Lighting in Open-Plan Offices. *Lighting Research and Technology* 43 (2011) H. 2, S. 235-248.
- [2] Woodward, S. (2014): Distributed Intelligence for Energy Saving Smart-Lighting. *Proceedings IEECB 2014*, Frankfurt.
- [3] Slater, A. I.; Perry M. J.; Carter, D. J.(1993): Illuminance Differences Between Desks: Limits of Acceptability. *Lighting Research and Technology* 25.2 : S. 91-103.
- [4] Tabuchi, Y.; Matsushima, K.; Nakamura, H.: Preferred Illuminances on Surrounding Surfaces in Relation to Task Illuminance in Office Room Using Task-Ambient Lighting. *Journal of Light & Visual Environment* 19.1 (1995): S. 28-39.
- [5] Bieske, K.; Dommaschk, A. (2014): Steuerkonzepte für dynamische Beleuchtungssysteme: Variation des Beleuchtungsniveaus. In: *Tagung LICHT 2014*, Den Haag, Niederlande.
- [6] Shikakura, T.; Morikawa, H.; Nakamura, Y. (2003): Perception of Lighting Fluctuation in Office Lighting Environment. *Journal of Light & Visual Environment* 27(2), S. 75-82.
- [7] Hubschneider, C.; Fang, Y; de Boer, J.: „Kontextsensitive Beleuchtungssysteme für Neubau und Bestand“, Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Stuttgart (vorussichtlich verfügbar 9/2016).

Einheitliche Bewertung von Lichtsituationen mit dem LiTG-Fragebogen – erste Erfahrungen

Cornelia Vandahl, Carsten Funke, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Lichttechnik, PF 100565, 98684 Ilmenau

Cornelia Moosmann, Karlsruher Institut für Technologie, Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau, Englerstraße 7, 76137 Karlsruhe

Problemstellung

Die Bewertung von Lichtsituationen erfolgt anhand von Güteigenschaften. Dazu gehören neben Beleuchtungsniveau, Gleichmäßigkeit und Blendungsbegrenzung auch qualitative Aspekte wie Raumeindruck, Wirkung der Lichtfarbe, Wohlbefinden der Nutzer und vieles mehr. Die Festlegung von dafür sinnvollen Kennzahlen sowie eine gesamtheitliche Bewertung der Lichtsituation sind in vielen Fällen nur durch eine Befragung von Testpersonen möglich. In Labor- und Feldversuchen kommen daher Fragebögen zum Einsatz.

Ziel

Fragebögen sind Messinstrumente zur Erfassung von Nutzerbewertungen. Um die Ergebnisse verschiedener Studien miteinander vergleichen und verknüpfen zu können, sollten möglichst viele Forschergruppen mit den gleichen Fragen arbeiten. Ein Fragebogen muss alle für die Untersuchung relevanten Fragen enthalten, jedoch möglichst keine überflüssigen, um die Probanden nicht unnötig zu beanspruchen. Die Fragen müssen von den Untersuchungsteilnehmern möglichst einfach zu verstehen sein und eindeutig verstanden werden.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Um eine größere Einheitlichkeit bei Befragungen und damit eine bessere Vergleichbarkeit verschiedener Forschungsergebnisse zu ermöglichen, wurde von einer Arbeitsgruppe des LiTG-Expertenforums „Innenbeleuchtung“ (EFI) ein Basisfragebogen entwickelt, der kostenlos zur Verfügung gestellt wird. Er basiert auf verschiedenen Fragebögen, die in Labor- und Felduntersuchungen der Autorinnen am KIT oder an der TU Ilmenau eingesetzt wurden und wurde um Fragen erweitert, die sich in Untersuchungen der TU Berlin oder der Fa. Zumtobel bewährt haben.

Realisierungsgrad

Der Fragebogen ist noch in der Erprobung. Er umfasst derzeit 25 Fragen, deren Beantwortung ca. 10 Minuten dauert. Er muss an die konkrete Fragestellung einer Untersuchung angepasst werden. Dabei müssen die für eine konkrete Untersuchung überflüssigen Fragen entfernt werden und unter Umständen zusätzliche relevante Fragen ergänzt werden. Je nach Anwendungsfall (Labor- oder Felduntersuchung) sollte eine sieben- oder fünfstufige Skala verwendet werden.

In einer Felduntersuchung, bei Laboruntersuchungen zu Blendung und Kontrastwiedergabe und bei einer Testraumuntersuchung zu Nutzerverhalten und -bewertung wurde der Fragebogen bereits erfolgreich eingesetzt.

Uniform assessment of lighting situations with the LiTG-Questionnaire – first experiences

Cornelia Vandahl, Carsten Funke, TU Ilmenau, Dep. of Mechanical Engineering, Lighting Engineering Group, PF 100565, 98684 Ilmenau

Cornelia Moosmann, Karlsruhe Institut of Technology, Building Science Group, Englerstraße 7, 76137 Karlsruhe

Issue

Quality features are used for qualitative evaluation of lighting situations. Besides illuminance level, uniformity and glare control, these also include color of light, spatial impression, well-being of users, and much more. Surveys with test subjects are required for the definition of meaningful indicators as well as holistic assessments in most cases. Therefore, questionnaires are used in laboratory and field trials..

Aim

These are measurement instruments for users' ratings. Questionnaires must include all questions relevant for the research questions. At the same time, it should include no dispensable questions to avoid stressing the subjects unnecessarily. The questions must be easy to understand by the study participants and must be clearly.

Description of the innovation/»best practice«

In order to compare and link the results of different studies, as many research groups as possible should work with the same issues. Therefore, a basic questionnaire was developed by a working group of LiTG Expert Forum "Interior Lighting" (EFI). The questionnaire is freely available. The current state is still the trial phase. It is based on different questionnaires, which were used in laboratory or field studies of the authors at the KIT or at TU Ilmenau and has been extended with questions that have been proven in studies at the TU Berlin or the Zumtobel company.

Level of realization

Spatial conditions such as window size or kind of illumination are known in laboratory tests. In field studies, they should be covered as far as possible by the experimenter. Thus, the questionnaire can be kept as short as possible and data such as the orientation of a space (the compass), the dimensions, and the photometric quantities to be examined, can be determined in an appropriate way.

In a field study, in laboratory tests for glare and contrast rendering, and in a test room study on users' behavior and evaluation the questionnaire has already been used successfully.

Einheitliche Bewertung von Lichtsituationen mit dem LiTG-Fragebogen – erste Erfahrungen

Cornelia Vandahl, Carsten Funke, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Lichttechnik, PF 100565, 98684 Ilmenau, cornelia.vandahl@tu-ilmenau.de
Cornelia Moosmann, Karlsruher Institut für Technologie, Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau, Englerstraße 7, 76137 Karlsruhe, cornelia.moosmann@kit.edu

Zusammenfassung

Die Bewertung von Lichtsituationen erfolgt anhand von Güte Merkmalen. Die Festlegung von dafür sinnvollen Kennzahlen sowie eine gesamtheitliche Bewertung der Lichtsituation sind in vielen Fällen nur durch eine Befragung von Testpersonen möglich. In Labor- und Feldversuchen kommen daher Fragebögen zum Einsatz.

Um eine größere Einheitlichkeit bei Befragungen und damit eine bessere Vergleichbarkeit verschiedener Forschungsergebnisse zu ermöglichen, wurde von einer Arbeitsgruppe des LiTG-Expertenforums „Innenbeleuchtung“ (EFI) ein Basisfragebogen entwickelt, der zur freien Nutzung zur Verfügung steht.

In einer Felduntersuchung, bei Laboruntersuchungen zu Blendung und Kontrastwiedergabe und bei einer Testraumuntersuchung zu Nutzerverhalten und -bewertung wurde der Fragebogen bereits eingesetzt. Erste Ergebnisse werden aufgezeigt.

1 Ziel der Fragebogenentwicklung

Um die Ergebnisse verschiedener Studien miteinander vergleichen und verknüpfen zu können, sollten möglichst viele Forschergruppen mit den gleichen Fragen arbeiten. Daher wurde von einer Arbeitsgruppe des LiTG-Expertenforums „Innenbeleuchtung“ (EFI) ein Basisfragebogen entwickelt, der allen zur Verfügung steht. Er basiert auf verschiedenen Fragebögen, die in Labor- und Felduntersuchungen der Autorinnen am KIT oder an der TU Ilmenau eingesetzt wurden und wurde um Fragen erweitert, die sich in Untersuchungen der TU Berlin oder der Firma Zumtobel bewährt haben.

Der Fragebogen ist sowohl für Labor- als auch für Felduntersuchungen einsetzbar. Er ist damit nicht nur für die Lichtforschung sondern auch für die praxisorientierte Überprüfung von Beleuchtungsanlagen vorgesehen.

Der derzeitige Stand ist noch in der Erprobung. Liegen ausreichend Daten und Erfahrungen vor, ist eine Überarbeitung geplant. Die Anwendung durch möglichst viele Forschergruppen und Anwender ist daher wünschenswert und wird zur Qualität des Fragebogens beitragen.

2 Der Fragebogen

2.1 Allgemeines

Fragebögen sind Messinstrumente zur Erfassung der Nutzerbewertungen. Ein Fragebogen muss alle für die Untersuchung relevanten Fragen enthalten, jedoch möglichst keine überflüssigen, um die Probanden nicht unnötig zu beanspruchen. Die Fragen müssen von

den Untersuchungsteilnehmern möglichst einfach zu verstehen sein und eindeutig verstanden werden.

2.2 Aufbau des Fragebogens

Der Fragebogen ermöglicht die Bewertung aller wesentlichen Gütemerkmale einer Innenbeleuchtung, wie Helligkeitsniveau, Blendung, Farbe und Farbwiedergabe, Spiegelungen und Bedienbarkeit. Auch Tageslicht spielt darin eine wesentliche Rolle.

Alle Fragen sind mit einer bipolaren Antwortskala verbunden. Bei Skalenstufen stellt sich die Frage, wie viele Stufen gewählt werden und ob eine gerade oder ungerade Anzahl Stufen geeignet ist. Bortz und Döring erläutern, dass „eine zu feine Differenzierung bei einer Ratingskala das Urteilsvermögen der Probanden überfordert“ (Bortz & Döring, 2006, S. 181). Man sollte „dem Urteilenden die Wahl des Skalenformats überlassen“ (ebd., S. 181), und bei Felduntersuchungen würden von Probanden häufig Fünferskalen präferiert.

Eine gerade Anzahl Stufen erzwingt die Entscheidung für einen der beiden Pole und umgeht damit das Problem der „zentralen Tendenz“, das vor allem auftritt, wenn Probanden mit dem zu beurteilenden Objekt nicht vertraut und in ihrer Antwort unsicher sind. Es ist nicht davon auszugehen, dass die Probanden unsicher sind hinsichtlich ihrer Zufriedenheit mit den Lichtverhältnissen, denen sie während der Befragung ausgesetzt sind. Daher wird eine ungerade Anzahl Skalenstufen vorgeschlagen, die ein neutrales Urteil zulässt, wenn beispielsweise ein Nutzer die Beleuchtung als weder hell noch dunkel empfindet.

2.3 Hinweise zur Anwendung

Der Fragebogen umfasst 25 Fragen, deren Beantwortung ca. 10 Minuten dauert. Er muss an die Fragestellung einer Untersuchung angepasst werden. Dabei müssen die für eine konkrete Untersuchung überflüssigen Fragen entfernt werden und unter Umständen zusätzliche relevante Fragen ergänzt werden. In Laborversuchen wird eine 7stufige Skala verwendet und das Feld „keine Angabe“ entfernt. In Feldversuchen ist die 5stufige Skala und das Feld „keine Angabe“ zu verwenden. Persönliche Daten der Probanden wie Alter (in Jahren oder Geburtsjahr), Geschlecht, Brille sollten grundsätzlich abgefragt werden.

Räumlichen Gegebenheiten wie Fenstergröße oder Beleuchtungsart sind in Laboruntersuchungen bekannt. In Felduntersuchungen sollten sie nach Möglichkeit vom Versuchsleiter erfasst werden. So kann der Fragebogen möglichst kurz gehalten werden, zudem können Daten wie die Orientierung eines Raumes (Himmelsrichtung) oder Abmessungen ebenso wie die zu untersuchenden lichttechnische Größen in geeigneter Form ermittelt werden.

Für die Auswertung werden der Skala von links beginnend Zahlenwerte zugeordnet. Im Feldversuch die Werte 1 bis 5 sowie 0 für „keine Angabe“, im Laborversuch die Werte 1 bis 7 (siehe Abb. 1). Mit diesen kann dann die Auswertung vorgenommen werden.

5. Wie empfinden Sie im Moment die Helligkeit an Ihrem Arbeitsplatz ?								
sehr dunkel	<input type="checkbox"/>	sehr hell	keine Angabe					
	1	2	3	4	5	6	7	0

Abb. 1: Zuordnung von Zahlenwerten zu den Urteilen

3 Erste Erfahrungen

Der Fragebogen wurde in Laborstudien zur Blendung und Kontrastwiedergabe teilweise eingesetzt. Die Probanden hatten keine Schwierigkeiten beim Verstehen und der Anwendung des Fragebogens.

Allerdings kam er aus Zeitgründen nur bei einigen Lichtsituationen und jeweils nur mit wenigen Testpersonen zum Einsatz. Daher sind die dargestellten Ergebnisse statistisch nicht abgesichert.

In Abb. 2 (links) ist Zusammenhang zwischen dem Wunsch nach Änderung der Helligkeit und der Bewertung der vorhandenen Helligkeit auf der Arbeitsfläche (Fragen 5.1 und 5.2 im Fragebogen) dargestellt. Die Bewertung erfolgte durch 30 Testpersonen, die verschiedenen Situationen betrachteten. Wird eine Lichtsituation als dunkel bewertet, lässt sich in der darauffolgenden Bewertung der Wunsch nach mehr Helligkeit erkennen.

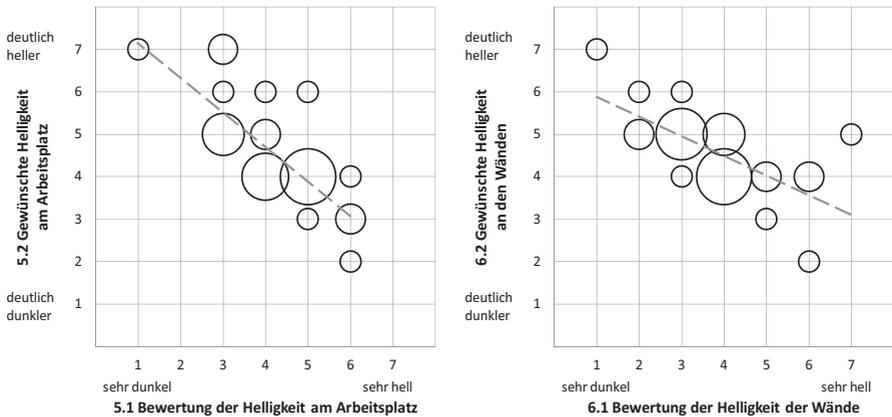


Abb. 2: (links) Zusammenhang zwischen dem Wunsch nach Änderung der Helligkeit auf der Arbeitsfläche und der Bewertung der vorhandenen Helligkeit (Fragen 5.1 und 5.2 im Fragebogen), die Bewertung erfolgte durch 30 Testpersonen. Die Größe der Kreise zeigt die Häufigkeit der Antworten. (rechts) Zusammenhang zwischen dem Wunsch nach Änderung der Helligkeit auf den Wänden und der Bewertung der vorhandenen Helligkeit (Fragen 6.1 und 6.2 im Fragebogen). Die Leuchtdichte betrug in allen Situationen 42 cd/m^2 . Die Bewertung erfolgte durch 30 Testpersonen. Die Größe der Kreise zeigt die Häufigkeit der Antworten.

Abb. 2 (rechts) zeigt die Bewertung der Helligkeit der Wände (Frage 6.1) und den Wunsch nach Änderung. Die Leuchtdichte der Wände betrug für alle Situationen 42 cd/m^2 . Die Mehrheit bewertete diese Situation als neutral, also weder zu hell noch zu dunkel. Auch hier ist bei einer Wertung im Bereich „sehr dunkel“ der Wunsch nach mehr Helligkeit erkennbar (Frage 6.2).

In Abb. 3 (links) ist die Häufigkeit der Bewertungen zur Lichtfarbe (Frage 9.1) dargestellt. Die Farbtemperatur betrug in allen Situationen 4000 K . Am Test nahmen 30 Personen teil. Der Median der Bewertung beträgt 4 (weder kalt noch warm). Personen, die die Situation als kalt oder sehr kalt bewerteten, wünschten sich eine wärmere Lichtfarbe. Der Wunsch nach einer kälteren Farbe bestand nicht.

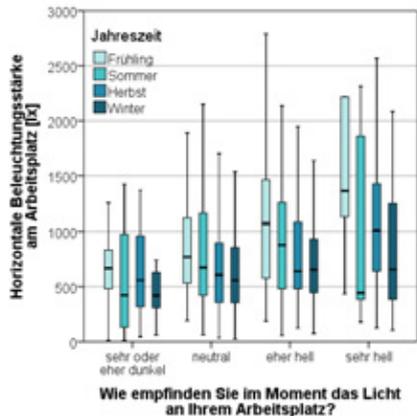
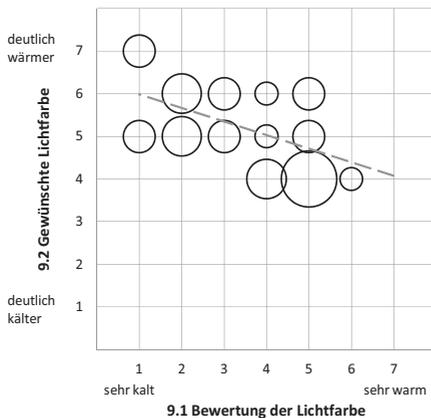


Abb. 3: (links) Zusammenhang zwischen dem Wunsch nach Änderung der Lichtfarbe und der Bewertung der Lichtfarbe (Fragen 9.1 und 9.2 im Fragebogen), die Bewertung erfolgte durch 30 Testpersonen. Die Größe der Kreise zeigt die Häufigkeit der Antworten.
 (rechts) Boxplot der horizontalen Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz während der Befragung über der Nutzerbewertung der Helligkeit (Frage 5.1 im Fragebogen) in Abhängigkeit von der Jahreszeit. Die Bewertung erfolgte in 758 Befragungen in einer Felduntersuchung in neun Bürogebäuden.

Abb. 3 (rechts) zeigt Ergebnisse einer umfangreichen Felduntersuchung in neun Bürogebäuden in Deutschland, in der viele Fragen des Fragebogens bereits eingesetzt wurden. Beim Vergleich von Nutzerbewertung und Messwerten zeigt sich trotz der sehr großen Streuung der Messwerte der signifikante Zusammenhang zwischen der Helligkeitsbewertung der Nutzer und der Beleuchtungsstärke. Zum anderen zeigen sich große jahreszeitliche Unterschiede bei der Nutzerbewertung: Der Wertebereich, der im Sommer als weder hell noch dunkel empfunden wird, wird im Winter als sehr hell bewertet.

Aktuell wird der Fragebogen in einer Testraumuntersuchung zu Nutzerverhalten und -bewertung eingesetzt. Im ersten Untersuchungszeitraum mit 20 Probanden (ca. 250 Befragungen) traten keine Schwierigkeiten beim Verstehen und der Anwendung des Fragebogens auf.

4 Schlussbemerkung

Der Fragebogen kann bei den Autoren angefordert werden und steht auf der Web-Seite der LiTG zum Download bereit (<http://www.litg.de/Service/Links-und-Downloads.html>). Die EFI-Arbeitsgruppe freut sich über jede Anwendung des Fragebogens, ebenso über jede Rückmeldung. Nur so kann der Fragebogen weiterentwickelt werden.

5 Literatur

Bortz, J. & Döring, N. (2006). Forschungsmethoden und Evaluation. Für Human- und Sozialwissenschaftler (Springer-Lehrbuch, 4., überarbeitete Auflage). Heidelberg: Springer.

Fragebogen zur Bewertung einer Lichtsituation
 Sie haben sich bereit erklärt, an einer lichttechnischen Befragung teilzunehmen. Dafür danken wir Ihnen bereits jetzt.
 Wir bitten Sie, das Licht im Raum und am Arbeitsplatz zu bewerten. Die Aussagen sind in Form der folgenden Skala gegeben.
 (Beispiel)

Wie ist das **Weiter im Moment?**

trüb	<input type="checkbox"/>	sonnig	keine Angabe								
------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------	--------------

Die vorgegebenen Kriterien beschreiben gewissermaßen extreme Eindrücke. Auf der Skala zwischen diesen liegt irgendwo Ihr persönlicher Eindruck, den Sie bitte durch Ankreuzen kennzeichnen.

Wichtig ist dabei, dass Sie Ihren ganz persönlichen Eindruck wiedergeben. Dabei gibt es keine „richtigen“ und „falschen“ Angaben. In der Auswertung erfolgen keine Vergleiche zwischen einzelnen Testpersonen. Die Daten werden nur anonymisiert weiterverarbeitet.

Haben Sie noch Fragen?

1. Wie fühlen Sie sich **im Moment?**

unwohl	<input type="checkbox"/>	wohl	keine Angabe								
--------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	------	--------------

2. Wie empfinden Sie den **Raum**, in dem Sie arbeiten?

hässlich	<input type="checkbox"/>	schön	keine Angabe								
beengt	<input type="checkbox"/>	geräumig	<input type="checkbox"/>								
langweilig	<input type="checkbox"/>	interessant	<input type="checkbox"/>								

3. Wie zufrieden sind Sie mit der **Beleuchtung mit Tageslicht?**

sehr unzufrieden	<input type="checkbox"/>	sehr zufrieden	keine Angabe								
------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	----------------	--------------

4. Wie zufrieden sind Sie mit der **Beleuchtung mit Kunstlicht?**

sehr unzufrieden	<input type="checkbox"/>	sehr zufrieden	keine Angabe								
------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	----------------	--------------

Helligkeit

5. Wie empfinden Sie **im Moment** die Helligkeit an Ihrem **Arbeitsplatz?**

sehr dunkel	<input type="checkbox"/>	sehr hell	keine Angabe								
Ich hätte es lieber... deutlich dunkler	<input type="checkbox"/>	deutlich heller	<input type="checkbox"/>								

6. Wie empfinden Sie **im Moment** die Helligkeit an den **Wänden?**

sehr dunkel	<input type="checkbox"/>	sehr hell	keine Angabe								
Ich hätte es lieber... deutlich dunkler	<input type="checkbox"/>	deutlich heller	<input type="checkbox"/>								

7. Wie empfinden Sie **im Moment** die Helligkeit im **Raum insgesamt?**

sehr dunkel	<input type="checkbox"/>	sehr hell	keine Angabe								
Ich hätte es lieber... deutlich dunkler	<input type="checkbox"/>	deutlich heller	<input type="checkbox"/>								

8. Wie empfinden Sie die **Lichtverteilung** in Ihrem **Raum?**

sehr ungleichmäßig	<input type="checkbox"/>	sehr gleichmäßig	keine Angabe								
Ich hätte es lieber... deutlich ungleichmäßiger	<input type="checkbox"/>	deutlich gleichmäßiger	<input type="checkbox"/>								

Farbe

9. Wie empfinden Sie die **Lichtfarbe?**

sehr kalt	<input type="checkbox"/>	sehr warm	keine Angabe								
Ich hätte es lieber... deutlich kälter	<input type="checkbox"/>	deutlich wärmer	<input type="checkbox"/>								

10. Wie empfinden Sie die **Farbe der Gegenstände** im **Raum?**

sehr unnatürlich	<input type="checkbox"/>	sehr natürlich	keine Angabe								
------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	----------------	--------------

Abb. 4: LiTG-Fragebogen (Seiten 1 und 2)

Bedienbarkeit, Steuerung	
11. Wie zufrieden sind Sie mit der Bedienbarkeit Ihres Sonnenschutzes?	keine Angabe sehr unzufrieden <input type="checkbox"/> sehr zufrieden
12. Falls Ihr Raum mit einem automatisch gesteuerten Sonnenschutz ausgestattet ist, wie zufrieden sind Sie mit der automatischen Steuerung Ihres Sonnenschutzes?	keine Angabe sehr unzufrieden <input type="checkbox"/> sehr zufrieden
13. Wie zufrieden sind Sie mit der Bedienbarkeit der künstlichen Beleuchtung?	keine Angabe sehr unzufrieden <input type="checkbox"/> sehr zufrieden
14. Falls das Kunstlicht in Ihrem Raum automatisch gesteuert wird, wie zufrieden sind Sie mit der automatischen Steuerung der Beleuchtung?	keine Angabe sehr unzufrieden <input type="checkbox"/> sehr zufrieden
Reflexionen (Spiegelungen)	
15. Nehmen Sie im Moment Reflexionen auf dem Tisch oder auf Arbeitsmaterialien wahr?	keine Angabe deutlich wahrnehmbar <input type="checkbox"/> nicht wahrnehmbar Ich hätte lieber mehr Reflexionen <input type="checkbox"/> weniger Reflexionen
16. Nehmen Sie im Moment Reflexionen auf dem Bildschirm wahr?	keine Angabe deutlich wahrnehmbar <input type="checkbox"/> nicht wahrnehmbar
Blendung	
17. Wie häufig werden Sie im Allgemeinen in diesem Raum durch Tageslicht geblendet?	keine Angabe eigentlich immer <input type="checkbox"/> eigentlich nie

18. Nehmen Sie im Moment Blendung durch Tageslicht wahr?	keine Angabe nicht tolerierbar <input type="checkbox"/> nicht wahrnehmbar
19. Nehmen Sie im Moment Blendung durch Leuchten direkt wahr?	keine Angabe nicht tolerierbar <input type="checkbox"/> nicht wahrnehmbar
Zum Schluss	
20. Wie empfinden Sie den Blick aus Ihrem Fenster in dieser Jahreszeit?	keine Angabe unangenehm <input type="checkbox"/> angenehm
21. Wie zufrieden sind Sie mit der Beleuchtung Ihres Arbeitsplatzes in dieser Jahreszeit durch Tageslicht , wenn der Sonnenschutz offen ist?	keine Angabe sehr unzufrieden <input type="checkbox"/> sehr zufrieden Grund: _____
22. Wie zufrieden sind Sie mit der Beleuchtung Ihres Arbeitsplatzes durch Tageslicht , wenn der Sonnenschutz soweit geschlossen ist wie aus Ihrer Sicht erforderlich in dieser Jahreszeit?	keine Angabe sehr unzufrieden <input type="checkbox"/> sehr zufrieden Grund: _____
23. Nehmen Sie ein Flimmern der Beleuchtung wahr?	keine Angabe starkes Flimmern <input type="checkbox"/> kein Flimmern
24. Wie zufrieden sind Sie mit der Beleuchtung Ihres Arbeitsplatzes in dieser Jahreszeit durch Kunstlicht ?	keine Angabe sehr unzufrieden <input type="checkbox"/> sehr zufrieden Grund: _____
25. Nachdem Sie alle Fragen beantwortet haben, wie zufrieden sind Sie mit der allgemeinen Beleuchtungssituation in Ihrem Raum?	keine Angabe sehr unzufrieden <input type="checkbox"/> sehr zufrieden

Abb. 5: LiTG-Fragebogen (Seiten 3 und 4)

Das Buch „Beleuchtungstechnik – Grundlagen“ 2016

*Dipl.-Ing. Dirk, Seifert Kunsthochschule "Burg Giebichenstein", Halle
Prof. Meike Barfuß, Fachhochschule Südwestfalen, Hagen*

Aktuelle deutschsprachige Literatur für die Aus- und Weiterbildung

In einem Überblick wird kurz die aktuelle deutschsprachige Literatur für die Aus- und Weiterbildung auf dem Gebiet der Lichtenwendung und Beleuchtungstechnik vorgestellt

Da es speziell für die Ausbildung an Universitäten und Hochschulen kein allgemeines aktuelles Lehrbuch gab, wurde das häufig genutzte Buch Beleuchtungstechnik - Grundlagen (Baer, 2006) von einem größeren Autorenteam neu überarbeitet. Dies war dringend erforderlich da sich durch die Fortschritte in der LED-Technik vieles geändert hat.

Die Gruppe der sich regelmäßig im Rahmen der LiTG treffenden Hochschullehrenden wollte hier neben einigen wichtigen Grundlagen zum Thema weiterführende Literatur für die Aus- und Weiterbildung zusammenstellen.

Im Posterbeitrag wird auf wichtige Inhalte sowie die im Anhang befindlichen Arbeitshilfen hingewiesen.

Ziel

Das Ziel des Postervortrags ist es, einen Überblick über aktuelle Literatur im Bereich der Lichttechnik zu schaffen und wichtige Lehrinhalte zu Themen der Lichtenwendung und Beleuchtungstechnik sowie Abstimmung zu Lehrinhalten aufzuzeigen.

Beschreibung der Innovation

Durch die Teamarbeit beteiligter Hochschullehrender und eine breite Abstimmung konnte ein allgemeines Grundlagenwerk mit ersten praktischen Arbeitshilfen zusammengestellt werden.

Trotz Internet und der inzwischen verfügbaren Informationsflut ist ein gut verständliches Lehrbuch auch heute noch hilfreich. Daher wurde hier das Basiswissen kompakt zusammengefasst und kann so von unterschiedlichen Fachbereichen genutzt werden.

Damit ist es auch als Literaturquelle für Praktiker im Fachgebiet Lichtenwendung und Beleuchtungstechnik sowie in der beruflichen Weiterbildung einsetzbar.

The Book „Beleuchtungstechnik – Grundlagen“ 2016

*Dipl.-Ing. Dirk, Seifert Kunsthochschule "Burg Giebichenstein", Halle
Prof. Meike Barfuß, Fachhochschule Südwestfalen, Hagen*

Current German literature for Education and Training

Current German literature for education and training in lighting design and technology is presented in an overview.

Especially for university and college education in lighting there hasn't been a German state of the art textbook around for years. In fact the fundamentals of lighting including LEDs and all the changes they have brought with them could not be found in any German book so far. Therefore the well-known and most frequently used textbook "Beleuchtungstechnik – Grundlagen" (Baer, 2006) was revised and expanded by a larger group of authors.

The idea was born in a team of university and college lecturers within the LiTG, the German lighting society, who meet regularly discussing all matters of education and research in the field of lighting.

The poster presentation highlights the most important content of the book and some practical hints for light planning in its appendix.

Objectives

The objectives of the poster presentation are to give an overview of current literature of lighting technology and lighting applications as well as to identify important topics within this field.

Description of the innovation

Despite the internet and today's information overload a well understandable textbook is still useful. Thus the fundamentals of lighting design and technology have been summarized in a compact way ready for use by people with different background.

It can also be regarded as a source of literature for architects, craftsmen, students and lecturers working on lighting design, the planning of lighting systems as well as in continuing professional education.

Das Buch „Beleuchtungstechnik – Grundlagen“ 2016

*Dipl.-Ing. Dirk, Seifert Kunsthochschule "Burg Giebichenstein" Halle
Prof. Meike Barfuss, Fachhochschule Südwestfalen, Hagen*

Zusammenfassung/Summary

Es erfolgt eine kurze Literaturübersicht zu deutschsprachiger lichttechnischer Fachliteratur sowie die Vorstellung des aktuellen Fach- und Lehrbuches „Beleuchtungstechnik – Grundlagen“ im Rahmen eines Posterbeitrages.

Die Literatur zur Aus- und Weiterbildung bei lichttechnischen Fachthemen sollte beim Vermitteln von Grundlagenwissen gleichartige Bestandteile haben.

Das neu erarbeitete Lehrbuch kann hier eine wichtige Basis bilden.

1 Fachliteratur im deutschsprachigen Raum

Neben vielen Standardwerken, die zum Teil in Neuauflagen erschienen sind, gibt es auch Fachbücher mit einigen speziellen Themen, die die Lichtanwendung und Beleuchtungstechnik nicht nur streifen.

Tabelle 1 zeigt einen kleinen Überblick und erhebt natürlich keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die kleine Übersicht zeigt – es gibt klassische Grundlagenbücher, einige Literatur zu Spezialthemen jedoch kein aktuelles allgemeines Buch, welches sich als Lehrbuch für die speziell auch für die lichttechnische Universitäts- und Hochschulausbildung eignen könnte.

Zudem hat die rasante Entwicklung der LED die Lichttechnik in den letzten zehn Jahren maßgeblich verändert, so dass auch aus diesem Grund ein neues Lehrbuch dringend erforderlich ist. Auf Basis des anerkannten Werkes Beleuchtungstechnik - Grundlagen von Roland Baer entstand mit der 4. Auflage ein deutsches Lehrbuch, das von den Lichtlehrenden innerhalb der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft e.V. (LiTG) auf den aktuellen Stand der Technik gebracht wurde. Insbesondere die Themen LED, LED-Leuchten, Lichtsteuerung, Tageslicht, Lichtberechnungsprogramme werden z.T. erstmalig in einem deutschen Lehrbuch ausführlich behandelt.

Tab. 1 (folgende Seiten): Übersicht Fachliteratur, alphabetisch nach Autoren geordnet - diese wird auf der Internet-Seite der LiTG unter Bildung & Forschung
-> Fachliteratur regelmäßig aktualisiert.

Autor	Titel	Verlag / ISBN Nr.	Kurzkommentar
Baer, Roland	Praktische Beleuchtungstechnik	Verlag Technik Berlin 1999 / 3-341-01213-3	Grundlagenbuch
Baer, Roland & Andere	Beleuchtungstechnik Grundlagen	Verlag Technik Berlin 1996 (2.Auflage) / 3-341-01115-3	Grundlagenbuch Fortsetzung des VEM Handbuches
Baer, Roland & Andere	Beleuchtungstechnik Grundlagen	Huss Medien GmbH, Berlin 2006, 3. Auflage / 978-3-341-01497-4	Grundlagenbuch – wurde zur als Vorlage zur Überarbeitung genutzt
Baumgart, Müller, Zeugner	Farbgestaltung	Cornelsen Berlin, 1996 / 3-464-43401-x	Grundlagen zur Farbe
Bendin, Eckhard	Zur Farbelehre (Teil 1 Studien Modelle Texte)	Die Verlagsgesellschaft Dresden 2011 / 978-3-940418-42-5	Ein praktisches aktuelles Handbuch zum Thema Farbe – ein weiterer Teil bietet Experimente und Zusatzwissen
Buether, Axel	Farbe Entwurfgrundlagen Planungsstrategien Visuelle Kommunikation	Detail Praxis München 2014 / 978-3-920034-96-6	Kommunikationsgrundlagen und Gestaltungsansätze
Buschendorf, H.-G.	Licht und Beleuchtungstechnik Lexikon	Verlag Technik Berlin, 1. Aufl. 1989 / 3-341-00724-5	Fachbegriffe im Überblick – jedoch historisch zu sehen
Dohlus, Rainer	Lichtquellen	Walter De Gruyter GmbH / Oldenbourg 2014 / 9783110351316	Ein Fachbuch zu Lichtquellen auch mit moderneren Lichtquellen wie LED
Eckert, Martin	Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr	Verlag Technik Berlin / München 1993 / 3-341-01072-6	Der Klassiker zur Strassenbeleuchtung
Fischer, Udo	Tageslichttechnik	Rudolf Müller Köln 1982 / 3-481-12451-1	Der Klassiker zu Grundlagen der Berechnung von Tageslicht
Gall, Dietrich	Grundlagen der Lichttechnik, Kompendium	Pflaum Verlag München, 2004 / 3-7905-0923-x	Die Mathematik der Lichttechnik genau erläutert
Greule, Roland	Licht und Beleuchtung im Medienbereich	Carl Hanser München 2014 / 978-3446434790	Aktuelle Lichtenwendung im Bereich der Medientechnik
Heinz, Roland	Grundlagen der Lichterzeugung	HIGHLIGHT Verlagsges. mbH Rütihen / 978-3-937873-05-3	Praxisnahes Lichtquellenbuch
Hentschel, H.-J.	Licht und Beleuchtung	C.F. Müller/Hüthig, Heidelberg 1993 / 3-7785-2184-5	Klassiker unter den Lichttechnik Lehrbüchern
Irei, Hans (Herausg)	Wahrnehmungspsychologie Der Grundkurs	Springer Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2007 / 978-3827417664	Moderne Themen der Wahrnehmung – auch bei Licht
Keller, Max	Faszination Licht - Licht auf der Bühne	Prestel München, 2010 / 9783791343723	Wirklich faszinierende Darstellung von Licht auf Theaterbühnen
Khan, TQ und P. Bodrogi, Q. T. Vint, H. Winkler	LED Lighting Technology and Perception	Wiley VCH 2015 / 978-3527412129	Manchmal gibt es noch wenig in Deutsch wie hier das Thema LED Technologie zeigt

Autor	Titel	Verlag / ISBN Nr.	Kurzkommentar
Khanh, Tran Quoc und Peter Bodrog, Trinh Quang Vinh, Stefan Brückner	Farbwiedergabe von Konventionellen und Halbleiter Lichtquellen	Pflaum Verlag München 2013 / 978-3-7905-1032-4	LED und Farbe wissenschaftlich untersucht
Lange, Horst (SLG-LITG-LTAG-NSW)	Handbuch für Beleuchtung	Ecomed Landsberg 5. Auflage 1992 (62. Ergänzung Dez. 2013) / 978-3-609-75390-4	Umfangreichstes Werk als Loseblattsammlung mit Aktualisierungen
Lichtforum NRW / Dennis Köhler (Herausgeber)	LED 2014 – Beiträge zur Technologie	HIGHLIGHT Verlagsges. mbH Rülthen / 978-3-937873-06-0	Kleine Praxisnahe LED Kunde
Neufert (weitergef. v. Johannes Kister)	Bauentwurfslehre : Grundlagen, Normen, Vorschriften	Verlag Vieweg, Wiesbaden, 2005, 38. Auflage / 3-528-99651-X	Klassiker für Architekturausbildung, einige Anmerkungen zum Licht sind enthalten
Pracht, Klaus	Licht und Raumgestaltung - Beleuchtung als Element der Architekturplanung	C.F. Müller, Heidelberg, 1994 / 3-7880-7487-6	Fast historisches Grundlagenbuch, faszinierend die Handskizzen
Ris, Hans Rudolf	Beleuchtungstechnik für Praktiker Grundlagen, Lampen, Leuchten, Planung, Messung	VDE Verlag, 5. Auflage 2015 / 978-3-8007-3617-1	Praxisbezogenes Grundlagenbuch
Reid, Francis	Stage Lighting Handbook	Routledge London 2002 / 978-0878301478	Bühnenbeleuchtung – Englischer Klassiker
Schubert, E. / Fred	Light Emitting Diodes	Cambridge University Press 2006 / 978-0521865388	Grundlagen LED in Englisch
Sturm, Klein	Betriebsgeräte und Schaltungen für elektrische Lampen	Siemens AG 1992 / 3-8009-1586-3	Klassiker zu Schaltungen
Treitz, Norbert	Spiele mit Physik	Harri Deutsch Thun Frankfurt/M., 1996 / 978-3817114986	Enthält auch Licht- und Optik Experimente
Ulmann, Philippe P.	Licht Beleuchtung und Gestaltung	Projekte Verlag Cornelius GmbH Halle/S. 2000 / 978-3-86634-725-0	Grundlagen Lichtenanwendung und Gestaltung
Volger Laasch	Haustechnik - Grundlagen Planung Ausführung	B. G. Teubner Stuttgart 1994 (9. Auflage) / 3-519-02665-2	Auch Beleuchtung ist Teil der Gebäutechnik
Weis, Bruno	Industriebeleuchtung	Pflaum Verlag München 2000 / 3-7905-0762-8	Klassiker zu diesem Thema
Weis, Bruno / Kaiser, Johannes-Gerhard / Wittig, Norbert	Industriebeleuchtung Band 1 Grundlagen Vorschriften & 2 Errichtung Spezielle Anwendungen	Hüthig Verlag Heidelberg/München ab 09 2015 / 978-3-8101-0370-3 & 978-3-8101-0390-1	Aktualisiert und überarbeitet mit allem zum Thema Industriebeleuchtung
Zimmermann, Ralf	Lichttechnik Technik-Wörterbuch Englisch Deutsch Russisch Russisch	Verlag Technik Berlin 1989 / 978-3341007228	Das klassische Wörterbuch
Ziesenis / Lindemuth / Schmits	Beleuchtungstechnik für den Elektrofachmann - Lampen, Leuchten und ihre Anwendung	Hüthig Verlag Heidelberg/München 9. Auflage 2016 / 978-3-8101-0394-9	Klassiker – überarbeitet, kompakte Grundlagen für Praktiker

2 Das neue Buch „Beleuchtungstechnik – Grundlagen“

Die Gruppe der sich regelmäßig im Rahmen der LiTG treffenden Hochschullehrenden wollte hier neben einigen wichtigen Grundlagen zum Thema weiterführende Literatur für die Aus- und Weiterbildung zusammenstellen. Abb.1 zeigt den Titel des entstandenen Buches. Das Buch soll Lichtplanern sowie Lehrenden und Studierenden verschiedenster Fachrichtungen in Bachelor-, Master- und Diplom-Studiengängen an Universitäten und Fachhochschulen als Basis für Vorlesungen und Seminare in der Lichttechnik dienen. Auch für die Weiterbildung und in der beruflichen Praxis bietet die vorliegende Auflage ein gutes Rüstzeug.



Abb.1: Titel des entstandenen Buches

Inhalte des Buches:

- Lichttechnische und optische Grundlagen
- Grundlagen der Farbmimetrik
- Physiologische und psychologische Grundlagen
- Lichttechnische Berechnungen
- Lichttechnische Messungen
- Lichtquellen und Betriebsmittel, Elektronische Vorschaltgeräte
- Anorganische & organische Leuchtdioden
- Lichtsteuerung und Regelung:
- Leuchten: Elemente der Lichtlenkung, Leuchtenanforderungen und –prinzipien, Mechanische und elektrische Ausführung von Leuchten
- LED-Leuchten
- Beleuchtung mit Tageslicht

- Beleuchtungssysteme im Innenraum
- Beleuchtungssysteme im Außenraum

Unter der Herausgeberschaft LiTG konnte ein Autorenteam aus Lichtlehrenden und Industriepraktikern gewonnen werden, dem einige der führenden Köpfe der deutschen Lichttechnik angehören. Als Autoren waren unter anderem beteiligt:

Autoren:

Dr. Hartmut Billy, Osram

PD Dr.-Ing. Peter Bodrogi, TU Darmstadt

Dipl.-Ing. Wolfgang Cornelius, FVLR Dienstleistungs GmbH

Dr.-Ing. Peter Flesch, Osram

Dipl.-Ing. Cornelia Fürst, Osram

Prof. Dr.-Ing. Roland Greule, HAW-Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh, TU Darmstadt

Dr.-Ing. Martin Kirsten, Bära

Prof. Arch. Werner Osterhaus, Aarhus University, Dänemark

Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Herbert Plischke, Hochschule München

Dipl.- Ing. Uwe Rabenstein, Ingenieurbüro für Lichtlösungen Leipzig

Prof. Dr.-Ing. Alexander Rosemann, TU Eindhoven

Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz, TU Ilmenau

Dipl.-Ing. Hans-Georg Schmidt, RZB-Leuchten

Dipl.-Ing. Stefan Söllner, LiTG

Dr. Armin Sperling, PTB

Dr.-Ing. Cornelia Vandahl, TU Ilmenau

Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker, TU Berlin

Als zusätzliche Fachlektoren waren dabei: Dr. Matthias Hessling, Prof. Dr. Paola Belloni, Prof. Dr.-Ing. Horst Riechert, Dr. Felix Serick, Prof. Mathias Wambsganß, Prof. Dr.-Ing. Paul W. Schmits und Dipl.-Ing. Christoph Heyen. In Herausgeberfunktion, als Autoren und Fachlektoren waren Prof. Meike Barfuß, FH Südwestfalen und Dipl. Ing. Dirk Seifert, Philips tätig.

Durch die Teamarbeit beteiligter Hochschullehrender und eine breite Abstimmung konnte ein allgemeines Grundlagenwerk zusammengestellt werden mit ersten praktischen Arbeitshilfen. Trotz Internet und der inzwischen verfügbaren Informationsflut wurde hier das Basiswissen kompakt zusammengefasst und kann von unterschiedlichen Fachbereichen genutzt werden.

Damit ist es auch als Literaturquelle für Praktiker im Fachgebiet Lichtanwendung und Beleuchtungstechnik sowie in der beruflichen Weiterbildung einsetzbar.

Eine Zukunftslösung für die bedürfnisgerechte Beleuchtung des öffentlichen Raums (Smart Lighting)

Jörg Haller M.Eng.

Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ), Zürich, Schweiz

Stv. Vorsitzender FG 51 Schweizer Lichtgesellschaft (SLG)

joerg.haller@ekz.ch

Kurzfassung

Bis heute wurden Beleuchtungsprojekte im öffentlichen Raum in der Regel statisch geplant. Um den geltenden Normen gerecht zu werden, basierte die Planung auf Maximalwerten der Umgebungsparameter: also auf dem maximalen Verkehrsaufkommen und auf besonders ungünstigen Lichtverhältnissen. Das führte in der Folge zu subjektiv überbeleuchteten Strassen und zu einem erhöhten Energiebedarf.

Die neue europäische Norm für Strassenbeleuchtung EN 13201 ermöglicht es nun, die Beleuchtung im öffentlichen Raum dynamisch den Umgebungsbedingungen anzupassen. Neueste LED-, Sensorik- und Kommunikationstechnologien unterstützen und beschleunigen die Umsetzung solcher Lösungen.

Die Fachabteilung Beleuchtung der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ) testet seit 2012 diverse Ansätze für eine bedürfnisgerechtere Steuerung und Regelung des Lichts im öffentlichen Raum. Beim hier vorgestellten Ansatz, handelt es sich um ein Pilotprojekt, welches erstmals die Vorteile von zeit- und sensorbasierten Steuerungssystemen vereint. Im Rahmen des Pilotversuchs konnte nicht nur die Lichtimmission deutlich reduziert, sondern auch der Energieverbrauch um bis zu 40 Prozent gesenkt werden.

Pioneering solution for dynamic public lighting

Jörg Haller M.Eng.

Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ), Zürich, Schweiz

Stv. Vorsitzender FG 51 Schweizer Lichtgesellschaft (SLG)

joerg.haller@ekz.ch

Abstract

To date, public lighting projects are mainly planned statically. In order to meet applicable standards, planning is based on maximum values of environmental parameters: i.e. on maximum traffic volume and adverse lighting conditions. This subsequently has led to over-illuminated streets and increased energy consumption.

The revised European standard for street lighting EN 13201 now allows for dynamic adaptation of the public lighting to ambient conditions. The implementation of such solutions is supported and facilitated by the latest LED, sensor and communication technologies.

Since 2012, the public lighting department of Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ) has been testing various approaches to control public lighting dynamically. The pilot project presented here combines the advantages of time and sensor-based control systems for the first time. The project resulted not only in significant reduction of light immissions, but also in energy consumption reduced by up to 40 percent.

Eine Zukunftslösung für die bedürfnisgerechte Beleuchtung des öffentlichen Raums (Smart Lighting)

Jörg Haller M.Eng.

Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ), Zürich, Schweiz

Stv. Vorsitzender FG 51 Schweizer Lichtgesellschaft (SLG)

joerg.haller@ekz.ch

Zusammenfassung

Bisher dimensionierte man die Beleuchtung des öffentlichen Raums statisch auf die Maximalwerte der Umgebungsparameter: also auf besonders viel Verkehr und besonders ungünstige Lichtverhältnisse. Die normativen Rahmenbedingungen sowie die technischen Möglichkeiten erlaubten es nur sehr eingeschränkt, die Beleuchtung den wechselnden Umgebungsbedingungen anzupassen.

Erfahrungen mit diversen Sensorlösungen und Kommunikationstechnologien sowie die Neufassung der europäischen Norm für Strassenbeleuchtung EN 13201 ermöglichen diese Art der bedürfnisgerechten Beleuchtung.

Die Fachabteilung Beleuchtung der EKZ testet seit 2012 diverse Ansätze für eine bedürfnisgerechtere Steuerung und Regelung des Lichts im öffentlichen Raum.

Der neu vorgestellte Ansatz verfolgt eine vollständig verkehrsabhängige Regelung des Lichtniveaus. Eine entsprechende Anlage ist seit September 2015 im Raum Zürich in Betrieb.

1 Ausgangslage und Idee

Ausgangspunkt für dieses Pilotprojekt war die Abnahme einer neuen LED-Beleuchtung an einer Zufahrtstrasse nach Zürich. Während der „Rush-hour“ reißt sich hier Fahrzeug an Fahrzeug. Insbesondere bei schlechten Witterungsverhältnissen benötigt es eine gute Beleuchtung, beispielsweise im Bereich der Fussgängerstreifen, um die Fussgänger rechtzeitig erkennen zu können. In den späteren Abendstunden ist die Strasse in der Regel fast leer, die neue nach Norm geplante LED-Beleuchtung wirkt dadurch sehr dominant.

In der Schweiz sind solche unerwünschten Lichtmissionen ein viel diskutiertes Thema. Anlass zu Diskussionen im Bereich der öffentlichen Beleuchtung geben vor allem subjektiv zu stark beleuchtete Strassen sowie unerwünschte Fassadenaufhellungen. Unnötiges Licht führt zudem zu einem erhöhten Energiebedarf und damit verbunden zu höheren Kosten und CO₂-Emissionen.

Mit der Überarbeitung der EN 13201 welche explizit eine Absenkung des Lichtniveaus in Abhängigkeit des Verkehrsflusses ermöglicht, entstand so die Idee, eine Lichtregelung zu entwickeln, welche die Beleuchtung laufend und ohne Beeinträchtigung der Anwohner den Umgebungsbedingungen anpasst. Neueste LED-, Sensorik- und Kommunikationstechnologien bieten hierzu auch erstmals die entsprechenden Möglichkeiten.

2 Erfahrung mit „intelligenten“ Beleuchtungsteuerungen im Vorfeld

2.1 Rückblick

Im Jahr 2008 führte man bereits erste Versuche mit passiven Infrarotsensoren (PIR) an Strassenleuchten durch. Dies mit dem Ziel, entlegene Wege nur dann zu beleuchten, wenn Fussgänger diese auch nutzen. Die Erfolge waren bescheiden, da eine Vernetzung nur sehr eingeschränkt möglich war und zahlreiche unerwünschte Auslösungen der Sensoren – beispielsweise durch Tiere – erfolgten. Teilweise lösten die Sensoren aber auch zu spät oder gar nicht aus. Bis zum Jahr 2012 lag der Fokus dann zunächst auf der LED-Technologie als neue Lichtquelle in der öffentlichen Beleuchtung und auf einfachen zeitbasierten Steuerungssystemen



Im Jahr 2012 wurden an Wegen und wenig befahrenen Strassen erste Versuche mit neuen Steuerungssystemen durchgeführt, welche als „intelligente Beleuchtung“ vermarktet wurden. Die Leuchten wurden hierfür mit PIR-Sensoren ausgestattet und via verschiedener Funktechnologien vernetzt. Erstmals konnten Einschaltswelle, Einschaltdauer und das Zusammenspiel von Leuchten in beliebiger Art und Weise vor Ort parametrierbar werden. An Orten mit Fussgängern und Radfahrern machte man hiermit gute Erfahrungen. Eine zuverlässige Detektion von schnellen Fahrzeugen war jedoch weiterhin nicht möglich.

Abb. 1: Luftaufnahme einer sensorgesteuerten Anlage mit vorausleuchtendem Licht

Deshalb wurde im Jahr 2014 der schweizweit erste Versuch einer Steuerung mit Radarsensoren an einer Hauptstrasse durchgeführt. Jede Leuchte wurde hierfür mit einem Radarsensor und einem Funkkommunikationsmodul ausgestattet. Das Pilotsystem zeigte gute Ergebnisse im Bereich der Detektion von Fahrzeugen und reagierte zuverlässig und schnell. Dennoch erwiesen sich diese Systeme für Kernzonen und dicht besiedelte Räume als nur bedingt geeignet. Bemängelt wurden insbesondere die sehr dynamischen Schaltvorgänge bei unmittelbar angrenzenden Wohnhäusern und bei hohen Verkehrsfrequenzen sowie die Komplexität der korrekten Erfassung bei verzweigten Verkehrssituationen. Zwischenzeitlich sind zahlreiche derartige Systeme im Einsatz. Im Fokus steht hierbei meist nicht alleine der Energieeffizienz-Gedanke sondern vor allem auch der Wunsch nach einer bedürfnisgerechten Beleuchtung.

Aus diesen Erfahrungen entstand die Idee einer kombinierten Lichtregelung. Die Vorteile der zeitbasierten Steuerung und jene der sensorbasierten, dynamischen Systeme sollten also verknüpft werden. Gleichzeitig sollten Nachteile, wie eine zu starke und damit störende Dynamik oder die mangelnde Fähigkeit sich Umgebungsvariablen anzupassen, eliminiert werden.

2.2 Neuer Ansatz: umgebungs- und verkehrsabhängige Beleuchtung (Smart Lighting)

Die umgebungs- und verkehrsabhängige Lichtregelung bildet 1:1 die neuen Möglichkeiten der Norm SN 13201 ab und regelt die Beleuchtung in Abhängigkeit des Verkehrsflusses. Sie verknüpft so die Vorteile zeitbasierter und dynamischer Beleuchtungssteuerungen. Somit arbeitet die Beleuchtung nur noch zu Hauptverkehrszeiten mit maximaler Helligkeit. Die restliche Zeit leuchtet sie – natürlich abhängig von Verkehrsaufkommen und Umgebungslicht – um 1 bis 2 Beleuchtungsklassen reduziert.

Allerdings kann man auch in diesem Zusammenhang erst sehr bedingt von einer „intelligenten Beleuchtung“ sprechen. Da es sich um kein selbstlernendes System handelt. Diese Lösung ist jedoch bereits deutlich näher an einer wirklich intelligenten Beleuchtung.

Vielmehr kann man hier von einer echten Smart City-Lösung sprechen, da die Systeme verschiedener Gewerke miteinander kommunizieren und interagieren.

3 Normgerechte Beleuchtung

Die Neufassung der Beleuchtungsnorm EN 13021 ermöglicht mit ändernden Umgebungsbedingungen auch eine Anpassung der Beleuchtungsklasse. Im folgenden Beispiel kann die Beleuchtung dank sinkender Verkehrsflüsse zu gewissen Zeiten um bis zu zwei Beleuchtungsklassen reduziert werden.

				Wert V_w	$\Delta t1$	$\Delta t2$	$\Delta t3$	$\Delta t4$	$\Delta t5$
Verkehrsvolumen Istwert, stündliches Volumen		Hochleistungs- (HLS) und >2-spurige Hauptstrassen (HS)	2-spurige Haupt- (HS), Verbindungs- (VS), Sammel- (SS) und Erschliessungsstrassen (ES)						
	hoch	>65% des maximal stündlichen Verkehrsvolumens	>45% des maximal stündlichen Verkehrsvolumens	0	0				0
	mässig	35% - 65% des maximal stündlichen Verkehrsvolumens	15% - 45% des maximal stündlichen Verkehrsvolumens	-1		-1		-1	
	tief	< 35% des maximal stündlichen Verkehrsvolumens	< 15% des maximal stündlichen Verkehrsvolumens	-2			-2		
Beleuchtungsklasse für Beispielstrasse					M4	M5	M6	M5	M4

Abb. 2: Beispiel für eine Anpassung der Beleuchtungsklassen in Abhängigkeit des Verkehrsvolumens

4 Pilotprojekt: Verkehrsflussabhängige Lichtregelung

4.1 Situation / Umsetzung

Das Pilotprojekt der EKZ erstreckt sich auf einer etwa 1 Kilometer langen Ortsdurchfahrt, die gleichzeitig Autobahn-Umgehungsstrecke und Zufahrtsstrasse zur Stadt Zürich ist. Auf der Strecke wird vor allem Durchgangsverkehr registriert. Es gibt kaum Abflüsse in Seitenstrassen oder Abzweigungen. Deshalb wurde die Strecke als prädestiniert für den Pilotversuch erachtet.

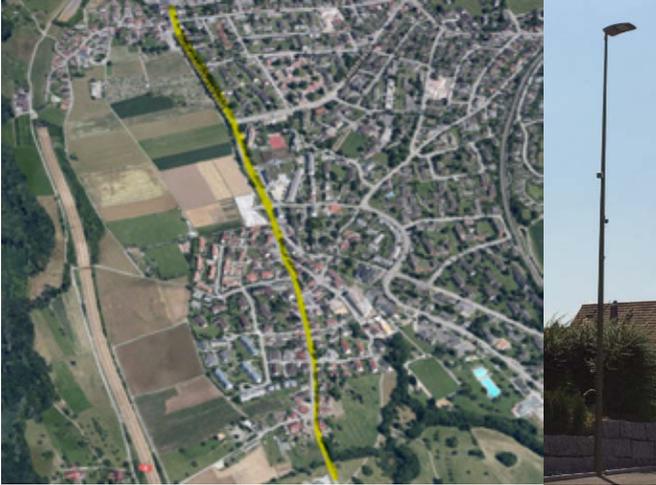


Abb. 3: Luftaufnahme der Pilotstrecke / Leuchte mit Sensor

4.2 Verkehrszählung

Das Verkehrsaufkommen wird in Echtzeit erfasst. Ein an einem Kandelaber angebrachter Videosensor zählt die Fahrzeuge in je einem Messfeld pro Fahrbahn (Bild) und überträgt die Zählsignale dann an eine zentrale Steuerungslogik.



Abb. 4: Verkehrs-Sensor und Messfeld

4.3 Steuerungslogik

Als Bindeglied zwischen Verkehrszählung und Beleuchtungsregelung wertet eine Steuerungslogik die Zählimpulse aus. Dazu werden laufend die aktuellen Verkehrsdaten mit den eingestellten Grenzwerten verglichen. Daraus resultiert die momentane normgerechte Beleuchtungsstufe, die an die Lichtsteuerung übertragen wird. Diese wiederum sendet per Funk das entsprechende Gruppensignal an die Leuchten. Somit passt sich die Beleuchtungsklasse der Strassenbeleuchtung laufend normgerecht dem Verkehrsvolumen an.

Die Steuerungslogik zeichnet die Zählimpulse auf. Mit Hilfe dieser Daten ist die Funktionalität der Anlage in der Folge überprüfbar. Die Analyse der Daten ermöglicht es, schlüssige Aussagen über die Nützlichkeit einer verkehrsvolumenabhängigen Steuerung zu formulieren. Untergebracht ist die Steuerung der Pilotanlage mit Segmentkontroller und Logiksteuerung in einer Trafostation.

4.4 Beleuchtungssteuerung

Die Leuchten und die zentrale Regelungseinheit kommunizieren per Funksignal. Das System erlaubt es, die Beleuchtung der Strasse zeit- und sensorgesteuert einzustellen. Dazu ist jede Leuchte einzeln adressiert und die Leuchten sind in Gruppen zusammengefasst. Somit können Leuchten im Bereich von Fußgängerstreifen getrennt von den restlichen Leuchten gesteuert werden. Dies ist massgebend für die normgerechte Beleuchtung und die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer.

4.5 Erfahrungen / Ergebnisse

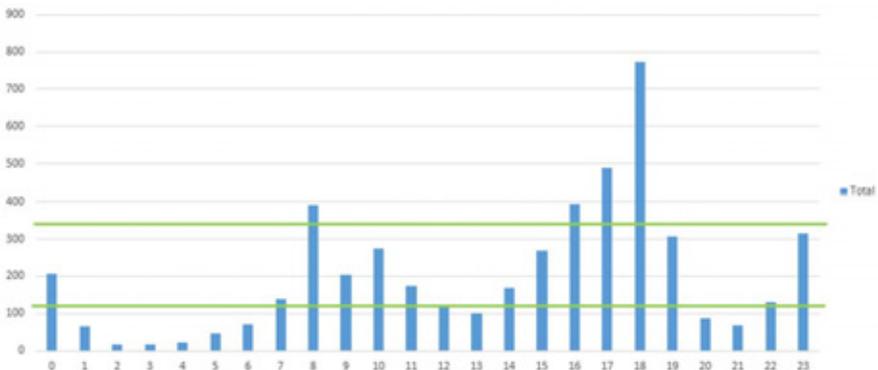


Abb. 5: Gemessene Stundenwerte für Verkehrszahlen eines ausgewählten Tages und Dimmstufen (grün)

Das Beispiel aus dem Pilotprojekt zeigt: Nur während rund einer Stunde morgens (8 Uhr bis 9 Uhr) und während dreier Stunden abends (16 Uhr bis 19 Uhr)läuft die Beleuchtung auf dem höchsten Niveau. Bereits gegen 19 Uhr ist es im Beispiel möglich, die Beleuchtung um eine Beleuchtungsklasse abzusenken. Gegen 20 Uhr konnte die Beleuchtung bereits um eine weitere Beleuchtungsklasse reduziert werden.

Die Verkehrszählung war den ganzen Tag aktiv, die Beleuchtung wurde wie üblich zur Dämmerung ein- und ausgeschaltet.

Interessant zu beobachten ist hierbei die Entwicklung des Verkehrsflusses um 22 Uhr. Dieser nimmt an diesem Tag nochmals deutlich zu und die Beleuchtung regelt wieder eine Beleuchtungsklasse nach oben. Dies ist ein Argument für den Einsatz eines „intelligenten Systems“ gegenüber dem statischen Programmieren zeitabhängiger Dimmstufen.

Die Energieeinsparung bei diesem Projekt beträgt bisher rund 30 Prozent. An der Teststrecke befinden sich mehrere Fussgängerstreifen. In diesen Bereichen wird die Beleuchtungsklasse nicht verkehrabhängig abgesenkt. Würden die Leuchten in diesen Bereichen ebenfalls gesteuert, resultierte sogar eine Einsparung im Bereich von 40 Prozent.

Diese Art Lichtregelung ist vor allem für dicht besiedelte Gebiete prädestiniert und für Gebiete, wo die Verkehrsströme stark variieren. An wenig besiedelten Orten und Orten mit niedrigen Verkehrsfrequenzen kann eine Beleuchtung mit einzelnen Sensoren an der Leuchte zweckmässiger sein.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die umgebungsabhängige Regelung des Lichtniveaus ist das Zukunftsmodell der öffentlichen Beleuchtung und bietet insbesondere für dicht besiedelte Räume völlig neue Möglichkeiten. Dieser Ansatz verknüpft im Rahmen einer echten Smart City- Lösung bestehende Infrastrukturen miteinander.

Der Verkehrsfluss ist hierbei nur ein Faktor. Weitere Faktoren wie beispielsweise die Umgebungsbeleuchtung können ebenfalls eingebunden werden.

Diese Art der Lichtregelung bietet nicht nur eine Möglichkeit Lichtimmissionen, Energieverbrauch und CO₂-Emissionen zu reduzieren und somit die Umwelt zu entlasten. Auch Komfort und Lebensqualität der Bevölkerung könnten verbessert werden. Denn eine kostenbedingte vollständige Abschaltung der Beleuchtung in Siedlungsräumen wäre in vielen Fällen nicht mehr nötig.

An Fußgängerstreifen ist hierbei ein sehr sorgsamer Umgang bei der Veränderung des Lichtniveaus geboten. Bei allen Pilotprojekten wurde bisher der Grundsatz verfolgt, die Beleuchtung im Bereich von Fussgängerstreifen nie unter den Normwert abzusenken.

Eine technische Herausforderungen wird es sein, zukünftig verschiedene Strassen- und Sektoren sinnvoll zu erfassen und entsprechend zu steuern. Insbesondere bei stark verzweigten Verkehrsräumen dürfte sich dies als anspruchsvoll erweisen.

Als Hindernisse für neue Ansätze der Lichtsteuerung erweisen sich heute vor allem noch fehlende Kommunikationsstandards bei den Produkten verschiedenen Anbieter sowie die Zusammenarbeit verschiedener Fachgebiete. Sie sind die Basis für intelligent verknüpfte Städte und eine moderne Infrastruktur.

Licht über Wien – Eine vollständige Vogelperspektive

Dr. Günther Wuchterl

Verein Kuffner-Sternwarte und IDA Österreich

1160 Wien, Johann Staud Straße 10

Nächtliche Satelliten-Bilder etablierten Licht als das Symbol der globalen Zivilisation. Die neueste Generation, des VIIRS/DNB auf SUOMI/NPP und der ISS erlauben kalibrierte, farbspezifische Aussagen über nationale und regionale Energie- und Lichtstrom Verteilungen.

Aussagen zu Quellen und Richtungsabhängigkeit, sind aber begrenzt durch Auflösung und Orbits. Konventionelle Luftbilder bei Nacht bieten ausreichende Auflösung beschränken aber die Empfindlichkeit und erreichen nur einen kleinen Abstrahl-Winkelbereich um den Nadir.

Wir präsentieren eine neue Methode die mittels eines Spiralfuges 85% des Streuvolumens für alle urbanen Licht-Quellen hoch-effizient erfasst. Die Fern-Diagnostik auch abgeblendeter Leuchten und das Monitoring bei Systemwechseln werden demonstriert.

In Kombination mit bodengebundenen Licht-Messnetzen erlaubt dass erstmals die Erfassung eines Energie- und Kohlenstoff-Budgets des Lichtstroms einer Stadt mit hoher Vollständigkeit.

Die dazu erforderlichen hoch-aufgelösten, synoptischen Luftbilder hoher Dynamik (18 Lichtwerte) bieten völlig neue Perspektiven auf den Charakter und die Verteilungen des Wiener Stadtlichts, seine Effizienz und Suffizienz.

Außenlichtkonzept Hambacher Schloss

Benkert B., Dipl.- Ing., Urbane Lichtkonzepte, Karlsruhe, www.urbane-lichtkonzepte.de

Problemstellung

Entwicklung und Realisierung eines Lichtkonzepts für eine weithin sichtbare bedeutende Landmark mitten im Naturschutzgebiet.

Ziel

Integration von gegensätzlichen Anforderungen an eine Fassadenbeleuchtung: genug Helligkeit zur Wiedererkennung der Schlossanlage über kilometerweite Fernansichten, gleichzeitig zurückgenommenes Licht und Detailbeleuchtungen für atmosphärische Nahansichten und das umgebende Naturschutzgebiet Pfälzer Wald sollte trotzdem dunkel bleiben.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Das Hambacher Schloss liegt weithin sichtbar am Rande des Haardtwaldes auf einem exponierten Hügel am Rande der Rheinebene nahe der Stadt Neustadt an der Weinstraße. Der Haardtwald ist Teil eines ausgedehnten, grenzüberschreitenden Biosphärenreservat Pfälzerwald-Vosges du Nord. Das Hambacher Schloss wurde zum nationalen Denkmal aufgrund des Hambacher Festes im Jahre 1832. Das Fest war ein Meilenstein der frühen deutschen Demokratiebewegung das zum jetzigen Nationalstad Bundesrepublik Deutschland führte. Die Kombination aus dieser bedeutungsvollen Anlage und die Lage im Naturpark erforderten Beleuchtungslösungen mit Fingerspitzengefühl: Wie hell muss eine Fassade erstrahlen, damit man sie noch in 5 oder 20 km Entfernung sieht?

Es gibt dafür Standardantworten, die ich bei dem Objekt über Bord geworfen habe. Die Besonderheiten des Ortes ermöglichten Lösungen, die nun der Wiege der Deutschen Fahne auf den Leib geschneidert sind. Es gelingt der Spagat von: Hell und Dunkel, Grundsilhouette und schönem Detail und dunkel ruhendem Wald. Unterschiedliche Beleuchtungsarten ermöglichen die Wiedererkennung der Burg aus der Rheinebene. Durch den Einsatz einer zusätzlichen Lichtsprache werden die besonderen Reize der Burgruinen fein inszeniert.

Jedoch waren die Umgebungsbedingungen auch von Vorteil: in stockdunkler Umgebung vom Pfälzer Wald konnte die Helligkeit der Fassade insgesamt niedrig angesetzt werden. Das führte u.a. zur stolzen Energieeinsparung von 80 % zur vorangegangenen Fassadenbeleuchtung und zu einer malerisch inszenierten Anlage. Mein Vortrag stellt dar, wie ich mit gestalterischen und technischen Maßnahmen die komplexe Aufgabe gelöst habe.

Realisierungsgrad

Das Außenlichtkonzept wurde Oktober 2015 eröffnet. Ca. 90 % der Lichtanlage ist damit verwirklicht. Im Jahr 2016 wird die Beleuchtung der Haupttreppe innerhalb der Ringmauern begleitend während ihrer Sanierung realisiert. Die Weiterführung des Lichtkonzepts in der Burgstraße und auf dem neugestalteten Busparkplatz befindet sich aktuell in Planung.

Outdoor Lighting Concept Hambacher Schloss

Benkert B., Dipl.- Ing., Urbane Lichtkonzepte, Karlsruhe, www.urbane-lichtkonzepte.de

Issue

To develop and realize a Lighting concept for a highly visible landmark inside a nature reserve.

Aim

Integration of conflicting facade and outdoor lighting requirements: sufficient brightness to recognize the Castle from several kilometers distance, and at the same time subdued light and detailed lighting for atmospheric close up views, and darkness for the surrounding nature reserve Pfälzer Wald.

Description of the innovation /»best practice«

The Hambach Castle is visible from a far distance and is located on the edge of the Haardt Forest on an exposed hill on the edge of the upper Rhine River plains near the town of Neustadt an der Weinstraße. The Haardt Forest is part of a broad, cross-border biosphere reserve of Palatinate forest-Vosges du Nord. The Hambach Castle became a national monument because of the Hambach Festival in 1832. The Festival was a milestone of the early German democracy movement leading to the current Federal Republic of Germany. A lot of keen sense is necessary to find lighting solutions for both: a significant site and the location in the natural park: how bright must a facade be illuminated so that it can still be seen from 5 or 20 km distance? There are standard answers for this object, which I intentionally did not apply. The special features of the place makes solutions possible that are especially created for the cradle of the German flag. The balancing act works between: light and dark, basic silhouette and beautiful detail and dark calm wood. The Castle can be recognized from the Rhine Valley through different types of lighting. By using an additional light language the special charm of the castle ruins are staged finely graduated.

However, the environmental conditions were also advantageous: in the pitch dark Palatinate Forest, the brightness of the facade could be planned on a low level. This led to the substantial energy savings of 80% compared to the previous facade lighting and led to a scenic staged site. My report shows how I solved the complex task by means of design and technical measures.

Level of realization

The outdoor lighting concept was inaugurated in October 2015. Approximately 90% of the lighting system is thus carried out. In 2016, the lighting of the main stairs inside the curtain walls is realized at the same time as the restoration of the stairs. The continuation of the lighting concept in the castle street, and on the newly designed bus parking is currently in planning.

Außenlichtkonzept Hambacher Schloss – Das Lichtkonzept für einen frequentierten Ort im Naturschutzgebiet

Barbara Benkert, Dipl.- Ing., Urbane Lichtkonzepte, Karlsruhe, Alter Schlachthof 3, 76131 Karlsruhe, info@urbane-lichtkonzepte.de

Zusammenfassung

Seit Herbst 2015 ist das Hambacher Schloss und seine Parkanlage mit einem neuen Außenlichtkonzept erhellt. Es ist ein bedeutendes nationales Denkmal auf einem weithin sichtbaren Hügel am Rande der Oberrheinebene bei Neustadt an der Weinstraße. Die im 19. Jhd. schlossartig ausgebaute Burg steht für die frühe Demokratiebewegung Deutschlands. Der touristisch stark frequentierte Ort mit Europäischem *Kulturerbe*-Siegel liegt im 3.018 km² großen UNESCO-Biosphärenreservat Pfälzer Wald und Nordvogesen. Das Lichtbüro Urbane Lichtkonzepte entwickelte ein Lichtkonzept, das sowohl hohe repräsentative Anforderungen mit umfangreichen Naturschutzmaßnahmen verbindet. Der Vortrag zeigt Planung und Umsetzung unter dem Aspekt naturverträglicher Beleuchtung auf.

1 Zum Pfälzer Wald

"Biosphärenreservate sind Modellregionen für den Schutz der biologischen Vielfalt und das Bemühen, die Erhaltung der biologischen Ressourcen mit ihrer nachhaltigen Nutzung in Einklang zu bringen" (Zitat aus: <http://www.pfaelzerwald.de/biodiversitaet/>). Edelkastanien, Buchen, Fichten und Kiefern wachsen im Pfälzer Wald. Charakteristisch und bedeutsam für den Tourismus sind über 100 Burgen und imposante Sandsteinfelsen, die neben vielen Höhlen Lebensraum für seltene Tier- und Pflanzenarten (darunter z.B. Wildkatzen, Luchse, Greifvögel und Fledermäuse) bieten.



Abb. 1: Ostansicht Hambacher Schloss der neuen Beleuchtung (Foto.|Licht Klaus Storch DGPh, Altena)

2 Zum Hambacher Schloss: Wiege der deutschen Demokratie

Das Hambacher Schloss wurde zum nationalen Denkmal aufgrund des Hambacher Festes im Jahre 1832. Die viertägige Protestveranstaltung mit etwa 30.000 Menschen war ein Meilenstein der frühen deutschen Demokratiebewegung, die zum jetzigen Nationalstadt Bundesrepublik Deutschland führte.

Die Anlage wurde ab 1980 als Museum ausgebaut mit Dauerausstellungen zur deutschen Demokratiegeschichte, und nach und nach seit 2006 für private und öffentliche Veranstaltungen und als nationaler Tagungsort weiterentwickelt. Die Sanierung des Schlosses und Neubauten vom bekannten Schweizer Architekten Prof. Dudler vervollständigen das Schlossensemble. Eine der historisch ersten deutschen Fahnen wird im Museum aufbewahrt. Das Hambacher Fest und seine fünf Fahnen sind im Bewusstsein der Region tief verankert. Das Gebäude ist sozusagen der „Augapfel der Pfalz“ und nicht nur der Pfälzer: 2015 wurde das Hambacher Schloss zum Europäischen Kulturerbe erklärt.

2013 waren die Planungen zur Erneuerung der Außenanlagen vom Büro Latz Riehl und Partner im vollen Gange. Parallel dazu sollte ein neues Lichtkonzept entwickelt werden vom Büro Urbane Lichtkonzepte in Karlsruhe. Nicht nur für die Denkmalbehörde ist das Hambacher Schloss von großem Interesse, auch wegen der Lage im Biosphärenreservat forderte die Naturschutzbehörde von Neustadt a.d.W. zur Baugenehmigung 2014 eine umfangreiche Naturschutzbilanz des Lichtkonzepts. 2015 waren die wichtigsten Teile des Konzepts realisiert und wurden am 6. Oktober feierlich eröffnet.

3 Wie erstellt man eine Naturschutzbilanz für ein Außenlichtkonzept?

Ergebnislose Recherchen nach Vorbildern und damals aktuell gültigen Veröffentlichungen führte zur Entwicklung der individuellen Naturschutzbilanz für das Hambacher Schloss.

Als Grundlage für die Naturschutzbilanz diente der Vergleich von Faktoren von Beleuchtungsarten, die sich positiv oder negativ auf Tiere und Pflanzen auswirken.

Dabei war es von Vorteil, dass das Gebäude und der Park seit den 1980iger Jahren beleuchtet wurden. Zehn Stück heiße Halogen-Flutlichtstrahler zu 1000 Watt und rundum streuende Kugelleuchten sind leicht zu verbessern. Allerdings waren die wenigen Kugelleuchten mit sparsamen 20 Watt Energiesparlampen bestückt und es waren nur zehn Leuchtstellen mit Halogenstrahlern um das Schloss verteilt zu finden.

3.1 Auf wen konzentriert sich die Naturschutzbilanz?

Tausende von Pflanzen- und Tierarten leben im Pfälzer Wald. Wer ist wie betroffen? Schwerpunkt als unterstes Glied der Nahrungskette sind die Insekten: Wie können diese durch Beleuchtungen betroffen werden: z.B. Tod als Folge von Erschöpfung durch stundenlanges Fliegen im Lichtkegel, Verbrennung durch heiße Oberflächen. Sie werden in Lichtkegeln Fraßopfer für andere Tiere.

Daneben sind unterhalb des Hambacher Schlosses seltene Spechtarten heimisch, deshalb war der zweite Schwerpunkt der Schutz der Vögel: Sie leiden durch störende Lichtquellen: unter geringerem Nahrungsangebot, die Schlafplätze werden zu hell, daraus können Irritationen im Verhalten und im Biorhythmus entstehen. Mögliche Blendung im Überflug verursacht Orientierungsprobleme.

Fledermäuse reagieren auch auf Beleuchtungsanlagen. Sie sind am Hambacher Schloss aber aufgrund der jahrelangen Sanierungs- und Baumaßnahmen selten anzutreffen. Ihre Nahrungssuche ist vorübergehend leichter, langfristig aber wird das Nahrungsangebot geringer, sie verschlafen die Nahrungssuche, wenn die Schlafplätze erhellt werden und zeigen Verhaltensänderungen, und Fledermäuse können elektrische Betriebsgeräte hören!

Anhand der nachfolgenden Faktoren der Beleuchtung habe ich in der Naturschutzbilanz zwischen die alte und die geplante Beleuchtungsanlage verglichen:

- Anzahl der Leuchtstellen
- Lichtstrom, der auf den Boden fällt
- Lichtstrom, der in den Himmel abgegeben wird
- Lichtstrom in kurzer/mittlerer/großer Distanz zur beleuchteten Fläche, wobei kurze Distanzen eine kleineres "Einfangvolumen" für Insekten bedeuten.
- beleuchtete Bodenfläche allgemein
- maskierte Leuchten/unmaskierte Leuchten. Maskierte Leuchten filtern das Licht, das über das Ziel hinausschießen würde weg.
- Beleuchtungszeit (bedeutet die Zeit der Lichtimmission)
- Beleuchtungsintensität nach Beleuchtungsklassen (bedeutet eine berechenbare und damit vergleichbare Lichtintensität)
- Oberflächentemperatur der Leuchten (über und unter 60°C). Über 60° C verbrennen sich Insekten durch Berührung der Leuchten.
- Lichtfarbe (kälter oder wärmer). Wärmere Lichtfarben ziehen tendenziell weniger Insektenarten an.
- Lichtspektrum mit und ohne UV-Licht (hat großen Einfluss auf die Anziehungsattraktivität für Insekten)
- Abdichtung der Leuchten nach Schutzart. Insekten kriechen in die Leuchten und verbrennen oder verdursten, wenn sie nicht mehr herausfinden.
- Lichtrichtung: Licht zum Himmel abgestrahlt hat einen größeren Wirkungsbereich. Licht zum Boden gerichtet breitet sich weniger weit aus. Horizontal geführtes Licht kann große "einfangende Lichtvolumen" erzeugen.
- Hitzeentwicklung der Leuchtmittel im Verhältnis zur Leistung
- Energieverbrauch (bedeutet sekundärer Natur- und Kulturschutz, wenn der Klimawandel aufgehalten werden kann).

Für mich als Gestalterin, stellte sich die Frage, wie ich aus vielfältigen planerischen und technischen Möglichkeiten eine rechnerische Bilanz erstellen kann. Welcher Faktor in der Naturschutzbilanz ist wie zu gewichten, und wie setzt man diese in Verhältnisse zueinander? Folgendes Vorgehen habe ich gewählt: aufgebaut in drei Bewertungsebenen wird die Beleuchtung schrittweise verglichen und in abstrahierte "Rechengrößen" gewandelt. Die Wegebeleuchtung und die Fassadenbeleuchtung habe ich getrennt

voneinander bewertet, weil: die Wegebeleuchtung folgt der Beleuchtungsnorm Din En 13201 und ist zur Sicherheit in öffentlichen Bereichen erforderlich und dadurch in unserer rechtsgesteuerten Welt unverzichtbar. Die Fassadenbeleuchtung hat repräsentativen Charakter und wird aus kulturellen Gründen angewendet und ist freier in der Ausführung.

3.2 Beschreibung der Bewertungsebenen der Naturschutzbilanz

In der ersten Bewertungsebene erfolgt der direkte Vergleich der Beleuchtungsfaktoren vom Bestand und der neuen Planung. In der zweiten Bewertungsebene findet der quantitative Vergleich der Zwischenergebnisse miteinander statt. Und in der dritten Bewertungsebene wird der quantitative, abstrahierte Vergleich der Verbesserungen bzw. der Verschlechterungen zu einer positiven oder negativen Endsumme gegenübergestellt. Aufgrund der planerischen Möglichkeiten und, der im Vergleich zu 1980 technischen Neuerungen, fiel das Ergebnis der Bilanz zu Gunsten der neuen Beleuchtung eindeutig positiv aus bezogen auf die Lichteinwirkung auf die beiden Schwerpunktgruppen Insekten und Vögel:

Wegebeleuchtung: 400 Punkte Verbesserung zu 180 Punkten Verschlechterung

Fassadenbeleuchtung: 1070 Punkte Verbesserung zu 180 Punkten Verschlechterung.

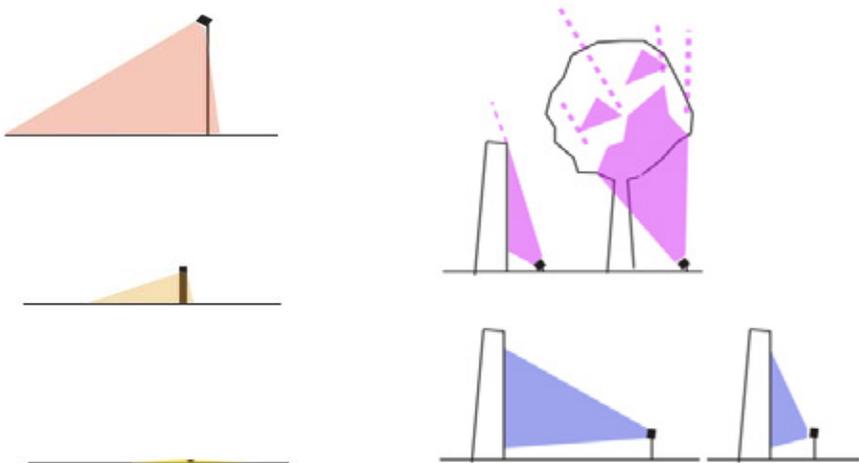


Abb. 2: Darstellung Lichtrichtungen mit resultierendem Lichtvolumen und potentieller Lichtemission

4 Licht-Bildung der Entscheider

Die Fortbildungsfrequenz der Naturschutzbehörden halten nach meiner Beobachtung nicht mit dem aktuellen technischen Fortschritt der Beleuchtungshersteller mit. Die Posten der Naturschutzbehörden sind sparsam besetzt. Wenige Personen müssen sehr große Gebiete und vielfältige Bereiche abarbeiten. Die Personen sind in der Regel Biologen und keine Lichtexperten. Die Angebote für Fortbildungen die Licht und Naturschutz betreffen sind rar. Das führt zur kuriosen Situation, dass ich als Planer gleichzeitig den Entscheider bilde, d. h. auf den neuesten Stand bringe, damit dieser meine Bilanz verstehen kann.

5 Welche Bedingungen schränken die naturschonende Beleuchtung ein:

Als Lichtdesigner, der dem Auftraggeber verpflichtet ist, bedient man eine Doppelrolle: Eine bessere, exaktere Lichttechnik kostet mehr als konventionelle HIT-Leuchten. Ein Beispiel (Stand 2013): ein einfacher Fassadenstrahler um die 100 Watt kostete ab 200 €. Ein vergleichbarer LED-Strahler ca. 1.000 €, und ein einzelner Lichtprojektor mit Justierung liegt im fünfstelligen Bereich. Neuere Bestandleuchten mussten ins Lichtkonzept eingebunden werden. Man kann in öffentlichen Vorhaben keine zwei Jahre alte Lichtpoller entsorgen. Die Neuauflage dieser Poller wurde aber lichttechnisch verbessert. Technische Beschränkungen wirken sich aus: nicht alle Anwendungen sind mit LEDs möglich, d.h. u. U. noch ineffizient oder noch nicht ausgereift (z.B. bei leistungsstarken Lichtprojektoren).

Daneben kann die gute Gestaltungsabsicht ein Gegenpol zum Naturschutz werden:

Kleine Lichtvolumen sind für den Naturschutz von Vorteil, aber: die Montage direkt am Gebäude sieht hässlich aus und kann es beschädigen und mit dem Denkmalschutz kollidieren. Das für den Naturschutz unbefriedigende Streiflicht ist ein sehr wirkungsvolles und schönes Gestaltungselement. Es zeigt sehr schön die Materialstrukturen und bildet Mauerreliefs sehr gut ab. Für die Fernsicht, die Landmark auf dem Hügel, braucht man mehr Helligkeit als für die Nahsicht. Daneben müssen Leuchtstellen mit der Nutzung abgestimmt werden. Zum Beispiel können Leuchten im gebäudenahen, fußläufigen Bereich die Fußgänger blenden.

Sicherheitsaspekte gehen vor: wo Fußgänger und Fahrzeuge zusammentreffen ist eine besonders gute Übersicht, und das bedeutet Helligkeit, herzustellen.

6 Mit welchen Maßnahmen konnte ich die gute Naturbilanz herstellen:

Alle Wegeleuchten geben kein Licht nach oben ab und sind mit UV-losem LED-Licht ausgerüstet. Nicht jeder Weg wurde beleuchtet. Der Ruinenweg ist nachts von oben einsehbar, und muss nicht begangen werden. Die dem Wald zugewandten Fassadenbereiche bleiben dunkel. Durch einen Abschaltplan für das ganze Gelände wird reduziert

das Licht stufenweise in den späten Nachtstunden auf die notwendigen Bereiche der Fernsicht reduziert. Die Fassadenbeleuchtung zieht sich nachts zwiebelschalenartig zurück. Die Verwendung von zwei Licht-"Sprachen" ermöglicht es große Teile der Anlage sparsam zu beleuchten: es handelt sich um die Gestaltungsbereiche: auflösende Ruinen-Lichtakzente und vollständig darstellendes Licht für die intakten Schlossbereiche der Fernsicht. Die gestalterischen Licht-"Sprachen" sind äquivalent zu zwei Lichttechniken: sehr sparsam eingesetztes Streiflicht für die Ruinen und exakt beleuchtende (maskierte) Lichtprojektoren beleuchten das Schloss vollständig. Für die Fernsicht habe ich nur sieben statt der üblichen 30 Lux verwendet. Die total dunkle Umgebung des Waldes macht es möglich.

Und für die Pfälzer das wichtigste: „DAS“ Symbol für das Hambacher Fest ist die Fahne, die auf dem Hauptturm weht. Sie ist das Zentrum und der hellste Bereich der Beleuchtungsanlage und dieser ist positiv für die Naturschutzbilanz: ein sehr kleiner Bereich. Durch die Abstufung der Helligkeit zum umgebenden Wald bleibt die Natur bestmöglich im Dunkeln gehalten.



Abb. 3: sparsame Ruinenlichtakzente treffen auf das flächige Projektorenlicht an der Südfassade
(Foto: Stephan Baumann bild_raum, Karlsruhe)

DIN 67528 „Beleuchtung von öffentlichen Parkbauten und öffentlichen Parkplätzen“. Die neue Norm und die lichttechnischen und -planerischen Hintergründe.

Thomas Klimiont

DIN FNL 4-11, ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Siteco Beleuchtungstechnik GmbH

Alle in dem Text/Vortrag vorgestellten Inhalte sind vorbehaltlich einer endgültigen Genehmigung durch den DIN Fachnormungsausschuss und den europäischen Normungsgremien!

Die neue Norm E DIN 67528 normt öffentliche Parkbauten sowie öffentliche Parkplätze und steht im Gegensatz zu der Beleuchtung von Parkplätzen und Parkgaragen von Arbeitsstätten, die in der DIN EN 12464-1 (Arbeitsstätten in Innenräumen) und in DIN EN 12464-2 (Arbeitsplätze im Freien) genormt werden. Diese Parkplätze und Parkgaragen, die von Arbeitnehmern genutzt werden, sind Bestandteil des Arbeitsweges und damit hat der Arbeitgeber eine gewisse Verkehrssicherungspflicht.

Team – Arbeitskreis NA 058-00-04-11 AK

Die Beteiligten an diesem Normungsarbeitskreis, kommen alle aus dem Bereich der Wirtschaft und dennoch aus sehr unterschiedlichen Interessensgebieten. Der Arbeitskreis besteht aus freien Planern, aus Planern für Generalunternehmer, aus Mitarbeitern von Leuchtenhersteller unterschiedlicher Fachabteilungen (Entwicklung, Marketing, Applikation, Vertrieb) und aus Betreibern von Parkbauten und Parkplätzen.

Jeder Beteiligte hat einen ganz eigenen Blick auf das Licht.

Initiiert wurde dieser Normungsausschuss durch den Bundesverband Parken e.V., der wiederum den Blick des Betreibers auf die Beleuchtung in einem Parkhaus oder einen Parkplatz hat. Hier treten vor allem die wirtschaftlichen Gesichtspunkte in den Vordergrund, denn die Beleuchtung ist der größte Kostenfaktor in den modernen Parkbauten.

Inhalt

- Ist-Stand (DIN EN 12464-1/-2)
- Abgrenzung zur europäischen Normung von Arbeitsstätten DIN EN 12464-1/-2
Keine Doppelnormung in Europa!
- Analyse
 - Sehen und Erkennen hat 4 Mindestvoraussetzungen
 - Sehaufgaben bzw. Tätigkeiten in Parkbauten
 - Status der Beleuchtungstechnik
- Umsetzung
 - Definition der Bewertungsfelder
 - Richtwerte
 - Messung der Beleuchtung
- Fazit

Ist-Stand: DIN EN 12464-1

Die bis dato genutzte Norm für die Parkbauten ist die DIN EN 12464-1 Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen. Hier werden in den Tabellen die Art des Innenraum(bereich)s, des Bereichs der Sehaufgabe oder des Bereichs der Tätigkeit aufgelistet und mit entsprechenden Werten für den Wartungswert der mittleren Beleuchtungsstärke (\bar{E}_m) hinterlegt. Zusätzlich werden der Blendungsindex (UGR_L), die Gleichmäßigkeit (U_o) und der Farbwiedergabewert (R_a) festgelegt.

Ist-Stand: DIN EN 12464-2

DIN EN 12464-2 Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 2: Arbeitsplätze im Freien:

Eine ähnliche Darstellung wird auch für den Außenbereich zugrunde gelegt. Auch hier werden die Werte für den Wartungswert der mittleren Beleuchtungsstärke (\bar{E}_m), die Gleichmäßigkeit (U_o) und der Farbwiedergabewert (R_a) festgelegt. In der Außenbeleuchtung wird für die Blendung der CIE Blendungswert (R_G)–Methode eingeführt. Der R_G -Wert der Beleuchtungsanlage darf den R_{GL} -Wert nicht überschreiten.

Besonderes Augenmerk möchte ich hier auf die Tatsache lenken, dass bei beiden Normen in allen Bereichen die horizontale Beleuchtungsstärke am Boden als die ausschlaggebende Größe definiert ist.

Abgrenzung zur europäischen Normung von Arbeitsstätten DIN EN 12464-1/-2

Parkplätze und Parkbauten sind Verkehrsbauwerke; sie dienen dem ruhenden Verkehr. Diese Norm gilt nicht für Parkplätze und Parkbauten in Arbeitsstätten.

Also sind Parkplätze und Parkbauten eindeutig keine Arbeitsstätten und müssen daher anders betrachtet werden.

Zusätzlich möchte hier aber noch darauf aufmerksam machen, dass die Beleuchtung durch Tageslicht, künstliches Licht oder eine Kombination von beiden erfolgen kann.

Analyse: Sehaufgaben bzw. Tätigkeiten - Allgemein

Grundsätzlich gilt in der Beleuchtungstechnik (Verkehr, Arbeitsstätte), dass das Sehen und Erkennen vier Mindestvoraussetzungen hat:

1. Leuchtdichte - Helligkeit
Zum Sehen von Objekten bedarf es einer **Mindestleuchtdichte** (Adaptationsleuchtdichte).
Objekte, die am hellen Tag mühelos auch im Detail zu erkennen sind, verschwimmen in der Dämmerung und sind im Dunkeln schließlich nicht mehr wahrnehmbar.
2. Kontrast
Um ein Objekt erkennen zu können, muss es einen Helligkeitsunterschied gegenüber der unmittelbaren Umgebung aufweisen (**Mindestkontrast**).
In der Regel sind dies gleichzeitig ein Farbkontrast und ein Leuchtdichtekontrast.
3. Größe
Objekte müssen eine **Mindestgröße** haben.

4. Zeit - Geschwindigkeit

Für die Wahrnehmung bedarf es einer **Mindestzeit**. Ein Geschoss z. B. ist viel zu schnell. Langsam anlaufende Räder sind im Detail zu erkennen, bei höheren Umdrehungen werden sie immer undeutlicher.

Die Beleuchtungstechnik hat die Aufgabe, aufgrund der Kenntnis der physiologisch optischen Eigenschaften des Auges – z. B. durch hohe Leuchtdichte und Leuchtdichtegleichmäßigkeit im Gesichtsfeld – gute Sehbedingungen zu schaffen.

Übersetzt heißt das auch, je kleiner Objekte sind bzw. je schneller sie sich bewegen, aber auch umso mehr Gefahrenstellen, die eine entsprechende Reaktionszeit fordern, vorhanden sind, desto heller sollte die Beleuchtung sein.

Analyse: Sehaufgaben bzw. Tätigkeiten in Parkbauten

Bei der Analyse der Sehaufgaben und Tätigkeiten fällt sofort auf, dass alle Sehaufgaben sich in der Vertikalen befinden. Das heißt, man braucht Helligkeit in der Vertikalen!

Die DIN EN 12464 bewertet jedoch ausschließlich horizontale Beleuchtungsstärkewerte am Boden. Das bedeutet, es wird eine indirekte Beeinflussung der vertikalen Beleuchtungsstärken und Helligkeiten durch die Festlegung auf horizontale Beleuchtungsstärkewerte vorausgesetzt. Diese Herangehensweise wurde durch die bisherige konventionelle Leuchtentechnik getragen und hatte ihre Berechtigung.

Analyse: Status der Beleuchtungstechnik

Den Status der Beleuchtungstechnik und deren treibende Kräfte betrachten:

- Betriebskosten von Parkbauten sollen verringert werden.
Die Beleuchtung ist der größte Kostenfaktor.
Die aktuellen Normen geben (vermeintlich) zu hohe Beleuchtungsstärken vor und wurden als Kostentreiber ausfindig gemacht.
- **Licht Effizient Designen - LED**
Es werden neue LED-Leuchten konzipiert, die das Licht gezielt und mit sehr hoher Gleichmäßigkeit auf den Boden verteilen.
Vertikale Beleuchtungsstärken gehen verloren, da nicht gefordert!
Energieeffizienz und geringe Stromkosten werden groß geschrieben, ein größeres Anfangsinvestment amortisiert sich in kurzer Zeit.
- Die Reduzierung von Streulicht bei offenen Parkbauten wird immer wichtiger.
Die Klagen der Anwohner werden immer häufiger.
Vertikale Beleuchtungsstärken werden minimiert!

Ergebnis:

Bei all den neuen Bestrebungen und der neuen digitalen Lichttechnik (LED) bleibt die Beleuchtungsqualität auf der Strecke!

Umsetzung E DIN 67528

Umsetzung der E DIN 67528:

- Alle Doppelnormungen wurden vermieden.
Das hat Auswirkungen auf die Parkplätze (Außenbereich). Hier wurde gänzlich auf die DIN EN 13201 verwiesen, da hier die Parkplätze hinreichend beschrieben und die Richtwerte für die Beleuchtung definiert wurden.
- Die Bewertungsfelder wurden neu festgelegt.
- Bei den Richtwerten wurde der neuen digitalen Beleuchtungstechnik (LED) Rechnung getragen und erstmalig die Wartungswerte der vertikalen Beleuchtungsstärke als Richtwerte definiert.
Hierdurch erhält man direkten Einfluss auf die Beleuchtungsqualität!
- Blendungsbegrenzung
- Hinweise für Planung und Ausführung sollen die Vergleichbarkeit der Anlagen erleichtern und eine Mindestqualität festlegen.
 - Realistische Reflexionsgrade (Vergleichbarkeit)
 - Reduzierung Lichtimmission (Randbereich, zusätzliche Hinweise)
 - Lichtsteuerung (Schlüssel zu noch mehr Energieeffizienz)
- Durchführung Messung (vereinfachter Nachweis)

Definition der Bewertungsfelder

Es wurde ein Randbereich definiert, der zwei Auswirkungen bzw. Funktionen für die Ausgestaltung Beleuchtung hat bzw. erfüllt.

1. Kein Licht wird dort definiert, wo man keines braucht
2. Dies erleichtert den Schutz der Lichtimmission

ANMERKUNG: Die Größe des Randbereiches entspricht in etwa dem Abstand von der Begrenzungswand bis zur Lage des Außenspiegels eines Fahrzeuges.

Die Bewertung der vertikalen Beleuchtungsstärken in der Abstellfläche erfolgt auf einer vertikalen Referenzfläche über alle Abstellflächen. Diese befindet sich 1,5 m von der Fahrgasse und umfasst Berechnungspunkte in 0,8 m, 1,2 m und 1,6 m Höhe mit einem Rasterpunktabstand von 0,4 m. Der Mittelwert muss mindestens dem in Tabelle 1 spezifizierten Wert entsprechen.

Die Bewertung der zylindrischen Beleuchtungsstärken in der Fahrgasse erfolgt auf einer horizontalen Referenzfläche über die gesamte Fahrgasse in einer Höhe von 1,2 m. Der Mittelwert muss mindestens dem in Tabelle 1 spezifizierten Wert entsprechen.

Richtwerte

Tabelle 1 — Richtwerte für die Beleuchtung von Parkbauten

Art der Verkehrsfläche	Wartungswerte der Beleuchtungsstärken			Gleichmäßigkeit U_0
	Mittlere vertikale Beleuchtungsstärke	Mittlere zylindrische Beleuchtungsstärke	Mittlere horizontale Beleuchtungsstärke	
	lx	lx	lx	
Ein- und Ausfahrtzonen (nachts)	-	-	50	0,40
Ein- und Ausfahrtzonen (am Tag)	-	-	300	0,40
Fahrgasse und Fußwege	-	50	-	0,40
Abstellflächen	50a	-	-	0,20
Treppenhäuser	-	-	100	0,40
Kassenbereiche	-	-	100	0,40
Sonstige Bereiche b	-	-	1	-
a Vertikale Beleuchtungsstärke in Richtung der Fahrgasse b Bereiche außerhalb der Nutzflächen				

Messung der Beleuchtung

Die Messung der Beleuchtung erfolgt für Parkbauten nach DIN 5035-6 und Parkplätze nach DIN EN 13201-4.

Hier soll ein vereinfachtes Messverfahren dem Planer an die Hand gegeben werden, um die Beleuchtungsplanung (-Berechnung) einfach und schnell verifizieren zu können.

Fazit

- Die Einführung neuer Lichttechnologien, z.B. LED, erfordert erneutes Hinterfragen der Sehaufgaben und der damit zu erreichenden Qualität der Beleuchtung.
- Immer präziser gelenktes Licht (LED) erfordert eine klare Definition der Beleuchtung und dessen Kennwerte.

Einfluss der Anordnung von strukturierten LED-Leuchten auf die Lesbarkeit von bedruckten Papieren und Tablet-PCs

Funke, C.¹, Vandahl, C.¹, Dingeldein, K.-U.², Junghans, B.², Schierz, Ch.¹

¹ TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau, D

² Zumtobel Lighting GmbH, Schweizer Str. 30, 6851 Dornbirn, AT

Problemstellung und Forschungsfragen

Bei Büroarbeitsplätzen spielt die Kontrastwiedergabe eine wichtige Rolle. Zur Beschreibung der Kontrastwiedergabe wurde in den 80er Jahren das CRF-Verfahren (Contrast Rendering Factor) entwickelt. Seitdem haben sich sowohl Sehaufgaben als auch technische Messmittel verändert, sodass eine Erneuerung des CRF-Verfahrens angestrebt wird. Mittels Leuchtdichtemesskameras (LMK) ist es mittlerweile möglich, auch CRF-Werte orts aufgelöst zu messen. Dafür wird ein hinreichend großer Reflexionsstandard benötigt, welcher die heute typischen Sehaufgaben am Arbeitsplatz repräsentiert.

Stand der Wissenschaft/Technik

In bisherigen Arbeiten der Autoren wurde bereits ein geeigneter Reflexionsstandard geschaffen und mit den Eigenschaften heutiger Sehaufgaben (Kopierpapier, Zeitschriften, Tablets) verglichen. Der neue Standard muss durch Probandenversuche validiert werden.

Forschungshypothesen

- Die CRF-Werte mit dem neuen Reflexionsstandard und der LMK korrelieren mit den wahrgenommenen Kontrasten am Büroarbeitsplatz, da sich die Reflexionseigenschaften des neuen Standards mit denen des Brüel & Kjaer-Standards decken.
- Bei hochglänzenden Tablets werden LED-Leuchten mit hohen Kontrasten innerhalb der Leuchte störender als Leuchten mit homogener Leuchtdichtestruktur beurteilt, bei bedruckten Papieren sind beide durch die diffusen Anteile des Papiers gleich störend.
- Pendel- und Stehleuchten mit hohen Kontrasten werden bei hochglänzenden Tablets störender als entsprechende Deckenleuchten wahrgenommen, da sie sich näher an der Reflexionsoberfläche befinden.

Versuchsaufbau

Die Versuche wurden in einem büroähnlichen Raum mit 11 handelsüblichen Decken-, Pendel- und Stehleuchten bei 500 lx, 650 lx und 1000 lx mit 30 Probanden durchgeführt. Dabei wurden bisherige Arbeiten [Jentsch et al. in Licht-Forschung 1984] berücksichtigt.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Im Wesentlichen konnten alle drei Hypothesen bei allen Beleuchtungsstärken in Übereinstimmung mit [CIE-Schrift 19.2; Jentsch 1984] bestätigt werden. Bei bedrucktem Kopierpapier wurde die Lesbarkeit fast unabhängig vom gemessenen CRF-Wert beurteilt. Bei Zeitschriftenpapier und Tablets ist das erneuerte CRF-Verfahren jedoch gut geeignet zur Beurteilung der Lesbarkeit in Innenräumen mit strukturierten LED-Leuchten.

Impact of the arrangement of non-uniform LED luminaires on the readability on printed papers and tablets

Funke, C.¹, Vandahl, C.¹, Dingeldein, K.-U.², Junghans, B.², Schierz, Ch.¹

¹ TU Ilmenau, Lighting Engineering Group, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau, D

² Zumtobel Lighting GmbH, Schweizer Str. 30, 6851 Dornbirn, AT

Research issue

At office work places, contrast rendering plays an important role. In order to describe the contrast rendering, in the 1980s the CRF procedure (contrast rendering factor) was developed. Since then, the visual tasks as well as the measurement equipment have changed. Hence, renewal of the CRF procedure is aimed. Using imaging luminance measurement devices (ILMD), meanwhile it is possible to measure CRF values spatially resolved. For that, a sufficient sized reflection standard is necessary, which represents today's typical visual tasks.

State of science/technology

In previous works of the authors already developed a suitable reflection standard and it compared with the properties of current visual tasks (copy paper, journals and tablets). The new standard yet has to be validated within psychometric studies.

Research hypotheses

- The CRF values measured with the new reflection standard and ILMD correlate well with the perceived contrasts at an office work place, because the reflection characteristics of the new standard match with those of the Brüel & Kjaer-Standard.
- On glossy tablets, highly non-uniform LED luminaires are judged more disturbing than uniform luminaires. On printed papers, both luminaire types are perceived equally disturbing because of the diffuse structure of the paper.
- Highly non-uniform pendant and free-standing luminaires are perceived more disturbing on glossy tablets than corresponding ceiling luminaires, because they are located more closely to the reflection surface.

Experimental setup

The tests were conducted by 31 subjects in an office-like test room with 11 commercially available ceiling, pendant and free-standing luminaires. The horizontal illuminance has been kept constant at 500 lx, 650 lx and 1000 lx respectively. For the study concept, previous studies [Jentsch et al. in Licht-Forschung 1984] were considered.

Results in comparison with previous findings

Basically, all three research hypotheses were verified at all horizontal illuminances in agreement with [CIE-report 19.2; Jentsch 1984]. On printed copy paper, the readability was nearly independent from the measured CRF-value. In contrast, on journal papers and tablets the new CRF procedure is appropriate to predict the readability in indoor environments with non-uniform LED luminaires.

Einfluss der Anordnung von strukturierten LED-Leuchten auf die Lesbarkeit von bedruckten Papieren und Tablet-PCs

Funke, C.¹, Vandahl, C.¹, Dingeldein, K.-U.², Junghans, B.², Schierz, Ch.¹

¹ TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau, D

² Zumtobel Lighting GmbH, Schweizer Str. 30, 6851 Dornbirn, AT

Zusammenfassung

Bei Büroarbeitsplätzen spielt die Kontrastwiedergabe eine wichtige Rolle. Zur Beschreibung der Kontrastwiedergabe wurde in den 80er Jahren das CRF-Verfahren (Contrast Rendering Factor) entwickelt. Mittels Leuchtdichtemesskameras (LMK) ist es mittlerweile möglich, CRF-Werte ortsaufgelöst zu messen. Dafür wird ein hinreichend großer Reflexionsstandard benötigt, welcher die heute typischen Sehaufgaben am Arbeitsplatz (z. B. Kopierpapier, Zeitschriften, Tablets) repräsentiert. Ein solcher Standard wurde in vorangegangenen Arbeiten geschaffen. Im vorliegenden Beitrag wurde der neue Standard mittels Probandenstudien validiert. Dabei wurden insbesondere für Zeitschriften und Tablet-PCs eine gute Korrelation von Lesbarkeitsurteilen und gemessenen CRF-Werten beobachtet. Bei bedrucktem Kopierpapier waren die Lesbarkeitsurteile fast unabhängig von den ermittelten CRF-Werten.

1 Einführung – Der Kontrastwiedergabefaktor CRF

Der Einsatz von gerichtetem Licht hat nicht nur Vorteile: Die Kontrastwiedergabe z. B. auf glänzenden Materialien (Zeitschriften, Tablett-PCs, Smartphones, Computerausdrucken) kann in bestimmten Beleuchtungssituationen deutlich reduziert sein (vgl. Abb. 1). Daher ist es notwendig, diese Behinderung des Sehvorgangs messtechnisch zu erfassen und zu bewerten. Der Kontrast wird aus den Leuchtdichten von Sehdetail L_o und dessen unmittelbarer Umgebung L_u bestimmt:

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

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] mit dem Kontrastwiedergabefaktor CRF ein Gütemerkmal angegeben:

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

In dieser Gleichung ist C der Kontrast der Sehaufgabe bei der aktuellen Beleuchtung und C_o der Kontrast bei einer diffusen Beleuchtung. Der CRF-Wert korreliert gut mit der empfundenen Kontrastwahrnehmung bei verschiedenen Beleuchtungssituationen [2].

2 Ziel der Untersuchung

Die bisherige Bewertungsmethode für Kontrastwiedergabe soll für LED-Beleuchtungsanlagen und moderne Sehaufgaben angepasst und in der Praxis eingeführt werden. In früheren Untersuchungen [3; 4] konnte gezeigt werden, dass das CRF-Verfahren auch mit einer LMK anstatt des Brüel & Kjaer-Leuchtdichte-Messgeräts durch-

geführt werden kann. Um den gesamten Bereich mit einem Bild messen zu können, benötigt man jedoch einen ausreichend großen Reflexionsstandard, mit welchem man die Kontrastwiedergabe für verschiedene Sehaufgaben ableiten kann. Derartige Reflexionsnormale sind derzeit nicht am Markt verfügbar, wurden jedoch in früheren Untersuchungen [5; 6; 7] hergestellt (vgl. Abb. 2).



Abb. 1: Kontrastminderung (Foto: I. Herzog)

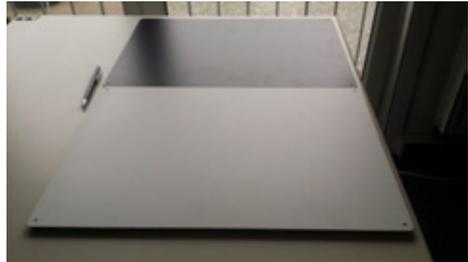


Abb. 2: Foto des neuen Reflexionsstandards

Es fanden bereits einige Vorarbeiten zur Auswahl und Validierung neuer Reflexionsnormale für das neue Messverfahren statt. Die eigentliche neue Messmethodik mittels Leuchtdichtemesskamera wurde aber noch nicht untersucht, ebenfalls sind neue Grenzwerte für die Anwendung der neuen CRF-Werte noch nicht ermittelt worden. Die Validierung der Messmethodik sowie die Bestimmung der CRF-Grenzwerte wurden deshalb im Rahmen einer Probandenstudie durchgeführt.

3 Eigenschaften des neuen Reflexionsstandards

Die Schaffung eines neuen Reflexionsstandards ist für die einheitliche Bewertung der Kontrastwiedergabe entscheidend. An den neuen Reflexionsstandard (bestehend aus einem weißen und einem schwarzen Reflexionsnormal) wurden verschiedene praktische und messtechnische Anforderungen gestellt [8; 9]. Die hergestellten neuen Reflexionsnormale (vgl. Abb. 2) wurden in zahlreichen Messungen mit dem Brüel & Kjaer-Reflexionsstandard und anderen typischen Sehaufgaben verglichen. Darunter waren neben handelsüblichem Kopierpapier auch hochglänzende Papiere. Außerdem wurden die Leuchtdichtefaktoren und CRF-Werte für ein Smartphone (maximale Helligkeit und Bildschirm dunkel) aufgezeichnet. Der neue Reflexionsstandard ist zwar etwas matter als der Brüel & Kjaer-Standard, jedoch decken sich die CRF-Werte sehr gut und liegen zwischen dem matten Kopierpapier und den hochglänzenden Proben [7]. Der neue Reflexionsstandard kann gemäß [5] folgendermaßen hergestellt werden: Als Trägermaterial dient ein eloxiertes Aluminiumblech. Dieses wird für den weißen Standard mit RAL 9016 Ascodurlack 620 und für den schwarzen mit RAL 9005 Ascodurlack 620 der Fa. Schoch AG beschichtet. Das Mischungsverhältnis des Härters 620 zum Lack beträgt jeweils 1:4. Es wurde keine forcierte Trocknung, sondern lediglich Lufttrocknung eingesetzt.

4 Untersuchungskonzept und -ablauf

In der Probandenuntersuchung wurde das neue Messverfahren mit dem großflächigen Reflexionsstandard hinsichtlich seiner Eignung zur Beschreibung der Lesbarkeit bei verschiedenen Beleuchtungssituationen und Sehaufgaben evaluiert. Dafür wurden folgende Forschungshypothesen formuliert:

- Die CRF-Werte mit dem neuen Reflexionsstandard und der Leuchtdichtemesskamera korrelieren mit den wahrgenommenen Kontrasten am Büroarbeitsplatz, da sich die Reflexionseigenschaften des neuen Standards mit denen des B&K-Standards decken.
- Bei hochglänzenden Tablets werden LED-Leuchten mit hohen Leuchtdichtekontrasten innerhalb der Leuchte störender als Leuchten mit homogener Leuchtdichtestruktur beurteilt, bei bedruckten Papieren sind beide durch die diffusen Anteile des Papiers gleich störend.
- Pendel- und Stehleuchten mit hohen Leuchtdichtekontrasten werden bei hochglänzenden Tablets störender als entsprechende Deckenleuchten wahrgenommen, da sie sich näher an der Reflexionsoberfläche befinden.

Um diese Hypothesen zu überprüfen, wurden während des Tests die Leuchtenanzahl, die Lichteinfallrichtung, die Leuchtenleuchtdichtestruktur, die Leuchtenart und Art der Sehaufgabe variiert. Die Untersuchungen wurden in einem büroähnlichen Untersuchungsraum (6,6 m x 3,5 m, Höhe 2,8 m) durchgeführt. Der Raum wurde mit handelsüblichen Leuchten ausgestattet, die einzeln über DALI angesteuert wurden. Alle Leuchten hatten eine ähnlichste Farbtemperatur von 4000 K und einen Farbwiedergabeindex $R_a \geq 80$. Der Versuchsraum war farbneutral ausgestattet mit bürotypischen Reflexionsgraden an Fußboden, Decke und Wänden. Im Versuchsraum befanden sich neun Arbeitsplätze mit Monitor und Tastatur, an denen die Probanden die Bewertungen abgaben (vgl. Abb. 3 und 4).



Abb. 3: Arbeitsplatz des Probanden



Abb. 4: Foto des Versuchsraums

Während eines Untersuchungstermins befand sich ein Proband im Raum. Nachdem der Proband an einem Arbeitsplatz eine definierte Anzahl von Lichtsituationen bewertet hatte, setzte er sich an einen anderen, zufälligen Arbeitsplatz. Während eines Untersuchungstermins wurde die mittlere horizontale Beleuchtungsstärke auf dem bewertenden Arbeitsplatz mit jeweils 500 lx, 650 lx und 1000 lx konstant gehalten. An den restlichen Arbeitsplätzen wurde eine mittlere horizontale Beleuchtungsstärke von 250 lx, 400 lx und 500 lx eingestellt, damit der restliche Raum nicht vollkommen dunkel erscheint. An jedem der neun Arbeitsplätze wurden die definierten Lichtsituationen in zufälliger Reihenfolge jeweils dreimal präsentiert, damit jede Lichtsituation bei jeder Sehaufgabe genau einmal vorhanden war. Die drei Sehaufgaben waren Kopierpapier, Zeitschriftenpapier sowie Tablet-PC. Auf den Sehaufgaben waren Ausschnitte aus wissenschaftlich-technischen Zeitschriften aufgebracht, die sowohl Text als auch Bilder und Diagramme enthielten. Zur Bewertung einer Lichtsituation hatten die Probanden 60 Sekunden Zeit. Nach Ablauf der Zeit mussten Sie folgende Fragen Skala beantworten:

1. Wie beurteilen Sie die Helligkeit der Arbeitsfläche?

2. Wie beurteilen Sie die Lesbarkeit unter Berücksichtigung des Glanzes?
3. Wie beurteilen Sie die Störung durch die Lichtquellen beim Betrachten des Monitors?

Die Fragen und die Bewertungsskala wurden in leicht abgewandelter Form aus der Untersuchung von JENTSCH ET AL. [2] entnommen. Die Helligkeit und Lesbarkeit wurden mit einer neunstufigen Skala (1 = unzureichend...9 = ausgezeichnet) bewertet. Die Störung (Blendung) durch die Beleuchtungsskala wurde analog bisheriger Blendungsstudien anhand einer siebenstufigen Söllner-Skala bewertet. Vor der eigentlichen Untersuchung wurden immer eine Einweisung und ein kurzer Vortest durchgeführt. Ein Untersuchungsdurchlauf mit Vortest und dreimal 25 Lichtsituationen dauerte so ca. 90 Minuten (inkl. Pause). Insgesamt nahmen 31 Probanden (14 Frauen, 17 Männer) an dem Versuch teil. Davon waren fünf Mitarbeiter am Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau (Alter 26 bis 48 Jahre). Die verbleibenden 26 Probanden waren lichttechnisch ungeübt und wiesen eine Altersstruktur von 21 bis 34 Jahren auf (Mittelwert 25,1 Jahre). 14 Probanden trugen eine Brille und zwei Probanden trugen Kontaktlinsen während der Untersuchung. Alle Probanden hatten eine Sehschärfe mit einem Visus von mindestens 0,8.

5 Ergebnisse

Vor dem Probandenversuch wurden für jede Lichtkonfiguration bei allen Helligkeitsstufen die CRF-Werte mit dem neuen Reflexionsstandard und mit dem Brüel & Kjaer-Gerät ermittelt (vgl. Abb. 11). Die CRF-Werte wurden mit einer LMK 5 der Fa. TechnoTeam mit 8-mm-Objektiv gemessen, die auf dem in [5; 8] beschriebenen Aufbau angebracht wurde.

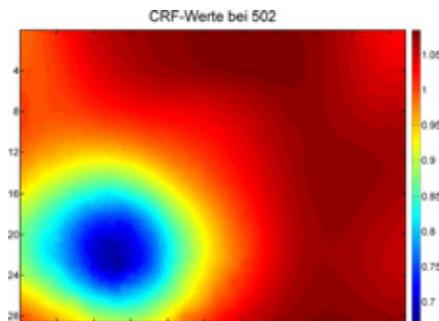


Abb. 5: CRF-Bild mit LMK für gesamte Größe des Reflexionsstandards für Konf. 2 bei 500 lx

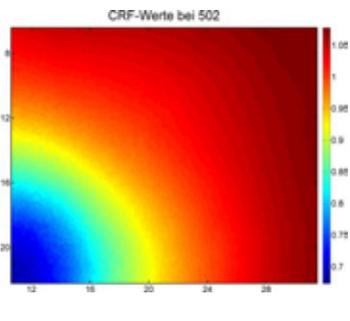


Abb. 6: CRF-Bild mit LMK für Tablet-Größe für Konfiguration 2 bei 500 lx (20x15 cm)

In Abb. 7 wird deutlich, dass das Lesbarkeitsurteil vor allem durch den mittleren CRF-Wert, die Sehaufgabe und die Beleuchtungsstärke beeinflusst wird. Während bei bedrucktem Kopierpapier die Lesbarkeit fast unabhängig vom CRF-Wert bewertet wurde, spielt dieser bei glänzenden Proben eine wichtige Rolle. Dabei wurde die Lesbarkeit bei zunehmendem Glanzgrad schlechter bewertet. Während bei einer Beleuchtungsstärke von 500 lx die Lesbarkeitsbewertungen tendenziell am besten ausfielen, kann für 650 lx und 1000 lx keine klare Aussage getroffen werden. Erkennbar ist jedoch, dass bei Kopierpapier und Zeitschriftenpapier die Lesbarkeit bei 1000 lx tendenziell besser bewertet wurde als bei 650 lx. Beim Tablet wurde die Lesbarkeit bei beiden Beleuchtungsstärken ungefähr gleich bewertet, wobei hier die Streuung nach wie vor recht hoch ist. Die Ursachen für die Streuungen und die Rangfolge der Beleuchtungsstärkelevels sind zum aktuellen Zeitpunkt

unklar. Jedoch bestätigen die bisherigen Beobachtungen bereits die Hypothese 1 – zumindest für Zeitschriftenpapier und Tablet korrelieren die CRF-Werte gut mit den Lesbarkeitsurteilen.

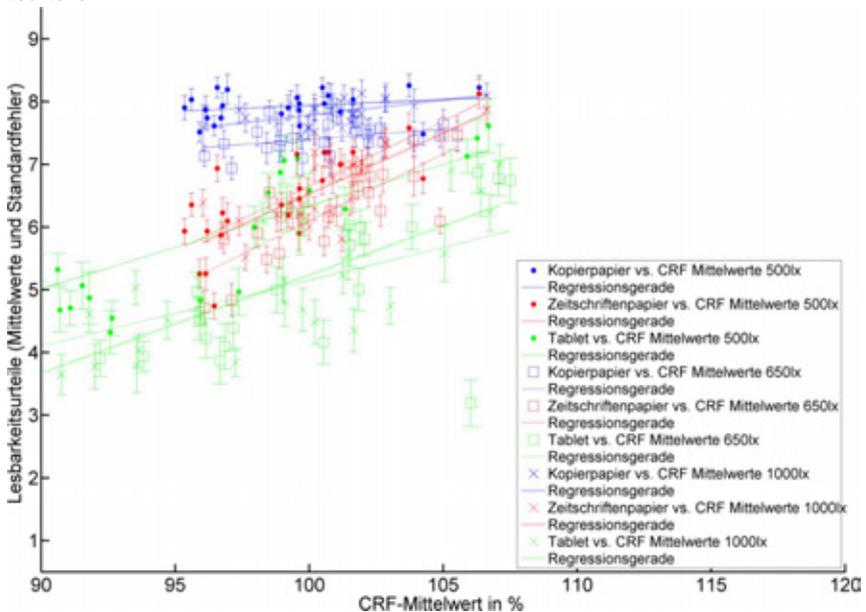


Abb. 7: CRF-Mittelwerte im Vergleich zur den Lesbarkeitsurteilen der Probanden bei verschiedenen horizontalen Beleuchtungsstärken, CRF-Mittelwerte bei Tablet für relevante Displaygröße

Für die Überprüfung der Forschungshypothesen 2 und 3 sind in Abb. 8 die Boxplots der Lesbarkeitsurteile bei verschiedenen strukturierten Leuchten an der gleichen Position dargestellt. Da jede Leuchte bzw. Leuchtengruppe die gleiche Beleuchtungsstärke am bewerteten Arbeitsplatz erzeugt hat, kann hier also direkt die Lesbarkeit mit der Leuchtdichtestruktur verglichen werden. Daraus wird ersichtlich, dass die Leuchtdichtestruktur bei Kopierpapier keinen Einfluss auf die Lesbarkeit hat, bei Tablets die Lesbarkeit für kontrastreiche Leuchten jedoch signifikant schlechter bewertet wurde. Bei Zeitschriftenpapier ergibt sich ein gemischtes Bild bei Betrachtung aller Leuchtenanzahlen und -positionen, mit der Tendenz, dass die Leuchtdichtestruktur auch hier nur einen sehr geringen Effekt auf die Lesbarkeit hat.* Somit konnte Forschungshypothese 2 bestätigt werden. Bei weiterer Betrachtung von strukturierten Leuchten wurde deutlich, dass insbesondere die Leuchten mit hohen Leuchtdichtekontrasten eher schlecht hinsichtlich Lesbarkeit bewertet wurden und dass strukturierte Stehleuchten eine schlechtere Lesbarkeit aufweisen als entsprechende Deckeneinbauleuchten.* Damit konnte auch Forschungshypothese 3 bestätigt werden. *(Aus Platzgründen kann dies an dieser Stelle nicht dargestellt werden.)

Da die Lesbarkeit auf glänzenden bedruckten Papieren und Tablet-PCs bei gleicher horizontaler Beleuchtungsstärke vor allem durch die mittleren CRF-Werte beeinflusst wird, sollten bei der Lichtplanung möglichst keine Leuchten im Bereich von 15° bis 35° frontal zur Normalen der Arbeitsfläche positioniert und ggf. die Leuchtenanordnung mit dem neuen CRF-Verfahren überprüft werden. Falls in einem Raum häufig Tablet-PCs eingesetzt werden, sollte der Lichtplaner vorab die Leuchtenleuchtdichtestruktur berücksichtigen.

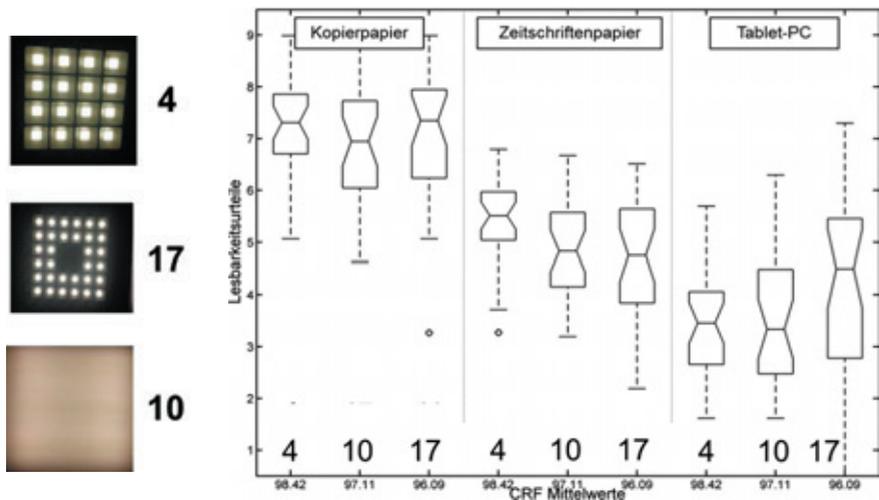


Abb. 8: Vergleich der Lesbarkeitsurteile der Probanden bei verschiedenen Leuchtdichtestrukturen bei 650 lx. Zur Vergleichbarkeit mit CRF-Mittelwerten – beim Tablet für relevante Displaygröße.

Diese Forschungsarbeit wurde mit finanzieller Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungsprojekts UNILED2 (Förderkennzeichen: 13N13395) durchgeführt. Die Autoren bedanken sich herzlich beim BMBF für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.) (1991): „Der Kontrastwiedergabefaktor CRF - ein Gütemerkmal der Innenraumbeleuchtung“. Berlin: LiTG Publ. 13.
- [2] Jentsch, Jürgen; Schmits, Paul W.; Stolzenberg, Klaus (1984): „Subjektive Bewertung von Beleuchtungsanlagen und Kontrastwiedergabe“. Teil 2. Licht-Forschung 6 (2), S. 87–91.
- [3] Wolf, Stefan; Löffler, Karin; Gall, Dietrich (1996): „Ermittlung von CRF-Werten mittels bildaufgelöster Leuchtdichtemessung“. Tagungsband der Licht 96, Leipzig.
- [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. Oktober 2012 in Ilmenau.
- [5] Zumtobel (Hrsg.) (2013): „CRF Messung mit Leuchtdichtekamera“. Unternehmensinterne Dokumentation. Dornbirn 2013.
- [6] Deter, Michael (2015): „Experimentelle Untersuchungen zur Erneuerung des CRF-Verfahrens“. Masterarbeit am Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau.
- [7] Funke, Carsten et al. (2015): „Renewal of the contrast rendering factor procedure to describe reflected glare in indoor applications“. 28th Session of the CIE, Manchester, 2015 Proceedings, Vol.1, Part 2, S. 1481-1486.
- [8] Deter, Michael; Hupe, Christoph; Skoczowsky, Robert (2014): „Bestimmung eines CRF-Reflexionsnormals“. Projektseminar am FG Lichttechnik der TU Ilmenau.
- [9] Funke, Carsten et al. (2014): „Bestimmung eines Reflexionsnormals für Kontrastwiedergabe-Messungen“. LICHT 2014, Poster-Präsentation, Den Haag 2014.

Investigation of the influence of emitting area of LED luminaires on the psychological glare of the observers

Hristo Vasilev¹, Iva Petrinska¹, Petar Aleksiev², Dilyan Ivanov¹, Valchan Georgiev¹
¹Technical University of Sofia, Bulgaria, ² Chamber of graduated surveyors

Research issue

The LEDs are fast emerging new technology that brings new opportunities and challenges to the lighting researchers and specialists. Along with the lot of advantages that they have, when used for indoor applications they have two basic drawbacks that are object of the current paper –their light distribution and the estimation of the glare that they cause. Glare is due to high brightness or significant differences of the brightness in the observer's visual field. Because of the small size of the LEDs and their high intensity, special attention has to be paid when they are used as indoor light sources.

State of science/technology

A lot of work has been done and a lot has been achieved for improvement of the light distribution of LEDs lately – a nearly batwing curve has been reached. The more serious problem concerning the indoor LED luminaires is the glare that they cause. The established systems for estimation of this indicator as Unified Glare Rating (UGR) (EN12464-1 2002), Visual Comfort Probability (VCP) (IESNA 2000), British Glare Rating system (CIBSE 1997), cannot be used in this case, because they give inaccurate results.

Research hypothesis

The problems that occur when glare is estimated for rooms illuminated with LED luminaires concern the definition of the exact size of the source of glare and the brightness of its immediate background. Because LEDs usually are with size less than 0.0003 sr, the glare that indoor LED luminaires cause cannot be estimated by means of UGR.

Experimental setup

In order to determine the influence of the illuminating structure of the source of glare on the subjective estimation of this indicator and aiming its investigation for luminaires with complex shape, a new estimation approach has to be established. In order to achieve this a special experimental setup is used, utilizing two different LED luminaires with size 600x600mm, one of them having homogeneous illuminating surface and the other one – illuminating surface with glowing spots (under the LEDs).

Results in comparison with previous findings

The experimental results will be used for definition of a new approach for estimation of the psychological glare that LED indoor luminaires cause.

Investigation of the influence of emitting area of LED luminaires on the psychological glare of the observers

Hristo Vasilev¹, Iva Petrinska¹, Petar Aleksiev², Dilyan Ivanov¹, Valchan Georgiev¹

¹Technical University of Sofia, Bulgaria, ² Chamber of graduated surveyors

Summary

The LEDs are fast emerging new technology that brings new opportunities and challenges to the lighting researchers and specialists. Along with the lot of advantages that they have, when used for indoor applications they have two basic drawbacks that are object of the current paper –their light distribution and the estimation of the glare that they cause. Glare is due to high brightness or significant differences of the brightness in the observer's visual field. Because of the small size of the LEDs and their high intensity, special attention has to be paid when they are used as indoor light sources.

Introduction

The concern for achievement of energy efficiency and the fast development of the solid state technologies lead to a fast implementation of the LEDs for lighting. This new and emerging technology however leads to a lot of problems, concerning the well – being of the occupants, especially when LEDs are used for indoor lighting. A lot of work has been done and a lot has been achieved for improvement of the luminaires with LEDs, used indoors. One of the issues that stays as a challenge in front of the lighting producers and designers concerns the light distribution of LEDs - lately a nearly batwing curve has been reached. The more serious problem concerning the indoor LED luminaires is the glare that they cause. The term glare includes two different types of glare: disability glare and discomfort glare. Disability glare is the one that leads to reduction of the visibility due to scattered light in the eye and does not necessarily lead to physical discomfort [1]. On the other hand discomfort glare is defined as glare which causes discomfort without necessarily impairing the vision of objects. These different effects are brought about by different mechanisms in the human visual system and as a consequence the discomfort and the disability are actually independent, even though they usually occur together.

The established systems for estimation of this indicator as Unified Glare Rating (UGR) (EN12464-1/2011) [2], Visual Comfort Probability (VCP) (IESNA 2000) [3], British Glare Rating system (CIBSE 1997) [4], cannot be used in this case, because they give inaccurate results. The most widely used glare rating system – Unified Glare Rating (UGR), developed by the CIE has been modified for the last time in 2002 and does not take into account the current state of the lighting technology. The problems that occur when glare is estimated for rooms illuminated with LED luminaires concern the definition of the exact size of the source of glare and the brightness of its immediate background. In order to determine the influence of the illuminating structure of the source of glare on the subjective estimation of this indicator and aiming its investigation for luminaires with complex shape, a new estimation approach has to be established. This problem comes from the fact that for some existing LED luminaires the bright LEDs are apparent through

the optical system, which leads to doubt what is the size of the apparent area of the luminaire – that of the LED array chip, that of a single LED or that of the whole luminaire. The second concern is the Guth position index [5] used in the UGR formula – the problem here comes from the fact that the LED luminaires where the LED arrays are visible usually do not have uniform luminance distribution and constant spectrum. The third issue is the light distribution of the LED luminaires – nearly batwing curve have been achieved, but this leads to significant losses in the optical system.

UGR system for evaluation of glare

Several researches have been made on the glare effects, produced by LED luminaires recently and some conclusions have been made on the matter whether the UGR model and its extensions are suitable for its estimation. Also CIE has prepared a Technical Report with significant results on this topic [6]. However a final decision of this problem has not been reached yet. In the Report it is highlighted that the glare caused by not uniform luminaires is not easy assessable, but it is greater than that caused by uniform stimulus if the luminaire is at the line of sight and also the glare perception decreases if the luminaire is above the line of sight.

The UGR system, developed in 1995 by CIE is used for evaluation of the discomfort glare of indoor lighting systems. The UGR value is calculated as follows:

$$UGR = 8 \text{Log} \left[\left(\frac{0,25}{L_b} \right) \sum_i \frac{L_i^2 \omega_i}{P_i^2} \right] \quad (1)$$

where: L_b is the background luminance (cd/m^2), L_i is the luminance (cd/m^2) of each luminaire, ω_i the solid angle [sr] in the direction of the observer, and P_i the position index of each luminaire.

This glare estimation approach is based on results for fluorescent lighting fixtures and for small sources ($< 0.005\text{m}^2$) the UGR values overestimate glare. Therefore the CIE has introduced an extension of the UGR estimation method aimed for small light sources, based on experimental and practical results, according to which the equation is modified as follows:

$$UGR = 8 \text{Log} \left[\left(\frac{0,25}{L_b} \right) \sum_i 200 \frac{I^2}{r^2 P_i^2} \right] \quad (2)$$

where I is the luminous intensity (in cd) toward the eyes, r is the distance (in m) between the observer's eye and the light sources.

Takashi et al. [7] conducted a study on the influence of the geometrical factors on the value of the UGR. They proposed new larger values for the position index for estimation of the glare, caused by matrix light sources, based on subjective tests comparison. They also found that the position index is mainly affected by the relative angle between line of sight and light source.

For clarification of the influence of the geometrical and photometrical factors on the UGR Kasahara et al [8] conducted a study in which they considered luminaire arrangement, number of LED lights and light distribution. The basic results from their study show that discomfort glare is reduced when lens or other means are used to diffuse light and also that when the number of LEDs in a luminaire increases with the same luminaire area and illuminance, glare decreases.

Computational and experimental glare estimation

In order to estimate the glare for a matrix LED luminaire and to verify the applicability of the UGR formula an experimental setup is used, utilizing a LED luminaire with size 600x600mm. It is equipped with 32 LED matrixes arranged as four lines with 8 matrixes per line. The correlated color temperature of the luminaire is 4000K, and its luminous flux is 4000lm.

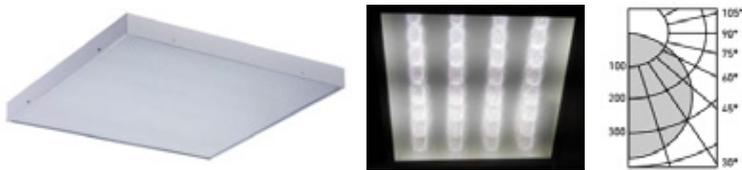


Fig. 1 LED luminaire, chosen for experimental and calculative investigation of the glare

As it is obvious from the picture, shown above the question that occurs looking at the expression of UGR (1, 2) is what is the area of the glare source, that that should be considered, so that the luminance L_s can be calculated or which intensity should be considered in (2). The other question is which expression should be used at all, because apparently the luminaire considered consists of number of small illuminating matrixes. In order to clear this problem the UGR is calculated once using equation (2) for small sources of light considering the emitting area of a single LED matrix (Fig. 2 - area 1), once considering a whole line consisting eight LED matrixes (Fig. 2- area 2), once for a line of LED matrixes and its surrounding area (Fig. 2- area 3) and once for the whole luminaire (Fig. 2 - area 4). For the last three cases since the area of the light source is bigger than $0.005m^2$, equation (1) is used. The results from the calculation are shown in Table1.

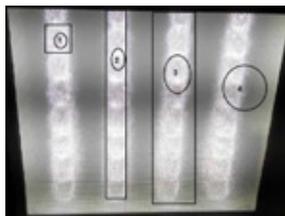


Fig. 2 Areas, considered in the calculative appraisal or the glare; 1-emitting area of a single LED matrix, 2- area of a line consisting eight LED matrixes, 3- area of a line consisting eight LED matrixes and its surrounding, 4- area of the entire luminaire

Table 1 Results from calculative estimation of glare from LED office luminaire

Area under consideration – Fig. 2	Area, m ²	I, cd	L, cd/m ²	UGR calc.	UGR estimation EN 12464-1/2011
1	32x0.0016	32x45.14	32x28212.5	26.6 eq.(1) 23.4 eq.(2)	19
2	8x0.024	8x361.1	4x15045.8	24.4	19
3	8x0.072	8x361.1	4x5015.28	20.6	19
4	0.36	1444.5	4012.5	19.8	19

An experiment on the visual acuity of test participants under LED illumination has been conducted in order to obtain subjective estimation of the discomfort glare. 20 independent subjects – 16 men and 4 women have participated in the experiment with age from 24 to 45 years. The visual acuity, contrast vision and color vision check have been performed to all of the subjects prior to the beginning of the experiment to identify that they have normal vision. During the experiment each subject has a fixed position in the room. The test room is with dimensions length – 7 m, width – 4 m and height 2.8 m. It is illuminated by a single LED luminaire, placed on the ceiling, which is in the visual field of the observers, 4 meters from his position and additional diffuse component, placed so that they are not glare sources. The illuminances on the working plane, the vertical and cylindrical illuminance created by the investigated luminaire are measured at the beginning and in the end of the experiment. At the beginning of the experiment every test subject is left in the test room for 15 minutes to adapt to the lighting conditions. During that time the nature of the experiment is explained. After that time a Landoldt ring with random orientation and diameter of 40 mm and 8 mm gap width (with two different contrasts between the ring and its background) is shown to the test subject, so that he becomes familiar with it. In order to mimic the usual activities done in an office space the test objects are shown a Landoldt ring with random orientation and then asked to mark this orientation on a piece of paper. Landoldt rings with five different sizes, eight different orientations and two different ratios $L_{ring}/L_{background}$ are shown to the test subjects. The sizes of the Landoldt rings are given in Table 2 and are chosen so that the probability that the visual acuity of the test subjects is influenced by the glare is big [9].

Table 2 Landoldt rings sizes

Landoldt ring	Outer diameter, mm	Gap width, mm
C1	30	6
C2	25	5
C3	20	4
C4	15	3
C5	10	2

The contrast between the rings and their background also influences the degree of glare, because it reduces the contrast sensitivity of the retina, so two different contrasts were

investigated. Every Landoldt ring is shown to the participants in the experiment on a monitor for one second, after that they answer the question about its orientation for 30 seconds. The brightness of the monitor changes to 23.06 cd/m² (R=186, G=186,B=186). и 0.95 cd/m²(R=96, G=96, B=96), while the luminance of the Landoldt rings is constant 0,57 (R=0,G=0, B=0) cd/m².



Fig. 3 Landoldt rings orientations, used in the experiment

Separately from the results from the experiment, the test subjects are asked to give their subjective opinion on the discomfort using Osterhaus and Bailey four-point scale with response labels defined as imperceptible, noticeable, disturbing and intolerable [10].

The results from the experiment are given in table 3 in terms of number of mistakes made by the participants according to the size of the Landoldt rings and the ratio $L_{ring}/L_{background}$. The results from the subjective evaluation are given in Table 4.

Table 3 Experimental results and number of mistakes made by the test subjects

Participants in the experiment	Number of mistakes										overall	%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
diameter of the Landoldt ring 30mm, 23.06 cd/m ²	2	1	0	0	0	0	0	0	0	17	20	85
diameter of the Landoldt ring 25mm, 23.06 cd/m ²	3	1	1	0	0	0	0	0	0	15	20	75
diameter of the Landoldt ring 20mm, 23.06 cd/m ²	2	2	2	1	0	0	0	0	0	13	20	65
diameter of the Landoldt ring 15mm, 23.06 cd/m ²	4	1	1	1	2	0	0	0	0	11	20	55
diameter of the Landoldt ring 10mm, 23.06 cd/m ²	6	1	1	0	0	0	2	0	0	10	20	50
diameter of the Landoldt ring 30mm, 0.95 cd/m ²	2	2	2	0	0	1	0	0	0	13	20	65
diameter of the Landoldt ring 25mm, 0.95 cd/m ²	3	2	1	0	0	0	1	0	0	13	20	65
diameter of the Landoldt ring 20mm, 0.95 cd/m ²	2	1	1	2	1	0	0	1	0	12	20	60
diameter of the Landoldt ring 15mm, 0.95 cd/m ²	3	0	2	1	0	3	1	0	0	10	20	50
diameter of the Landoldt ring 10mm, 0.95 cd/m ²	0	4	2	1	0	2	1	1	0	9	20	45

Table 4 Subjective evaluation of discomfort according to Osterhaus and Bailey

Subjective evaluation	Number of participants
Imperceptible	1
Noticeable	8
Disturbing	9
Intolerable	2

The experimental data obtained is not enough and the experiment has to be continued. The preliminary results, although not statistically analyzed and full show the tendency that when the emitting area of the LED chips or matrices are visible they cause glare.

Future work and conclusions

Because of the insufficient experimental data gathered so far the experiment on the glare produced by LED office luminaires has to be continued. There are also additional issues and problems, that influence glare and must be considered. The influence of light distribution and spectrum of the LEDs on glare has to be estimated and the latest findings in the colorimetry of LEDs has to be considered. Also when diffuse LED luminaires are used an estimation of the losses in the optical system and their real efficiency has to be estimated. An optimal degree of shielding of the LED chips by different optical elements has to be estimated.

Some preliminary research of the authors has shown that the discomfort glare caused by LED luminaires show that it can be reduced through: increase of the background luminance L_b (especially on the working plane and the wall or surface against the observer); decrease of the luminance of the luminaire in direction towards the observer (cut – off in the area above 45° and especially above 65° to the vertical line of vision); increase of the area of the luminaire or use of glowing periphery of the luminaire.

The existing methods for estimation of glare are not straight forward when applied for LED luminaires. This leads to the need of new criteria and research in the area.

References

- [1] CIE S 017/E:2011 ILV: International Lighting Vocabulary
- [2] EN 12464-01:2011 Lighting of work place – Indoor work places
- [3] IESNA 2000, IESNA Lighting Design Guide in The IESNA lighting handbook. Reference & application. 9th edition. New York: Mark S. Rea
- [4] CIBSE 1997. CIBSE Code for interior lighting 1994: Additions and corrections 1997. ISBN 0 900953 64 0
- [5] Luckiesh, M., Guth, S. K., Brightness in visual field at borderline between comfort and discomfort (BCD), Illum. Eng. 1949, 44, 650-670
- [6] CIE 2013 CIE 205:2013 Review of lighting quality measures for interior lighting with LED lighting systems, Vienna: CIE
- [7] Takahashi H. et al., Position index for the matrix light source, Journal of Light and Visual Environment, 31(3), 128-133, 2007
- [8] Kasahara T. et al., Discomfort glare caused by white LED light sources, Journal of Light and Visual Environment, 30(2), 95-103, 2006
- [9] Clarke, K.C. Boyce, P.R. and Beckstead, J.W. Factors Influencing the Stability of Glare Assessments, IESNA Annual Conference, Montreal, Canada, 1991
- [10] Osterhaus WKE, Bailey IL. Large area glare sources and their effect on discomfort and visual performance at computer work stations. Proceedings of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 4-9 October 1992. Houston, Texas

Einfluss der Raumtemperatur auf den Umgang der Nutzer mit Kunst- und Tageslicht

Cornelia Moosmann, Karlsruher Institut für Technologie, Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau, Englerstraße 7, 76137 Karlsruhe

Problemstellung und Forschungsfragen

Die künstliche Beleuchtung hat in Bürogebäuden häufig einen Anteil von 30 % bis 50 % am Stromverbrauch der Gebäudetechnik. Dabei treten z.T. große Abweichungen zwischen berechnetem Bedarf und gemessenem Verbrauch auf, die u.a. darin begründet sind, dass das tatsächliche Nutzerverhalten nicht dem prognostizierten entspricht. Je besser Nutzerverhalten und -verhalten bekannt sind, desto zutreffender sind Bedarfsberechnungen, und desto fundierter können bei der Planung und im Betrieb (Automation) Entscheidungen getroffen werden, die zu Energieeffizienz und Nutzerzufriedenheit gleichermaßen beitragen.

Stand der Wissenschaft/Technik

Zu den relevanten Einflussgrößen des Nutzerverhaltens bezüglich Tages- und Kunstlicht gehören neben Tätigkeit, Alter und individueller Präferenz auch die thermischen Bedingungen. Laurentin et al. (2000) vermuteten einen Einfluss der Raumtemperatur auf das bevorzugte Helligkeitsniveau, konnten diesen in einer Studie jedoch nicht nachweisen. Mahdavi et al. (2008) beobachteten einen Einfluss hoher sommerlicher Temperaturen auf den Umgang der Nutzer mit dem Sonnenschutz. In einer Felduntersuchung konnten die These von Laurentin et al. und die Beobachtung von Mahdavi et al. bestätigt werden.

Forschungshypothesen

Interaktionen zwischen thermischem und visuellem Komfort beeinflussen das Verhalten und die Bedürfnisse von Nutzern. Eine genauere Kenntnis der Interaktionen sowie ihrer Einflussgrößen ermöglicht, durch eine optimierte Steuerung den Komfort zu verbessern und die Anzahl Nutzereingriffe zu reduzieren, die sich energetisch ungünstig auswirken.

Versuchsaufbau

Ergänzend zu einer abgeschlossenen Feldstudie wird ab Frühjahr 2016 in einer umfangreichen Testraumstudie untersucht, wie der thermische Komfort den Umgang mit Kunst- und Tageslicht (z.B. Sonnenschutz) beeinflusst und umgekehrt. Dafür werden je nach Versuchstag entweder die thermischen Bedingungen vorgegeben und die Interaktionen mit Sonnenschutz und Kunstlicht beobachtet oder Beleuchtungsstärke und Blendschutz vorgegeben und Veränderungen der Nutzer bezüglich der Raumtemperatur erfasst.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Im Tagungsbeitrag werden Ergebnisse der abgeschlossenen Feldstudie und erste Ergebnisse der laufenden Testraumstudie vorgestellt.

The impact of the room temperature on users' interventions regarding artificial lighting and daylight

Cornelia Moosmann, Karlsruhe Institute of Technology, Building Science Group, Englerstraße 7, 76137 Karlsruhe

Research issue

In many office buildings the artificial lighting causes 30 % to 50 % of the electricity consumption of the building services. Differences between calculated demand and measured consumption are considerable in some buildings. Among other things, these differences are caused by differences between actual and predicted users' behaviour. The better users' needs and users' behaviour are known, the more accurate are demand calculations. Good knowledge of users' needs and behaviour helps reaching well-founded decisions in planning and operating buildings (automation) that equally contribute to energy efficiency and users' satisfaction.

State of science/technology

Relevant factors for users' behaviour regarding daylight and artificial lighting are – besides task, age, and individual preference – the thermal conditions. Laurentin et al. (2000) presumed an influence of the room temperature on the preferred illuminance level but could not confirm it in a study. Mahdavi et al. (2008) observed an influence of high temperatures in summer on users' interventions regarding the blinds. In a field study both the presumption of Laurentin et al. and the observation of Mahdavi et al. could be confirmed.

Research hypothesis

Interactions between thermal and visual comfort have an influence on the behaviour and the needs of users. A better knowledge of these interactions and of the influencing factors allows the optimization of the building automation to improve users' comfort and reduce users' interventions that have a negative impact on the energy consumption.

Experimental setup

In addition to a completed field study, the influence of the thermal comfort on users' interventions regarding artificial lighting and daylight (e.g. blinds) is examined in an extensive test room study from spring 2016. Depending on the test scenario, either the thermal conditions are fixed and users' interventions regarding artificial lighting and daylight are observed, or illuminance level and glare protection are fixed and users' interventions regarding the thermal conditions are observed.

Results in comparison with previous findings

The paper shows results of the field study and first results of the ongoing test room study.

The impact of the room temperature on users' interventions regarding artificial lighting and daylight

Cornelia Moosmann
Karlsruhe Institute of Technology, Building Science Group
Englerstraße 7, 76137 Karlsruhe

Summary

Interactions between thermal and visual comfort influencing the behaviour and the needs of users have long been presumed and could be confirmed in a field study: Users considering their rooms to be too warm prefer lower illuminance levels (mean value 922 lx versus 1084 lx). Users of rooms that tend to overheat in summer close their blinds more often and more rigorously than user of other rooms.

A better knowledge of these interactions and of the influencing factors allows the optimization of the building automation to improve users' comfort and reduce users' interventions that have a negative impact on the energy consumption. Therefore, a test room study has been started to analyze these interactions.

1 Electricity consumption in office buildings

Artificial lighting is a relevant factor for energy savings in office buildings. The research project "EnOB – research for energy-optimised building" sponsored by the German Federal Ministry of Economics and Technology involves buildings that have minimal primary energy requirements. The energy consumptions of about 100 buildings have been monitored in the last 20 years, amongst them several office buildings (new buildings and refurbished ones). The following graph shows the percentage of heating, cooling, lighting, and ventilation of the total electricity consumption of the building services in 19 office buildings. It is based on measured values of at least an entire year for each building.

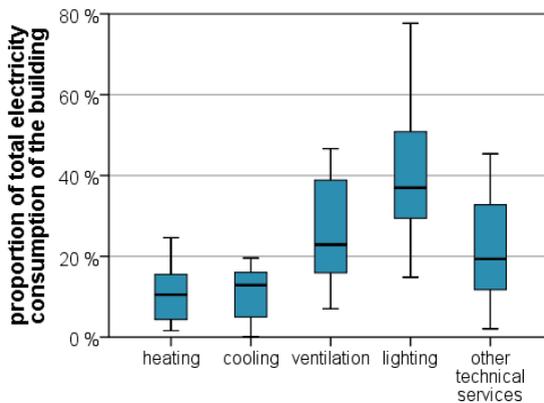


Fig. 1: Boxplot of the percentage of heating, cooling, lighting, and ventilation of the total electricity consumption in 19 office buildings in Germany (Voss et al. 2016)

The artificial lighting dominates the electricity consumption in most of these energy-optimised office buildings. It causes 30 % to 50 % of the electricity consumption of the building services. In some cases there are considerable differences between calculated demand and measured consumption. These differences are caused, inter alia, by differences between actual and predicted users' behaviour. The better users' needs and users' behaviour are known, the more accurate are demand calculations. Good knowledge of users' needs and behaviour helps reaching well-founded decisions in planning and operating buildings (automation) that equally contribute to energy efficiency and users' satisfaction.

2 Users' needs and behaviour – a field study

Relevant factors for users' behaviour regarding daylight and artificial lighting are – besides viewing task, age, and individual preference – the thermal conditions. Laurentin et al. (2000) presumed an influence of the room temperature on the preferred illuminance level. In summer, they stated, office occupants who experience high temperatures work at illuminance levels less than those recommended "as if dimness is symbolically associated with coolness". In their experimental study, this observation could not be confirmed. Mahdavi et al. (2008) observed an influence of high irradiance levels in summer on users' interventions regarding the blinds: blinds have been closed more often and more rigorously in these conditions. Both the presumption of Laurentin et al. and the results of Mahdavi et al. could be confirmed in a field study conducted from 2007 till 2012, as follows.

2.1 Experimental setup

In nine office buildings in Germany, lighting and indoor environment conditions were measured throughout two weeks in every season. In each building, the conditions of at least 27 workplaces were recorded and rated by the occupants using a standardized questionnaire. In this field study, 977 questionnaires have been filled in by 461 subjects. 539 series of two weeks measurements of lighting, indoor environmental data and weather data have been collected. The users' assessments were supplemented by an analysis of the users' behaviour that could be derived from the measurements. 6.600 users' interventions regarding the artificial lighting and 3.500 users' interventions regarding the shading system could be identified (Moosmann 2014).



Fig. 2: Example of one of the office spaces. The investigated workplaces are equipped with a low cost luminance camera, illuminance sensors, temperature and humidity sensors.

2.2 Results

The subjects have been asked for their reasons for closing or opening blinds. Several possibilities could be ticked. The question was answered on 681 questionnaires. In all seasons, 77 % of the subjects, stated “glare from sunlight” as a reason, 52 % stated “it was too bright/dark at the desk”. In summer, 66 % of the subjects ticked “too warm”. In spring, summer and autumn this reason was ticked only by 21 % of the subjects.

Unlike in other seasons, the shading devices are not used mainly for glare protection but also to protect from solar heat gains in summer. Accordingly, they are shut more often and more rigorously in summer, especially in buildings with a high proportion of window area, as shown in table 1.

Tab. 1: Percentage of individual working time with closed blinds subject to the type of façade and season based on 900.000 luminance images and 977 questionnaires

	percentage of individual working time with closed blinds (at least 80 % of the window area covered with shading system)
perforated façade	9,2 % (summer: 8,6 %, autumn 9,1 %)
banded façade	8,6 % (summer: 16,5 %, autumn 5,1 %)
glass façade	16,7 % (summer: 27,1 %, autumn 13,6 %)

In summer, thermal comfort influences not only the users’ behavior but also the preferred illuminance level: Users considering their rooms to be too warm prefer lower illuminance levels (mean value 922 lx versus 1084 lx, $N=329$).

The following graph shows the horizontal illuminance at the desk of users satisfied with the lighting of their workplace at this moment. This also illustrates the influence of the thermal conditions.

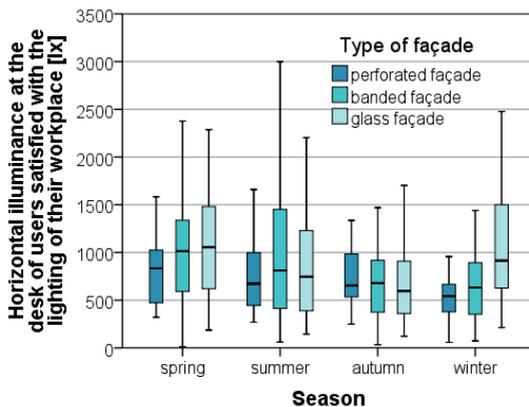


Fig. 3: Horizontal illuminance at the desk of users satisfied with the lighting of their workplace at this moment for different seasons and types of façade.

The graph shows that in spring, users are satisfied with higher illuminance levels than in the other seasons. The illuminance level that satisfies users rises with the proportion of the window area – except in summer and autumn (cooling period), when users with a glass façade prefer lower illuminance levels.

According to the measured values and the users' assessments, the illuminance level preferred depends on

- outdoor illuminance (the higher the illuminance outside, the higher the preferred illuminance inside)
- season (spring: high illuminance level, in addition to dependence on outdoor illuminance; summer: thermal comfort, prevention from overheating)
- need for agreement with colleagues regarding the artificial lighting and the blinds (the less agreement is needed, the more interventions can be observed)
- view out (the more pleasant the view, the higher the illuminance level preferred)
- age of subjects (the younger the subjects, the higher the illuminance level preferred; probably due to lower glare sensitivity)
- proportion of window area of the room (the higher the proportion of window area, the higher the illuminance level preferred)

These variables can explain 48% of the huge deviation of the illuminance level preferred (RE-model, unbalanced panel: $R^2=0.481$, $F=34.0$, $N=342$).

3 The impact of the room temperature – a test room study

3.1 Experimental setup

In addition to the field study, the influence of the thermal comfort on users' interventions regarding artificial lighting and daylight (e.g. blinds) is examined in an extensive test room study since spring 2016. It is conducted in the Laboratory for Occupant Behaviour, Satisfaction, Thermal Comfort and Environment Research (LOBSER), a rotatable test facility at KIT with two identical office like test rooms.



Fig. 4: Test room in the test facility LOBSTER. The workplaces are equipped with a luminance camera, illuminance sensors, a spectroradiometer, several temperature sensors and a humidity sensor.

During the study, each of two test rooms is used by two subjects. The lighting and indoor environment conditions are measured in both rooms and rated by the occupants using a standardized questionnaire. The questions about the lighting situation are based on the LiTG questionnaire (Vandahl et al. 2016).

Tests are conducted in every season. Depending on the test scenario, either the thermal conditions are fixed and users' interventions regarding artificial lighting and daylight are observed, or illuminance level and glare protection are fixed and users' interventions regarding the thermal conditions are observed.

3.2 First results

Results of the first two test periods in spring and summer 2016 show the same tendency as was observed in the field study. At the same outdoor conditions – and therefore the same glare potential – users that are exposed to a higher indoor temperature close their blinds more often than users that are exposed to a lower indoor temperature at the same time.

Accordingly, users that are exposed to a lower indoor temperature seem to switch on the artificial lighting more often. Due to the season and the experimental setup (start at 9 am, end at 4.30 pm), daylight alone provided more than 300 lx in all cases. The next test periods will show users' interventions in autumn and winter and will allow to analyze the impact of the room temperature in detail.

4 Acknowledgement

The field study "Ermittlung relevanter Einflussgrößen auf die subjektive Bewertung von Tageslicht zur Bewertung des visuellen Komforts in Büroräumen" was funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG (WA 1155/5-1). The test room study "Validierung und Modellierung von Nutzerinteraktionen und deren algorithmische Implementierung in der Gebäudeautomation" is funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy BMWi (03ET1289).

5 Literature

- Voss, K., Wagner, A., Maas, A., Herkel, S., Kalz, D., & Lützkendorf, T. (Eds.). (2016). *Performance von Gebäuden: Kriterien, Konzepte und Erfahrungen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag
- Laurentin, C., Berrutto, V. & Fontoynt, M. (2000). Effect of thermal conditions and light source type on visual comfort appraisal. *Lighting Research and Technology*, 32 (4), 223–233.
- Mahdavi, A., Mohammadi, A., Kabir, E. & Lambeva, L. (2008). Occupants' operation of lighting and shading systems in office buildings. *Journal of Building Performance Simulation*, 1 (1), 57–65.
- Moosmann, C. (2014). *Visueller Komfort und Tageslicht am Büroarbeitsplatz. Eine Felduntersuchung in neun Gebäuden* (Dissertation), Karlsruhe

Vandahl, C., Moosmann, C., Funke, C. (2016). Uniform assessment of lighting situations with the LiTG Questionnaire – first experiences. Conference proceedings LICHT 2016, Karlsruhe.

Lichttechnisches & Thermisches Gebäudeauswertetool

Matthias Werner¹, David Geisler-Moroder², Oliver Ebert³, Bert Junghans³

¹Universität Innsbruck, ²Bartenbach GmbH, ³Zumtobel Lighting GmbH

Problemstellung

Bereits in der Entwurfsphase wird das thermische Verhalten eines Gebäudes maßgeblich mitbestimmt. Vor allem die Fassadengestaltung in ihrer Funktion als Sonnen- und Blendenschutz beeinflusst sehr stark die solare Einstrahlung, den Tageslichteintrag und den resultierenden Kunstlichtbedarf. Dies wirkt sich wiederum auf den Heizwärme- und Kühlbedarf aus. Große Dynamik im Fassadendesign und dadurch sich schnell ändernde Randbedingungen bestimmen den Entwurfsprozess. Aussagen über die Auswirkungen auf den Energiebedarf können aufgrund der Komplexität nur mit simulationsgestützten Hilfsmitteln getroffen werden. Mangels entsprechender Softwarelösungen wird diese komplexe aber notwendige Bewertung in der Praxis meist nicht durchgeführt, sodass energetisch und qualitativ optimale Tages- und Kunstlichtlösungen oft nicht erkannt werden.

Ziel

Es wird ein Auswertetool für Heiz-, Kühl- und Kunstlichtbedarf von Gesamtgebäuden entwickelt, welches aufbauend auf der DALEC Technologie das zusammenfügen unterschiedlicher Raumstrukturen zulässt. So werden zusätzlich zu einseitig befensterten Räumen auch Eckräume und Räume mit Oberlichtern berücksichtigt, was ein Zusammensetzen von Gebäuden mit unterschiedlichsten Typologien erlaubt. Es werden weitere Komfortgrößen sowohl für Tages- und Kunstlicht als auch für die thermische Behaglichkeit eingeführt und über ein Ampelsystem schnell vergleich- und bewertbar dargestellt. Dies erlaubt die Ermittlung von komfort- und energieeffizienzoptimierten Fassaden- und Kunstlichtlösungen für Neubauten und Sanierungen.

Innovation

Üblicherweise benötigt eine gekoppelte lichttechnische und thermische Simulation für einen Raum mehrere Stunden und kann nur mit Expertentools durchgeführt werden. Über vorsimulierte Faktoren kann mit dem entwickelten Tool ein Gesamtgebäude mit einer Vielzahl an Räumen in kurzer Zeit und mit einfacher Handhabung analysiert werden. Trotz der vereinfachten Usability werden die komplexen lichttechnischen und thermischen Vorgänge im Gebäude voll abgebildet, wobei unterschiedliche Fassadenorientierungen und der jeweilige Standort berücksichtigt werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine realistische Ermittlung der Tagesbelichtung, des Heiz-, Kühl- und Kunstlichtbedarfes sowie eine Komfortbewertung für ein Gesamtgebäude bereits in der frühen Planungsphase.

Realisierungsgrad

Die erfolgreiche Funktionsweise der vorgestellten Methodik wurde bereits mit der Einzelraum Betrachtung im aktuellen DALEC-Tool gezeigt. Ein erster Prototyp der Gesamtgebäudeauswertesoftware wird Anfang 2017 der Allgemeinheit als Online-Tool zur Verfügung gestellt.

Tool for lighting and thermal evaluation in buildings

Matthias Werner¹, David Geisler-Moroder², Oliver Ebert³, Bert Junghans³

¹Universität Innsbruck, ²Bartenbach GmbH, ³Zumtobel Lighting GmbH

Problem

The thermal behavior of a building is influenced decisively already in the early design phase. Above all, the facade design with its function as sun and glare protection has a strong impact on the solar entry, the daylight entry and the resulting artificial light requirement. As a consequence this affects the heating and cooling demand. Rapid changes on the facade design and thereby rapidly changing boundary conditions determine the design process. Due to the complexity an evaluation of the impact on energy demand of façade design options can be made only with simulation-based tools. Due to a lack of appropriate software solutions for quick evaluation the complex but necessary assessment is typically not being carried out in practice. So optimized energetic and high quality solutions for day- and artificial light might not be detected.

Aim

An evaluation tool for heating, cooling and artificial light demand is developed for an entire building, which is based on the DALEC technology allowing already evaluation on room structures. Now also corner rooms and rooms with skylights are considered in addition to one-sided windowed rooms allowing an energy evaluation of buildings with different typologies. DALEC introduces additional comfort criteria evaluation for daylight and artificial light as well as thermal comfort. This allows the determination of comfort and energy efficiency optimized facades and artificial lighting solutions for new buildings and renovations.

Best practice

Usually a coupled optical and thermal simulation on a room basis requires several hours of time and can be carried out only with expert tools. Due to precalculated factors DALAC is able to analyze a building with a variety of room scenarios in a short time while it is easy to handle and can be learned quickly. Despite the simplified usability of DALEC the complexity of lighting and thermal processes in the building can be represented, taking different facade orientations, façade and artificial lighting systems and the respective location into account. This approach allows a realistic determination of the daylight entry, the heating, cooling and artificial light requirement and a comfort evaluation of an entire building already in the early planning stages.

Implementation

The functionality of the presented methodology has been shown with the single room approach of the current DALEC version. A first prototype of the entire building approach will be released to the public as an online tool by beginning of 2017.

Lichttechnisches & Thermisches Gebäudeauswertetool

Matthias Werner¹, David Geisler-Moroder², Oliver Ebert³, Bert Junghans³

¹Universität Innsbruck, Technikerstrasse 19a, 6020 Innsbruck, Österreich

²Bartenbach GmbH, Rinner Strasse 14, 6071 Aldrans, Österreich

³Zumtobel Lighting GmbH, Schweizerstrasse 30, 6850 Dornbirn, Österreich

Zusammenfassung

Im Rahmen des von der FFG geförderten Forschungsprojektes „DALEC Day- and Artificial Light with Energy Calculation“ wird ein Auswertetool für Heiz-, Kühl- und Kunstlichtbedarf von Gesamtgebäuden entwickelt, welches aufbauend auf der DALEC-Technologie [M. Werner et al., 2014] unterschiedliche Raumstrukturen zulässt. So werden zusätzlich zu einseitig befensterten Räumen auch Eckräume und Räume mit Oberlichtern berücksichtigt, was ein Zusammensetzen von Gebäuden mit unterschiedlichsten Typologien erlaubt. Es werden weitere Komfortgrößen sowohl für Tages- und Kunstlicht als auch für die thermische Behaglichkeit eingeführt und über ein Ampelsystem schnell vergleichbar dargestellt. Dies erlaubt die Ermittlung von komfort- und energieeffizienzoptimierten Fassaden- und Kunstlichtlösungen für Neubauten und Sanierungen. Die neu entwickelten Methoden konnten bereits an ersten Prototypen evaluiert werden. Ein erstes Update für das DALEC Online Tool soll Ende 2016 erfolgen. Die Erweiterung auf die Gesamtgebäudestruktur ist für das Jahr 2017 angestrebt.

1 Problemstellung

Bereits im Entwurf wird das thermische Verhalten des Gebäudes festgelegt. Vor allem die Fassadengestaltung beeinflusst sehr stark den Energiebedarf des Gebäudes. So entscheidet der Anteil der transparenten Fassadenfläche maßgeblich über den solaren Eintrag und kann bei zu großen Flächen zur Überhitzung im Sommer bzw. zu erhöhten Transmissionswärmeverlusten im Winter führen. Ebenso beeinflusst die Fensterfläche den Tageslichteintrag und somit den Kunstlichtbedarf, der wiederum eine interne Last darstellt und bei Überhitzungsphasen zusätzlich herausgekühlt werden muss.

Die hier beschriebene Wechselwirkung aus solaren Einträgen, Tageslichteintrag, Kunstlichtbedarf, thermischen Transmissionsverlusten usw. in Zusammenhang mit dem vorliegenden klimatischen Standort ist in frühen Entwurfsphasen nur sehr schwer zu evaluieren. Aussagen über den Energiebedarf unter sich ändernden Randbedingungen sind aufgrund der Komplexität aus dem Stegreif kaum möglich, können jedoch mit simulationsgestützten Hilfsmitteln getroffen werden. In der Simulation während des Gebäudeentwurfs wird das Verhalten der Gebäudenutzer zumeist nicht, oder wenn nur sehr vereinfacht berücksichtigt. Auch bei automatisierten Systemen greifen – speziell beim Blendschutz – die Nutzer häufig manuell ein. Aufgrund von Blendung wird die Fassade geschlossen und der solare Eintrag dadurch stark verändert. Dies führt im Winter zu reduzierten solaren Einträgen und

somit zu einem erhöhten Heizwärmebedarf. Ebenso kann aufgrund der verschatteten Fassade der Tageslichteintrag so stark reduziert sein, dass Kunstlicht eingeschaltet werden muss. Dies erzeugt zum einen zusätzlichen Strombedarf und zum anderen eine weitere interne Last, welche den Kühlbedarf im Sommer zusätzlich erhöht. Um ein realistisches Bild des Gebäudes zu erhalten, muss deshalb bereits in der Planungsphase der Nutzereinfluss berücksichtigt werden. Dies bezieht sich zum einen auf die Verwendung des Fassadensystems (Verhalten bei Blendung, etc.) und zum anderen auf das Einschaltverhalten sowie die Einstellung der Dimmwerte des Kunstlichtes.

2 DALEC Prototyp

Das im Rahmen des K-Licht Forschungsprojektes entwickelte Konzeptanalysetool DALEC (www.dalec.net) bietet die vollständige Abbildung der Schnittstelle der thermischen und lichttechnischen Simulation bei Berücksichtigung verschiedenster Fassadensysteme an. Aufgrund vorsimulierter Tageslichtfaktoren können sowohl konventionelle Verschattungssysteme wie Screens und außenliegende Raffstores als auch die Vorteile von komplexen Lichtlenksystemen wie verspiegelte Lamellen innerhalb sehr schnellen Berechnungszeiten tageslichttechnisch abgebildet werden. Ebenso können durch die Lichtsimulation auch Blendungszustände detektiert werden, die sich auf die Fassadensteuerung auswirken (Schließen des Systems). So lassen sich für typische Raumgeometrien Heiz-, Kühl- und Kunstlichtbedarf mit allen beschriebenen Wechselwirkungen bestimmen. Es werden über 3000 weltweit verteilte Standorte angeboten. Trotz komplexer Berechnungsalgorithmen im Hintergrund konnte die komplette Durchführung effizient als Onlineanwendung umgesetzt werden (Abbildung 1). Dies hat folgende Vorteile:

- Sehr kurze Berechnungszeiten
- Kein Simulations-Know-How notwendig
- Keine Installation notwendig
- Einfaches „Handling“

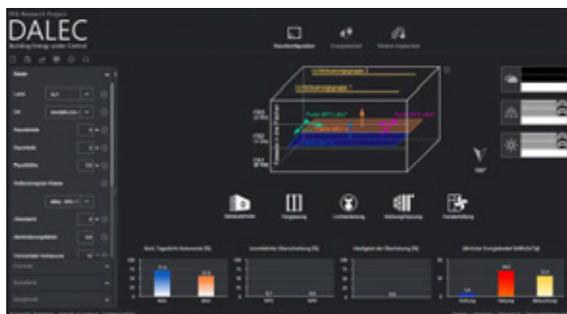


Abbildung 1: User Interface von DALEC (www.dalec.net)

Um die Wechselwirkung aus solarem Eintrag, Tageslicht und Kunstlichtbedarf bei Berücksichtigung eines Nutzerverhaltens richtig abbilden zu können, wurde das Tool in mehrere Module unterteilt. Der prinzipielle Programmablauf ist in Abbildung 2 dargestellt.

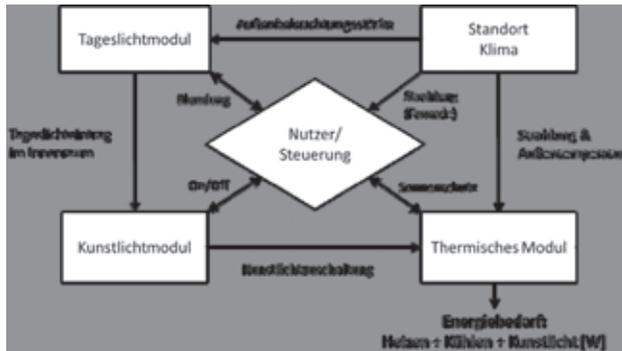


Abbildung 2: Programmablauf und Module

3 Motivation DALEC Weiterentwicklung

Mit der Entwicklung des ersten Prototyps und dem modulartig aufgebauten Berechnungskern wurde ein erster wichtiger Schritt geschaffen um Fassaden und Kunstlichtsysteme ganzheitlich bewerten zu können.

Diese Methodik konnte bisher jedoch nur für eine raumweise Betrachtung umgesetzt werden. Eine Gesamtgebäudeanalyse mit mehreren Räumen ist derzeit nicht möglich. Ein Gebäude besitzt mehrere Fassaden mit unterschiedlichen Orientierungen und somit im gleichen Zeitpunkt auch unterschiedlichen solaren Einträgen und Tageslichtversorgung. Nur eine Gesamtbetrachtung des kompletten Gebäudes lässt den tatsächlichen Energiebedarf bestimmen. Die strukturelle Voraussetzung für eine solche Gesamtgebäudebetrachtung soll im vorliegenden Projekt geschaffen werden. So lässt sich in der aktuellen Methodik das thermische und lichttechnische Verhalten von Eckräumen noch nicht abbilden. Diese Art von Räumen stellt eine besondere Herausforderung dar, da aufgrund der zweifach transparenten Fassaden die Strahlungsgänge schwieriger abzubilden sind.

Ebenso soll im nächsten Schritt die Integration von Oberlichtern ermöglicht werden um auch Industriehallen, Sporthallen, Supermärkte, etc. abbilden zu können und bereits in der Planungsphase energetisch und qualitativ zu optimieren. Um alle energetischen und qualitativen Potenziale von Kunstlichtsystemen ausnutzen zu können, müssen entsprechende Steuerungsstrategien verfolgt werden. Zusätzlich zu den bereits umgesetzten Szenarien (tageslichtabhängiges Schalten bzw. Dimmen) sollen dem Benutzer erweiterte Steuerungsmöglichkeiten geboten werden. Dazu zählt etwa die Berücksichtigung einer Maintenance Control für konstanten Leuchtenlichtstrom oder auch die Abbildung von dynamischen, auf den Biorhythmus des Menschen abgestimmte Szenarien. Schlussendlich soll der User über sogenannte Timelines eigene tages- und jahreszeitabhängige Steuerszenarien definieren können.

In der aktuellen Version kann der Benutzer außerdem Leuchteigenschaften lediglich über die Auswahl von drei bzw. zwei Lichtverteilungen für den Direkt- bzw. Indirektanteil definieren. Ziel ist es zukünftig eine Schnittstelle zu bieten um beliebige Leuchtenabstrahlcharakteristiken zu laden und in der Berechnung zu verwenden.

Die bisher entwickelte Methode beschreibt sehr gut die bauphysikalischen, lichttechnischen und energetischen Vorgänge, eine qualitative Aussage über den Komfort ist derzeit jedoch nicht möglich. So besteht die Gefahr, dass Gebäude hinsichtlich der Fassaden- und auch Kunstlichtsysteme ausschließlich energetisch optimiert werden, aber dies zu einer Variante führt, die aus Komfortgründen nicht zu empfehlen ist. Erweiterungen zur Evaluierung von Komfortkriterien (Blendung durch Kunst- und Tageslicht, thermische Behaglichkeit, etc.) werden die Planungssicherheit deutlich erhöhen.

Aufgrund des geringen Eingabeaufwandes kann schnell eine Untersuchungsvariante generiert und analysiert werden. Jedoch fehlt die Möglichkeit mehrere Varianten im direkten Vergleich gegenüberzustellen. Dies ist Voraussetzung, um schnell Abhängigkeiten zu erkennen und zielführend die beste Variante für den jeweiligen Standort zu definieren.

4 Weiterentwicklung der Methodik

4.1 Umsetzung der Methodik von raumweiser Betrachtung hin zu einem Gesamtgebäude

Aufbauend auf der bereits bestehenden Methodik wurde ein Verfahren entwickelt, welches eine Betrachtung eines Gesamtgebäudes ermöglicht. Ausgehend von Einzelräumen kann der Tool-User das zu planende Gebäude zusammensetzen. Hierfür wird die Methodik auch um die Abbildbarkeit von Eckräumen erweitert, welche zwei oder mehrere Außenfassaden mit unterschiedlichen Orientierungen besitzen. Die sehr schnellen Berechnungszeiten der Tageslichtsimulation basieren auf vorberechneten Faktoren [Werner, 2014], welche für übliche Raumsituationen vorberechnet und in Datenbanken abgelegt werden. Um die durch die Erweiterung auf Eckräume auftretende Vielzahl an möglichen Fassadenkombinationen abbilden zu können, wurde die Tageslicht-Methodik erweitert. Basierend auf den bestehenden Faktoren für einseitig befensterte Räume wird der Tageslichteintrag durch entsprechende Überlagerung bestimmt. Evaluierungssimulationen mit gängiger Lichtplanungssoftware zeigen eine sehr gute Übereinstimmung und bestätigen daher eine ausreichende Genauigkeit für die Abbildung der Tageslichtsituation in DALEC.

Während eine Tageslicht- bzw. Kunstlichtsimulation raumweise erfolgen kann, muss die thermische Betrachtung zur Ermittlung des Energiebedarfes zur Klimatisierung des Gesamtgebäudes aufgrund der Wechselwirkung zwischen den Einzelräumen gesamtheitlich durchgeführt werden. Da die Bestimmung des Heiz- und Kühlbedarfs auch für große Gebäude mit einer Vielzahl an Räumen mit unterschiedlicher Anordnung und Orientierung unmittelbar erfolgen soll, wurden die zwei folgenden Vorgehensweisen untersucht und mittels dem dynamischen Gebäudesimulationstool TRNSYS und einem Mehrzonenmodell verglichen:

„Einzelraum Adiabatisch“: Der Heiz- und Kühlbedarf wird für jeden Raum separat simuliert, aufsummiert und anschließend auf den Gesamtbedarf des Gebäudes geschlossen.

„1 Zone“: Das Gebäude wird als eine gesamte Zone betrachtet. Es liegt also ein idealer thermischer Ausgleich der Einzelräume untereinander vor.

Mittels Vergleichssimulationen mit dem Referenzgebäude der ÖNORM B 8110-6 [ÖN-B8110-6, 2013] in unterschiedlichen Klimazonen konnte gezeigt werden, dass der Heiz-

wärmebedarf für ein Gesamtgebäude mit der Methode „1-Zone“ mit einer sehr guten Genauigkeit (max. Abweichung < 3%) bestimmt werden kann. Der Kühlbedarf zeigt mit der Methodik „Einzelraum Adiabatisch“ eine bessere Übereinstimmung (max. Abweichung < 10%). Die Genauigkeit der Methoden ist für ein Tool in der frühen Planungsphase ausreichend. Die Simulationszeiten können zudem im Bereich der Berechnungszeiten eines Einzelraumes gehalten werden.

4.2 Erweiterungen der Kunstlichtsteuerung

In der Berechnung des Kunstlichtbedarfs spielt die Lichtsteuerung eine wesentliche Rolle. Die aktuell möglichen Szenarien „tageslichtabhängige Schaltung“ und „tageslichtabhängige Dimmung“ werden um komplexere Steuerungsszenarien erweitert. Dazu wird einerseits die Integration des Szenarios von „Maintenance Control“ für konstanten Leuchtenlichtstrom (Kompensation des über die Lebensdauer abnehmenden Lichtstroms) als auch die Einführung dynamischer, biologisch wirksamer Steuerungen dienen. Damit können nicht nur energetische Sparpotenziale aufgezeigt werden sondern auch Szenarien mit Auswirkungen auf den Menschen bewertet werden. Um dem Benutzer die Evaluierung eigener Steuerungskonzepte zu erlauben, soll außerdem die Definition von Timelines ermöglicht werden.

4.3 Definition von Komfortkriterien

Weiteres Hauptziel ist neben der energetischen Auswertung auch eine Bewertungsmöglichkeit nach Komfortkriterien. So kann den Planern signalisiert werden, ob die zu untersuchende Variante komfortkritische Gesichtspunkte enthält. Eine rein energetisch optimierte Gebäudevariante kann zu Behaglichkeitsproblemen hinsichtlich thermischer und visueller Gesichtspunkte führen. Dies muss unbedingt bereits in der Planungsphase erkannt und ausgeschlossen werden. Ziel ist es typische Komfortkriterien zu definieren und in entsprechende Algorithmen umzusetzen. Zu diesem Zweck wurde das etablierte Behaglichkeitskriterium nach Fanger (ISO7730) [Fanger, 1972] in die bestehende Methodik implementiert. Basierend auf der Strahlungs- und Lufttemperatur und einstellbaren Randbedingungen (z.B. Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchte, etc.) kann vereinfacht der PMV- (predicted mean vote) als auch der PPD- Wert (percentage persons dissatisfied) für jeden Zeitschritt ausgegeben werden. Dies ermöglicht das Erkennen von komfortkritischen Zuständen und Varianten.

Für die Komfortbewertung der Kunstlichtlösung stehen die Kriterien Blendung, zylindrische Beleuchtungsstärke und Modelling zu Verfügung. Die Blendung wird nach dem UGR Tabellenverfahren an Hand der eingelesenen Lichtverteilungskurven bewertet. Die Werte für die Errechnung der zylindrischen Beleuchtungsstärke und des Modellings sind vorberechnet und in der DALEC Datenbank hinterlegt. Als Bewertungskriterium dienen die Empfehlungen und Grenzwerte der EN 12464 [EN 12464-1].

4.4 Verbesserung der Auswertemöglichkeiten und des Userinterface

Eine Gesamtenergiebetrachtung aus Heizung, Kühlung und Kunstlicht kann nur über die Umrechnung auf Primärenergie erfolgen. Mittels typischen Primärenergiefaktoren für Anlagensysteme (z.B. Wärmepumpe, etc.) kann der Gesamtprimärenergiebedarf des Ge-

bäudes bestimmt werden, was eine Vergleichbarkeit zwischen mehreren Varianten ermöglicht. Ebenfalls wurde im Postprocessing die Auswertung mit einer vereinfachten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erweitert, welche dynamisch abhängig von den Investitions- und Betriebskosten die wirtschaftlichste Variante bestimmt.

Die bereits online geschaltete DALEC Version (<http://www.dalec.net>) wurde mit Mitte Mai 2016 mit einer verbesserten Hilfefunktion versehen. Neben jedem Eingabewerte sind nun auch alle Ergebnisse und Diagramme mit einem deutschen und englischen Hilfetext erläutert. Im Zuge dieses Updates wurde auch das User-Interface verbessert, was nun eine einfachere Eingabe ermöglicht.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier beschriebene Erweiterung der Methodik konnte bereits erfolgreich in Prototypen implementiert und analysiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Vorgehensweise plausible und mit komplexen Simulationstools vergleichbare Ergebnisse liefert. Ein erstes Update der DALEC-Online Anwendung wird für Ende 2016 angestrebt. In diesem Zuge ist auch eine verbesserte Ausgabe der Ergebnisse vorgesehen. So soll ein Variantenvergleich dem Nutzer ermöglichen verschiedene Fassaden- und Kunstlichtlösungen im direkten Bezug energetisch und komforttechnisch miteinander zu vergleichen. Unterstützend soll auch ein neues „Ampelprinzip“ dem User schnell und einfach signalisieren, ob eine untersuchte Variante komfortkritische Gesichtspunkte enthält. Die Umsetzung der Gesamtgebäudebetrachtung für die Online Anwendung ist für das Jahr 2017 vorgesehen.

6 Danksagung

Diese Arbeit wird durch das österreichische Forschungsprojekt „DALEC“ unterstützt, welches im Rahmen der Ausschreibung „Stadt der Zukunft“ von der FFG und BMVIT genehmigt wurde.

7 Literatur

[Fanger, 1972] P.O. Fanger, Thermal Comfort – Analysis and Applications in Environmental Engineering, McGraw-Hill, New York, 1972

[ÖN-B8110-6, 2013] Österreichisches Normungsinstitut. 2013. „ÖNORM B 8110-6 Beiblatt 3 Wärmeschutz Im Hochbau, Teil 6: Grundlagen Und Nachweisverfahren - Heizwärmebedarf Und Kühlbedarf.“

[EN 12464-1] EN 12464-1 2011. „Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen“

[Werner, 2014] Werner, M., Geisler-Moroder, D., Ebert, O., Bauer, C., Müller, R., Junghans, B., & Weittaner, R. (2014). DALEC – Day- and Artificial Light with Energy Calculation - Konzeptanalysetool für ganzheitliche Lichtplanung. In Licht 2014. Den Haag.

Localized lighting in open-plan offices

*Christel de Bakker, Myriam Aries, Helianthe Kort, Alexander Rosemann;
Eindhoven Technology of University*

Research issue

In most open-plan offices lighting is controlled centrally, regardless of whether occupants are actually present at their desk. Lighting is switched on throughout the whole space when the first occupant arrives and only switched off after the last occupant has left. This results in unnecessary energy use for lighting as occupants tend to leave their desk several times throughout the day. Controlling lighting at desk level can overcome this and result in energy savings. However, localizing lighting control has a chance of negatively affecting the visual comfort of the surrounding occupants. This study will investigate whether users' satisfaction with the lighting conditions is less compared to central control.

State of science/technology

Lighting control strategies have been developed to control lighting at a desk level. However, to our knowledge, these are only tested in open-plan offices where partitions separate desks. This cubicle lay-out is typical for open-plan offices in the United States, but in Europe partitions between desks are rare. Here, occupants, consequently, can oversee the whole office space. The dynamic behaviour of occupants will cause the lighting to change multiple times throughout the day, which may distract occupants and create annoyance. In addition, it has a chance of negatively affecting the visual comfort of the surrounding occupants. Consequently, before these strategies can be implemented in European open-plan offices, it needs to be investigated whether equally satisfying lighting conditions can be achieved with local control as with central control.

Research hypothesis

In open-plan offices with no partitions separating desks, localized lighting will result in less satisfying lighting conditions than centrally controlled lighting.

Experimental setup

A localized lighting control strategy is developed for an open-office space shared by 12 occupants. The current lighting system poses two constraints on the strategy. First, the ceiling luminaires are positioned in a fixed grid to which the desks are not aligned. Secondly, these luminaires can only be switched on and off, not dimmed. Luminaires will be controlled individually with a combination of occupancy sensors. Two local strategies will be developed and each tested for a week. Occupants will be asked to rate their satisfaction with the lighting conditions with these local strategies well as with the originally central strategy.

Results in comparison with previous findings

This study reveals whether localized lighting control strategies can be applied in open plan offices without limiting visual comfort.

Localized lighting in open-plan offices

*Christel de Bakker, Myriam Aries, Helianthe Kort, Alexander Rosemann
Unit Building Physics and Services, Eindhoven University of Technology
P.O. Box 513, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands*

Summary

Controlling lighting conditions at desk level has proven its energy savings potential. However, in open-plan offices without partitions separating desks this local control might come at expense of users' comfort. An explorative study in an office building in the Netherlands revealed the influence of local control on users' satisfaction with the lighting conditions compared to central control. Differences were found to be minimal (from .03 to .58 a 7-point scale), except for users' satisfaction with the illuminance uniformity throughout the space. This measure was less satisfying with the localized lighting, especially with scenarios where constant background illuminance levels were limited (.81 less). A direct result from this study is the recommendation to use a dimming system when applying local lighting control. More research is however needed to further confirm the findings of this study.

1 Introduction

In most open-plan offices lighting is controlled centrally, regardless of whether occupants are actually present at their desk. Lighting is switched on throughout the whole space when the first occupant arrives and only switched off after the last occupant has left. This results in unnecessary energy use for lighting as occupants tend to leave their desk several times throughout the day [Chang and Hong 2013]. Controlling lighting at desk level can overcome this and result in energy savings, which was proven by [Rubinstein and Enscoe 2010]. They conducted their study in an office with a cubicle lay-out, which is typical for offices from the United States. In Europe, however, open-plan offices do not tend to have any partitions between desks. Occupants, consequently, can oversee the whole office space. As with localized control the lighting will change multiple times throughout the day, this could distract occupants and create annoyance. In addition, it has a chance of negatively affecting the visual comfort of the surrounding occupants. To our knowledge, these effects have not yet been studied. Therefore, we conducted an explorative study in an open-plan office in the Netherlands investigating whether local control results in equally satisfying lighting conditions as with central control by evaluating both types of strategies with the occupants.

The original luminaire set-up was used as a starting point. The paper outlines the design of the lighting retrofit and explains the set-up of the experiment. The results are provided and discussed with the intent of concluding whether or not local lighting control can also be applied in European open-plan offices.

2 Lighting control design

The strategy was developed for an open-office space of an office building in the Netherlands. The original lighting system consisted of 31 luminaires each equipped with 2*36W linear fluorescent lamps. The luminaires are placed in a regular grid, as shown in Figure 1.

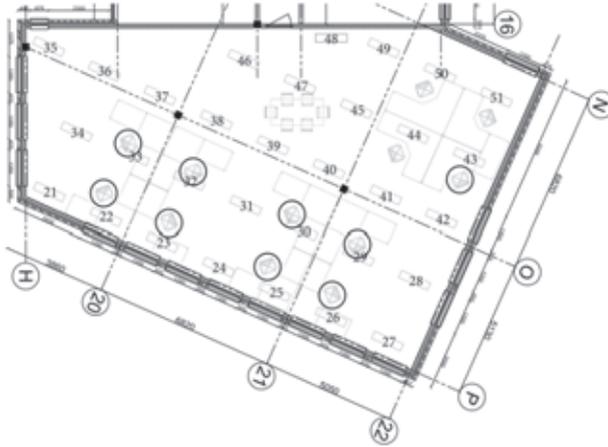


Figure 1: Test-bed space with the luminaires numbered and the location of the participants circled

Before the retrofit, the open office lighting was controlled centrally. Luminaires could be switched on and off with two switches next to the door: one for the inner grid (luminaires 28-34 and 43-46) and one for the outer grid (luminaires 21-27, 35-42 and 49-51). Two additions enabled local lighting control: first, chair sensors and motion sensors were installed at each desk for the purpose of fine-grained control. Secondly, off-the-shelf, plug-in switching nodes were placed at each luminaire enabling them to be switched on and off separately. More detailed information on this set-up can be found in Labeodan et al. [2016].

Prior to the experiment, horizontal illuminance (E_h) measurements were performed to determine which luminaires needed to be switched on to provide 500 lx on each of the desks. A Konica Minolta illuminance meter was used to measure E_h at a point at the desk, which was the same for each occupant (see Figure 1). Therefore, luminaires in the proximity of the desk were switched on one by one while daylight was absent.



Figure 2: Location of horizontal illuminance measurements indicated by the circle

Two different local strategies were developed to investigate whether it is accepted by users that luminaires respond to both their own occupancy behaviour as well as the behaviour of other occupants. Therefore, with strategy one (local control 1), each luminaire was 'owned' by only one occupant, or, in other words, only depended on the presence of one occupant. This required the luminaire to contribute the most towards the illuminance on the occupant's desk. With strategy two (local control 2), all the luminaires required to achieve 500 lx on the desk were switched on in case of occupancy. Some luminaires consequently responded to the occupancy behaviour of multiple users. Table 1 describes which luminaires were switched on for each of the occupants according to the two strategies.

Table 1: Luminaire setting of the localized lighting control strategies 1 and 2

Occupant	Local control 1		Local control 2	
	Luminaires	E_h in lx	Luminaires	E_h in lx
1	51	143	43, 44, 50, 51	430
2	43	410	43, 44	519
3	50	226	50, 44	407
4	44	502	44	502
5	29, 41	359	28, 29, 41	402
6	26	363	25, 26	525
7	30	473	30, 31	535
8	25	405	24, 25	500
9	32	339	32, 33	376
10	23	353	22, 23	487
11	33	517	33	517
12	22, 21	539	22, 21	539

As can be seen in Table 1, even when all contributing luminaires were switched on, 500 lx could not be achieved with some desks. With both strategies, luminaires at the general entrance and meeting area (luminaires 36, 38-40, 45-47) were switched on continuously, thus independently of the presence of the individual occupants, to provide a general 'background' lighting level. With strategy two, five additional luminaires in the pathways between the desks were switched on continuously because occupants experienced dissatisfaction regarding the spatial uniformity in the space with strategy one (luminaires 42, 49, 48, 31, 34).

3 Experimental set-up

The original central lighting control strategy as well as the two different localized lighting control strategies were each tested for a week in February 2016. By conducting the experiment in the winter season, the amount of daylight and thus also its influence was minimized. The three strategies were experienced by all participants, thus a within-subjects design was used. The office space was shared by twelve occupants, of which nine agreed to participate (all male; median age category 40-49). Participants were aware that a new lighting system was installed as this was done during their work hours. However, they were not aware that the local strategies of week two and three differed. Strategies were evaluated with the users with a set of questions at the end of each week. They were asked to rate their satisfaction with the amount of light on the desk, the quality of light on the desk, the glare on the computer screen, and the amount of light for computer work. These questions originate from the validated Satisfaction Questionnaire of Veitch et al. [2002]. We added two questions about

- 1) their satisfaction with the amount of light for paper work, because they also spend much time on this task, and
- 2) their satisfaction with the uniformity of the light throughout the space, because it was expected that this could be an issue with the local strategies.

For all questions a 7-point Likert scale was used. At the end of week three, interviews with the participants collected information on whether they noticed any difference between week two and three, whether they noticed a difference in the lighting, and on which system they preferred. Participants' answers were analysed with SPSS statistics. As the scores were not normally distributed and the sample size was small, no statistical tests were performed; only their mean scores and standard deviations were calculated.

4 Results

4.1 Satisfaction with lighting conditions

No participants were found to be outliers (z -score < -3 or > 3) on the satisfaction scores. Table 2 provides their means and standard deviations.

Table 2: Mean scores and standard deviations on the six measures of satisfaction with the lighting conditions (on a scale from 1 to 7)

	Central control		Local control 1		Local control 2	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Satisfaction with amount of light on desk	5.00	.93	4.89	1.05	4.44	1.33
Satisfaction with quality of light on desk	4.75	1.04	4.78	1.30	4.72	1.44
Satisfaction with glare on computer screen	5.25	1.39	4.67	1.00	4.83	1.22
Satisfaction with amount of light for computer work	5.25	.89	4.89	1.27	5.28	.97
Satisfaction with amount of light for paper work	5.13	.99	5.00	1.12	5.17	.94
Satisfaction with uniformity	4.25	1.04	3.44	1.51	4.00	1.12

Table 2 shows that, overall, differences in satisfaction between the three strategies were limited. Nevertheless, participants were more satisfied with all aspects with central control except for the quality of light on desk. However, here the difference between central control and the local control strategies was very small. The largest difference was found between central control and local control 1 on users' satisfaction with the uniformity throughout the space. This also becomes apparent from Figure 3.

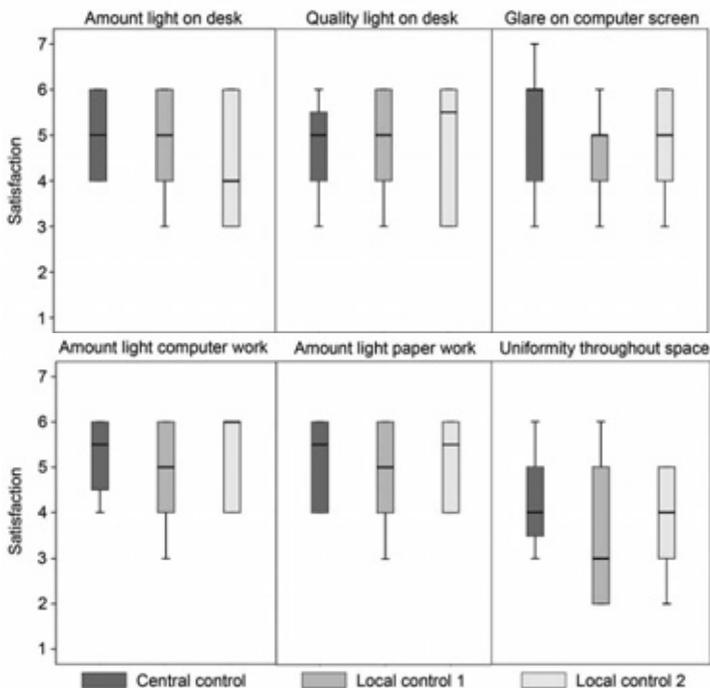


Figure 3: Boxplots on the six measures of satisfaction with the lighting conditions

However, this figure also shows that there are individual differences as the spread is large. This especially is the case with users' satisfaction with the glare on the computer screen and the uniformity throughout the space.

4.2 Preferences local control

In the interviews, six participants indicated that they did not notice any difference. One participant considered the light at the desk better during week two. Two participants had the idea that the lighting was responding faster in week two. While one preferred a slower system, thus local control 1, the other occupant did not indicate a preference.

5 Discussion

The most striking finding was that most occupants did not really seem to notice a difference between local control 1 and 2 and consequently had no preference. It suggests that there is no need to assign luminaires to only one individual to obtain understanding. Those occupants noticing a difference thought the response rate changed, instead of the number of luminaires being switched on. In the satisfaction rates, however, differences between strategies were found, although small. These seemed to result from a couple of individuals as the spread of scores was large. Some users were less satisfied with the amount of light on their desk, although more luminaires were switched on with local control 2. However, users were on average more satisfied with the amount of light for computer work and paper work with local control 2 than 1, which is in line with the actual illuminance levels pro-

vided by the two strategies. Individual differences also were found to occur with their satisfaction with the glare on the screen. This could be explained by users' different positions. Some occupants are located along the window and may consequently experience glare due to sunlight falling on their screen. A large spread was also found with the satisfaction with the illuminance uniformity. It was found to be improved with local control 2. This can be explained by the increased number of luminaires that were switched on continuously in the surrounding area. Consequently, the constant illuminance level was higher and the luminaires being controlled locally affected the uniformity only to a lesser extent. It shall be noted that this improvement could also be resulting from the users adapting to the local control.

This study was limited in time as well as in number of participants. The results consequently just give an impression how local control is experienced. As users' satisfaction with uniformity was affected most, a dimming system would fit local control better. Control strategies based on luminaire switching render it almost impossible to obtain the uniformities recommended in the NEN-EN-12464-1 norm. With a dimming system, a continuous background maintained illuminance of 100 lx can be sustained as well as 300 lx in the surrounding area fulfilling the applicable recommendations. In addition, the changes in illuminance level due to occupants leaving or arriving at their desk will also become less noticeable and consequently likely less distracting. The influence of these changes on their performance needs to be tested before applying such a dimming system with local control in real-office environments.

6 Conclusions and recommendations

The goal of this explorative study was to investigate whether local control is applicable in European open-plan offices. Participants were asked for their satisfaction with the lighting conditions under different control strategies. The results suggested that users' satisfaction with central and local control differs only minimally. Besides, it can be concluded that when developing a local lighting control strategy it is not required to have luminaires responding to only one occupant. Instead it is necessary to provide a sufficient background level to establish satisfactory uniformity throughout the space. The findings indicate advantages for implementing local lighting control. Further studies with more participants are required to further support the indicative results from this explorative study.

References

- W. Chang and T. Hong. 2013. Statistical analysis and modeling of occupancy patterns in open-plan offices using measured lighting-switch data. *Build. Simul.* (2013).
- T. Labeodan, C. De Bakker, A. Rosemann, and W. Zeiler. 2016. On the application of wireless sensors and actuators network in existing buildings for occupancy detection and occupancy-driven lighting control. *Energy Build.* (2016).
- F. Rubinstein and A. Enscoe. 2010. Saving energy with highly-controlled lighting in an open-plan office. *LEUKOS* (2010).
- JA Veitch, KMJ Farley, and GR Newsham. 2002. Environmental satisfaction in open-plan environments: 1. Scale validation and methods. (2002).

Energieeffizienz und Helligkeitseindruck im Verkauf

Andreas Ampenberger, Siegmund Staggl, Wilfried Pohl, Bartenbach GmbH

Problemstellung und Forschungsfragen

Die Warenpräsentation im Handel erfolgt oft undifferenziert auf allen Flächen mit hohem Helligkeitsniveau. Hieraus resultieren für die menschliche Wahrnehmung ein unangenehmer Lichtdruck, die Gefahr von verstärkter Blendung sowie hohe thermische Lasten, für die Verkaufsförderung eine verpasste Chance zur Aufmerksamkeitslenkung und zu allem Überfluss ein hoher Energiebedarf. Entwickelt und untersucht werden Lichtkonzepte mit differenzierter Lichtverteilung (Akzentuierung) und Farbkontrasten. Diese sollen den Lichtstrombedarf verringern und gleichzeitig die Wahrnehmung (Aufmerksamkeit, Blendung etc.) verbessern.

Stand der Technik/Wissenschaft

Die subjektive Helligkeit hängt nicht nur von der Leuchtdichte der betrachteten Fläche ab, sondern auch stark von den Leuchtdichten der Umgebung, dem Kontrast, und damit von der Lichtverteilung im Raum. Tiller und Veitch (1) zeigten, dass die Beleuchtungsstärke einer ungleichmäßigen Lichtverteilung im Vergleich zu einer gleichmäßigen zwischen 5 bis 10% reduziert werden kann und trotzdem derselbe Helligkeitseindruck erzeugt wird. Cuttle (2) entwickelte 2009 eine Metrik, um den subjektiven Helligkeitseindruck möglichst exakt zu beschreiben.

Ziele und Forschungshypothesen

Ziel der Arbeit war es, ein neues Lichtkonzept zu erarbeiten, das im Mittel ein geringeres Helligkeitsniveau ermöglicht und Aufmerksamkeit verkaufsfördernd lenkt. Hierzu wird die Grundhelligkeit reduziert und über einzelne akzentuierte Zonen ein Helligkeitszustand erzeugt, der dem Istzustand entspricht. Für Verkaufswände wurde ein hochlumiger Wallwasher neu entwickelt, der eine Akzentuierung ermöglicht und zudem die davorliegende Zone, in der die Ware geprüft wird und eine Kaufentscheidung getroffen wird, ausleuchtet. Das Konzept wird im Herbst 2016 in einem norwegischen Shopping Center realisiert und in Folge hinsichtlich Indoor Environmental Quality (IEQ) sowie dem Energiebedarf evaluiert. Die Grundlagenversuche zur wahrgenommenen Helligkeit wurden zuvor mit 30 Testpersonen anhand zweier 1:10 Modelle durchgeführt. Alle Arbeiten entstanden im Rahmen des EU-Forschungsprojektes „CommONEnergy“.

- (1) D. K. Tiller and J. A. Veitch, "Perceived room brightness : Pilot study on the effect of luminance distribution," *Light. Res. Technol.*, vol. 27, no. 2, pp. 93–101, 1995
- (2) C. Cuttle, "Towards the third stage of the lighting profession," *Light. Res. Technol.*, vol. 42, pp. 73–93, 2010.

Energy Efficiency and Perceived Brightness in retail

Andreas Ampenberger, Siegmund Staggl, Wilfried Pohl, Bartenbach GmbH

Problem statement and research question

The presentation of merchandise often happens undifferentiated with a high level of brightness. For human perception this results in an unpleasant light impression, risk of increased glare and high thermic strain. For retailer it is a missed opportunity to draw attention effectively towards goods and furthermore causes high energy demand. We developed and investigated lighting concepts with different lighting distributions (accentuation) and colour contrast. At that we aimed to reduce invested luminous flux and simultaneously improve perception (attention, glare, etc.).

State of the art

Perceived brightness not only depends on the luminance of the particular surface but also strongly on the luminances of the surroundings, the contrast and therefore on the light distribution in the room. Tiller and Veitch (1) showed that the illuminance of an inhomogeneous light distribution can be, in comparison with a homogeneous one, reduced by 5 to 10% with still having the same brightness impression. In 2009 Cuttle (2) developed a metric to describe the perceived brightness impression as accurately as possible.

Goals and hypothesis

The objective was to create a new light concept, which, on average, enables a lower level of brightness and draws attention in a promotional way. Therefor the ambient illuminance has been reduced but some zones have been accentuated with higher intensity creating a perceived brightness impression equivalent to the present situation. A retail luminaire was developed that illuminates both wall and the zone in front of it with a high lumen for distinctive accentuation. The concept will be carried out in a Norwegian shopping centre in fall 2016 and Indoor Environmental Quality (IEQ) as well as energy demand will be evaluated. Experimental work regarding hypothesis of the perceived brightness impression subject to light distribution has been carried out with 30 participants at two 1:10 models. This work was enabled by funding of the EU-research project "CommONEnergy".

- (1) D. K. Tiller and J. A. Veitch, "Perceived room brightness: Pilot study on the effect of luminance distribution," *Light. Res. Technol.*, vol. 27, no. 2, pp. 93–101, 1995
- (2) C. Cuttle, "Towards the third stage of the lighting profession," *Light. Res. Technol.*, vol. 42, pp. 73–93, 2010.

Energy efficiency and perceived brightness in retail lighting

Andreas Ampenberger*, Siegmund Staggl*, Wilfried Pohl*
*Bartenbach GmbH, Rinner Strasse 14, 6071 Aldrans, Austria

Summary

Within a small scale model of a clothing retail store we investigated the relationship between light distribution, colour temperature and perceived brightness. The key findings for this study were:

- Reduced lighting levels at zonal light scenarios were perceived as similar bright when compared to homogeneous reference lighting scenarios, consuming about 30% less energy.
- A subjective assessment showed that not the light distribution but the colour temperature of the light had a great influence when light related factors, room atmosphere factors and price/style factors were rated.
- Warm-white lighting scenes made better ratings due to room atmosphere and product estimation.

1 Introduction

Concluded from high illuminance levels found in many retail stores, lighting designer seem to assume that higher illumination levels lead to increased attention and greater stimulation of customers /1/. Disadvantages of this design approach are high energy demand, light pressure and risk of glare. Rethinking these phenomena from our experience in lighting design we know that perception of the rooms and objects of course not solely depends on the illuminance and luminance level, but among many other also on light direction, shadiness, contrast, thus a spatial light distribution. Our idea was to examine the influence of a zonal layout with higher local intensities and a reduced ambient illumination on the perception of a sale room. This lighting design can reduce the total luminous flux and in a row energy demand. This zonal concept is very natural for shops as it can guide attention to special products and areas or dissolves consciously distraction /2/.

2 Description of model

Two 1:10 models have been designed to represent typical small specialised shops (no discount, no flag store). The modelled sale room had a dimension of 8,1m x 10,0m x 3,6m (BxLxH). One front side of the shop was realized as an "open entrance" situation (as often found in shopping malls) and study participants view from this perspective into the room. Several vertical and horizontal illuminance values were measured to evaluate the spatial light distribution in the room. Scene illumination integrally was quantified photometrically by the vertical illuminance $E_{v(\text{eye level})}$ at the model opening /3/. Perceived spatial brightness was evaluated by test persons from this point of view (Figure 2). Three different lighting scenes were applied:

Homogeneous lighting scene:

The homogeneous distribution often is a result of excessive use of flood spot lights and occurs very often in small shops. In the model we realized this situation by ceiling-integrated downlights and wall-washer both applicable in cool white CCT of 5700K and warm-white CCT of 2700K.

Zonal light distribution by intensity (with a single light colour)

High overall illuminances are reduced by combining higher punctual (zonal) intensities with a reduced ambient lighting level. Wallwasher were used to precisely highlight definite wall segments. Spotlights were applied for accentuating merchandise areas at the wall and in the middle of the room space. Also two CCTs were used: 2700K and 5700K.

Zonal light distribution by intensity and contrasting light colour

In addition to the zonal light distribution a contrasting CCT was used to further intensify the zoning with a colour temperature diversification:

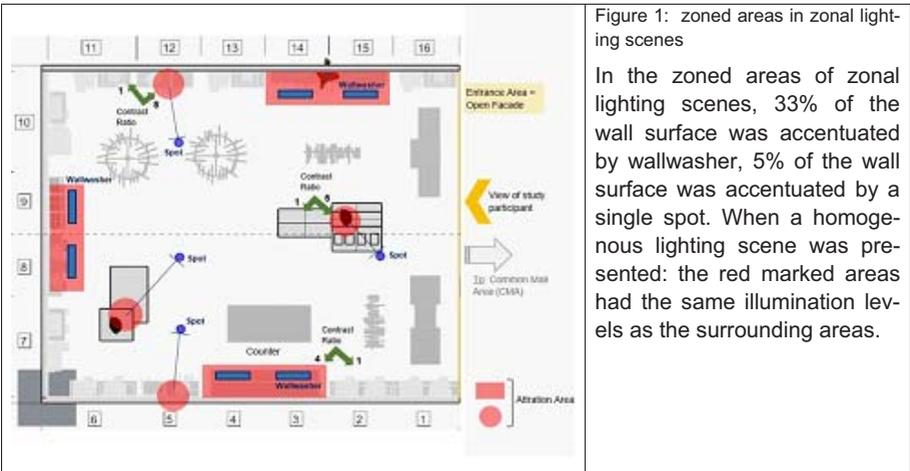


Figure 1: zoned areas in zonal lighting scenes

In the zoned areas of zonal lighting scenes, 33% of the wall surface was accentuated by wallwasher, 5% of the wall surface was accentuated by a single spot. When a homogeneous lighting scene was presented: the red marked areas had the same illumination levels as the surrounding areas.

All prepared lighting scenes are summarised in the following table:

Name of lighting scene	ambient light	zonal light	contrast Ratio
CW homogeneous	5700 K	none	
CW zonal	5700 K	5700 K	1:8* 1:4**
CW zonal ww	5700K	2700 K	1:8* 1:4**
WW homogeneous	2700K	none	
WW zonal	2700 K	2700 K	1:8* 1:4**
WW zonal cw	2700 K	5400 K	1:8* 1:4**

Table 1: Lighting scenes with used colour temperatures for zonal and homogeneous areas

* contrast ratio for accentuation with spot lights

** contrast ratio for accentuation with wallwasher

cw = cool-white, ww = warm-white

We defined four brightness classes (BC200, BC300, BC400, BC520) for different intensity levels. All brightness classes were applied for all six lighting scenes, so in sum 24 lighting scenes were presented. All lighting scenes were prepared in such a way that the E_v (eye level) for specific brightness classes had comparable values (200, 300, 400 and 520 lux resp.).

3 Hypothesis and method

In two 1:10 scale models we examined homogeneous, zonal single-coloured and zonal colour-contrasted retail lighting scenes in various intensity levels regarding their luminous flux demand and perceived brightness (Figure 2). The resulting brand image of a store illumination was also evaluated and should not be affected negatively.



Study1: successively presentation of one model

Study 2: simultaneous presentation of two models side by side

Figure 2: View by participant into the shop model

In the first study lighting scenes were presented successively and a magnitude estimation of perceived brightness was evaluated. Participants were asked to adjust a *slide control* on a continuous scale from 0 (=too dark) – 100(=too bright) according to the brightness they experienced in the model. In addition to the perceived brightness perception ratings, a short survey was done to include further subjective ratings of perceived light properties, social milieu and brand personality of a given lighting scenario. Questions for brand-related factors were derived from Schielke and Leudesdorff /4/. To evaluate subjective impression the participants rated the uniformity, the colour temperature and the chromaticity of the lighting scene. For social milieu, price (cheap vs expensive) and style (traditional vs modern) were assessed. Participants also rated whether the model and the presented products appear progressive, reputable, glamorous, elegant and natural.

In the second study we presented two lighting scenes side by side. In this part of the experiment we used a matching to sample method. The participants were instructed to alter the illumination levels in one model until the perceived brightness was just nearly the same as in a given reference mode. The participants compared the brightness of zonal lighting designs to homogeneous light solutions by dimming the zonal light scene to get the same apparent brightness as in homogeneous reference lighting scene. Therefore, 4 homogeneous lighting conditions were set as reference conditions in the right model and participants were asked to configure similar perceived brightness in the zonal lighting condition. For the homogeneous reference conditions, brightness classes BC400 and BC520 were displayed once in cool-white and once in warm-white.

4 Results

30 participants took part in our experiment (15 female and 15 male subjects). The participants aged 18 to 68 years (mean = 29.9 years, standard deviation = 10,6 years).

4.1 First study: Successive presented lighting scenes - Magnitude estimation of perceived brightness

To investigate whether different lighting settings lead to similar perceived brightness ratings we ran an ANOVA with F1= "CCT x light-distribution" (6 levels) as a repeated measurement factor. As perceived brightness is the variable we are interested in, we ran the ANOVA for the magnitude estimation of perceived brightness (slide control ratings). The ANOVA showed significant differences in the repeated measurement Factor F1 ($F(5;595)=6,709$; $DF=5$; $p<0,001$).

When comparing homogenous lighting scenes with zonal lighting scenes

- at cool-white colour temperature: a zonal illumination is perceived brighter than a homogeneous lighting scene (post-hoc LSD-test: $p=0,022$) (see *1 in Figure 3)
- at warm-white colour temperature: no significant differences were found

Best perceived brightness ratings were observed, when a warm-white ambient illumination was mixed with a cool-white zonal light. This lighting scene got significant higher brightness ratings than all other lighting scenes (all post-hoc tests $p < 0,001$ see *2 in Figure 3).

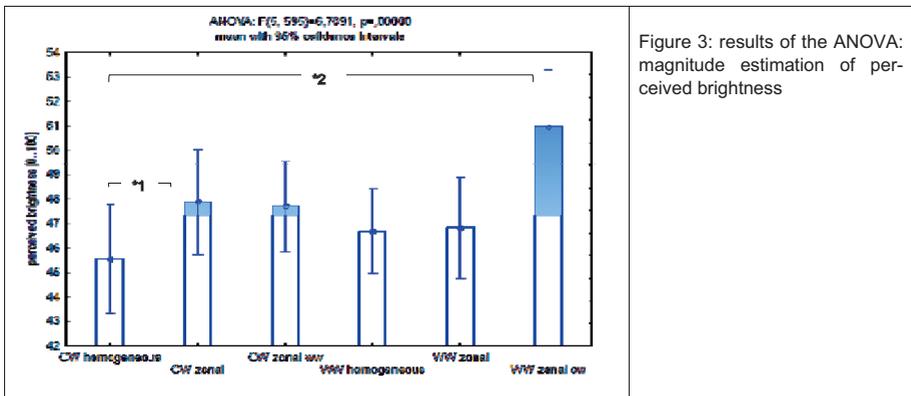


Figure 3: results of the ANOVA: magnitude estimation of perceived brightness

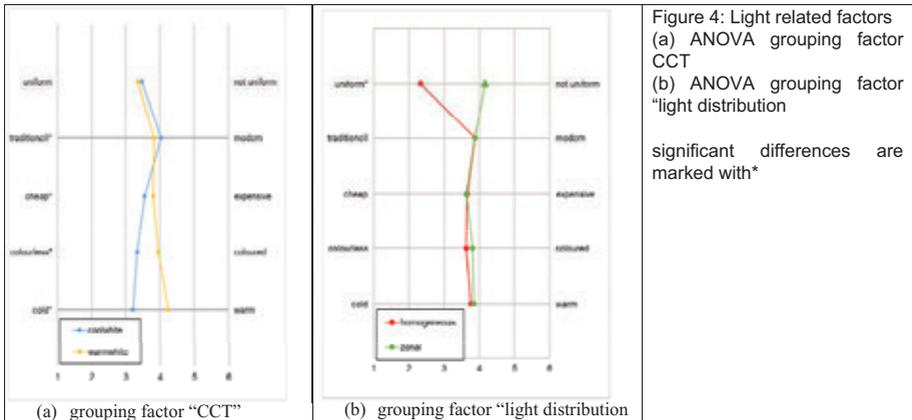
4.2 First study: Successive presented lighting scenes - Room atmosphere and product evaluation

In the first study the participants also did a short questionnaire. Questions to rate the room atmosphere were derived from /4/, for lighting perception a semantic differential was derived from Becker /5/ and for brand personality participants rated whether the scale model and the presented products appear progressive, reputable, glamorous, elegant or natural.

To investigate whether different lighting scenes lead to different ratings due to the above factors we used ANOVAs F1="CCT" as one factor and F2="light distribution" as a second factor. The appearance of the model was rated as more elegant, less progressive, more

glamorous, more natural and more reputable when models with warm-white colour temperature were presented. The light distribution did not affect the ratings of „ brand personality “.

The assessment of the lighting scene due to light related factors and price/style related factors showed that not the light distribution but the colour temperature of the light had a great influence. Warm-white scenes were rated as more expensive, more coloured and warmer than cool-white ones but also as more traditional (Figure 4:Figure 4:Figure 4(a)). Due to factor F2=light distribution only the item “uniformity” showed significant differences (Figure 4:Figure 4:Figure 4(b)).



4.3 Second study: Simultaneous presented lighting scenes - Matching to sample method

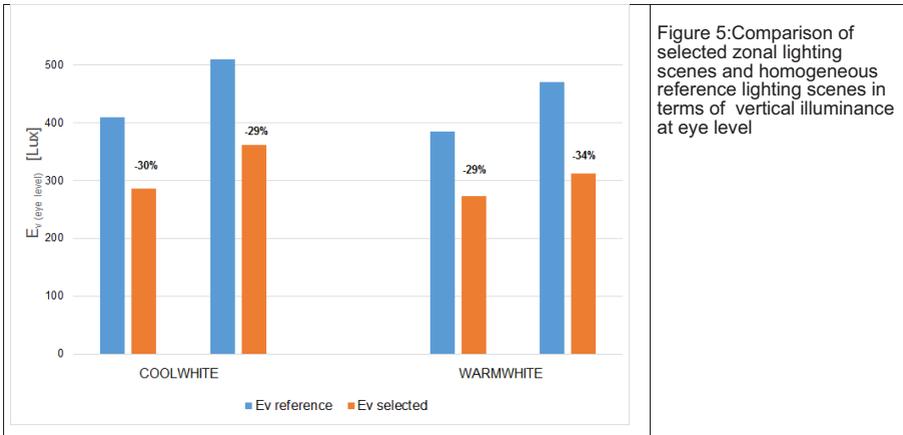
Participants directly compared homogeneous and zonal lighting conditions. BC400 and BC520 within the homogeneous lighting conditions were set as reference condition in the right model and the subjects were asked to configure similar zonal lighting conditions in the left model by selecting a zonal lighting class (out of 5 brightness classes). The minimum and maximum illumination levels that were selectable when a specific homogeneous lighting scene was presented are listed in column “possible range” in table 2.

vertical illumination at eye level [lux]					
reference	E_v Reference	E_v selected	possible range	diff	diff %
CW	410	287	220-550	123	30%
	510	361		149	29%
WW	385	273	220-510	112	29%
	470	312		158	34%

Table 2: Achievable energy savings

In Figure 5 the results for the cool-white and the warm-white scenes are showed separately. The blue columns show the vertical illumination at eye level of the reference scene, the orange columns show the mean illumination levels that were adjusted by the participants for the zonal lighting scene.

Reduced lighting levels at zonal light scenes were perceived as similar bright when compared to homogeneous reference lighting scenes. For the brightness classes BC400 and BC520 as a reference the range of possible brightness adjustments for the zonal scenes were between 220 lux and 550 lux. For this reference conditions energy savings reach the value of approximately 30% to 34%.



5 Pilot installation in Trondheim

The concept of the zonal spatial distribution will be applied this autumn in a small wool shop of 100 m² in a Norwegian shopping mall to evaluate the concept by field measurements and questionnaires regarding indoor environmental visual quality and energy demand. For sale walls we developed a new luminaire with high lumen output which can illuminate both wall and sale area in front.

References

- /1/ Ticleanu CC, Littlefair PJ, Howlett GJ: The essential guide to retail lighting. 1st ed. Watford. IHS BRE Press; 2013
- /2/ Bartenbach C: Goods – Visual perception – Decisions. in: Messedat J, editor. Retail architecture S-XXL. Stuttgart. Avedition; 2015. p. 84-89
- /3/ Cuttle C: Lighting Design. A perception-based approach. 1st ed. New York: Routledge; 2015.
- /4/ Schielke T, Leudesdorff M: Impact of lighting design on brand image for fashion retail stores. Lighting Res. Technol. 2014; 0: 1-21
- /5/ Becker U, Novak H: The everyday-life-approach as a new research perspective in opinion and marketing research. Esomar congress (European Society of Opinion and Marketing Research); 1982; 269-288

Erfahrung mit Beleuchtung für die Smart City Aspern

Ing. MMag. Gerald Wötzl, Bakk.; Magistratsabteilung 33 - Wien Leuchtet

Ziel

Die LED hat in innerhalb weniger Jahre die konventionelle Technik nahezu komplett verdrängt. Die Seestadt wird als erster Stadtteil komplett in LED beleuchtet. Zum Einsatz ist das von der MA 33 – Wien Leuchtet entwickelte, modulare Beleuchtungskonzept gekommen.

Beschreibung

Auf dem ehemaligen Flughafen Aspern entsteht derzeit das größte Stadterweiterungsprojekt der Stadt Wien. Auf einer Fläche von etwa 340 Fußballfeldern sollen im nächsten Jahrzehnt Wohnungen und Arbeitsplätze für mehr als 20.000 Menschen geschaffen werden. Die Seestadt wird als erster Stadtteil komplett in LED beleuchtet.

Die Stadt Wien hat eine Smart City Rahmenstrategie veröffentlicht. Das Smart City Konzept der Stadt Wien erhebt als erstes Anspruch auf Ressourcenschonung. Das Kernstück des modularen Leuchten-Konzeptes der MA 33 zielt darauf ab:

- effizienteste Lichterzeugung mit effizientester Lichtverteilung
- Gehäuse kann jahrzehntelang im Einsatz bleiben, auch wenn sich die Beleuchtungstechnik verändert und weiterentwickelt.
- Wartungsarbeiten sind ohne Werkzeuge durchführbar und können mit wenigen Handgriffen schnell und einfach erfolgen.
- maximale Reduktion der Nachhimmelaufhellung durch Blendschuten
- nachträglicher Einbau von Smarter Technik wie Sensoren einfach möglich

Derzeit erhellen knapp 1000 Leuchten den bereits fertiggestellten Bereich Seestadt Süd. Im Endausbau werden mehr als 4.000 Leuchten das ehemalige Flugfeld in einer neuen Qualität der öffentlichen Beleuchtung erhellen.

In der Präsentation wird die Beleuchtungslösung in Aspern vorgestellt und über Erfahrungen mit ökologischen Aspekten berichtet. Die Erfahrungen zeigen, dass das Konzept der Stadt Wien sehr erfolgversprechend und gleichzeitig zukunftsorientiert ist. Einfache Maßnahmen wie Blendschuten helfen, um die Lichtführung zu verbessern oder unerwünschte Nebenwirkungen wie Nachhimmelaufhellung bzw. übermäßige Fassadenaufhellungen zu vermeiden. Derzeit wird an der Weiterentwicklung gearbeitet, die die derzeit ungelösten Probleme mit Blendung verbessern sollen.

Monitoring der tatsächlichen Energieeinsparung bei Einsatz von LED in der Straßenbeleuchtung am Beispiel der Stadt Norden

*Sabine Piller, Beratung für Energieeffizienz und Licht, Freiligrathstraße 1, 10967 Berlin
Susanne Korhammer, TARA Ingenieurbüro Nordwest, Lange Str. 6, 26316 Varel*

Problemstellung

Der Einsatz von LED in der Straßenbeleuchtung ist heute Standard. Vor allem die durch verschiedene Ministerien bereitgestellten Fördermittel haben in den letzten Jahren zu einer hohen Modernisierungsaktivität mit LED und damit zu einer erheblichen Steigerung der Energieeffizienz in der Straßenbeleuchtung geführt. Allerdings erfolgt nur in wenigen Kommunen nach der Installation ein Monitoring der durch die Erneuerung erreichten Reduzierung des Energieverbrauchs. Einsparungen werden in der Regel auf Grundlage realistischer Annahmen abgeschätzt oder indirekt aus Verbrauchsabrechnungen kalkuliert. Denn der Beitrag neuer Leuchten und Steuerungssysteme zur Einsparung kann nur dann aus Messdaten ermittelt werden, wenn dafür eigens Zähler installiert wurden. Dies gilt insbesondere bei der Steuerung durch Präsenzmeldung.

Ziel

Darstellung der tatsächlich erreichten Energieeinsparung bei der Modernisierung von Straßenbeleuchtung mit LED-Leuchten und Einsatz verschiedener Steuerungen des Beleuchtungsniveaus anhand von gemessenen Daten.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Motiviert durch den Bundeswettbewerb „Kommunen in neuem Licht“ des BMBF und die Fördermöglichkeiten im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des BMUB, wurden in der Stadt Norden verschiedene Projekte zur Modernisierung der Straßenbeleuchtung mit LED umgesetzt. Es wurden LED Leuchten mit verschiedenen Steuerungssystemen installiert, teilweise mit autarker Zeitsteuerung, teilweise betrieben über ein Telemanagement mit frei wählbarem Steuerungsprofil, teilweise sind Präsenzmelder im Einsatz. Die neuen Leuchten ersetzen vorwiegend alte Pilzleuchten mit Quecksilberdampf-Lampen. Zur Dokumentation der Einsparung wurden in mehrere Schaltkästen fernauslesbare Zähler eingebaut. Die Analyse der Viertelstundenwerte zeigt die tatsächlich erreichte Energieeinsparung der neuen Leuchten und der verschiedenen Steuerungssysteme.

Realisierungsgrad

Die Modernisierung wurde in den Jahren 2013 bis 2015 durchgeführt. Messdaten aus bis zu 3 Jahren konnten ausgewertet und analysiert werden.

Monitoring of the actual energy savings with LED street lighting – The example of the city of Norden

*Sabine Piller, Beratung für Energieeffizienz und Licht, Freiligrathstraße 1, 10967 Berlin
Susanne Korhammer, TARA Ingenieurbüro Nordwest, Lange Str. 6, 26316 Varel*

Issue

LEDs are nowadays commonly applied in street lighting. The funding which has been provided by several German ministries in the last years lead to a boost in modernisation activities with LED technology and resulted in a significant increase in energy efficiency in street lighting. However, only few municipalities monitor the real energy reduction once the new installations are in place. Typically, savings are estimated based on realistic assumptions and calculated indirectly from invoices. But actual saving can only be determined where meter have been installed to deliver measured data. This is especially true for street lights that are controlled by presence detectors.

Aim

Aim of this paper is to report on actual savings that have been achieved by modernisation of street lighting with LEDs and the application of different systems of lighting level control using measured data.

Description of the innovation/»best practice«

In the city of Norden several street lighting modernisation projects with LED technology have been carried out, mainly motivated by the competition “Kommunen in neuem Licht” (municipalities in a new light) that was organised by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and the funding provided in the framework of the national climate protection initiative of the Federal Ministry for the Environment (BMUB). LED luminaires were installed together with several control systems, partly based on stand-alone time control, partly via a remote control system and partly based on presence detectors. The new LED luminaires replaced old luminaires with high pressure Mercury lamps. To record the savings meters were installed in several cabinets. The analysis of the quarterly-hours values show the actual energy savings achieved through the new luminaires and the different control systems.

Level of realization

The modernisation was realised in 2013 to 2015. Measured data of up to 3 years could be evaluated.

Monitoring der tatsächlichen Energieeinsparung bei Einsatz von LED in der Straßenbeleuchtung am Beispiel der Stadt Norden

Sabine Piller, Beratung für Energieeffizienz und Licht, Freiligrathstraße 1, 10967 Berlin

Susanne Korhammer, TARA Ingenieurbüro Nordwest, Lange Str. 6, 26316 Varel

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag zeigt anhand von Messdaten, die in verschiedenen Schaltstellen des Nordsee-Heilbades Norden-Norddeich aufgenommen wurden, welche Einsparungen durch die Umrüstung von alten Straßenleuchten mit Quecksilberdampf-Hochdrucklampen auf moderne LED Leuchten erreicht werden kann. Die Lichtleistung der neuen Leuchten wird einerseits über eine Präsenzmeldung, andererseits über ein optimiertes Dimmprofil gesteuert. Im Ergebnis zeigt sich das Energieeinsparungen von über 80% bzw. 75% erreichbar sind.

1 Einleitung

1.1 Das Nordsee-Heilbad Norden-Norddeich

Das Nordseeheilbad Norden-Norddeich liegt im Nordwesten Ostfrieslands, direkt zwischen der Nordsee mit ihrem Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer, Weltnaturerbe Unesco seit Juli 2009 und der ältesten Stadt Ostfrieslands, der Stadt Norden. Ostfriesland gehört zur Spitzengruppe der Ferienziele in Deutschland. Die Bedeutung des Tourismus für Norddeich verdeutlicht die Zahl der Übernachtungen pro Saison (rund. 1,4 Millionen). Immer wichtiger wird gerade für den Tourismus innerhalb Deutschlands der Begriff der Nachhaltigkeit. Innovation in einem Feriengebiet, die zu Energieeinsparungen bei der Straßenbeleuchtung führt, unterstützt diesen Gedanken.

1.2 Hintergrund

Der Einsatz von LED in der Straßenbeleuchtung ist heute Standard. Vor allem die durch verschiedene Ministerien bereitgestellten Fördermittel haben in den letzten Jahren zu einer hohen Modernisierungsaktivität mit LED und damit zu einer erheblichen Steigerung der Energieeffizienz in der Straßenbeleuchtung geführt. Allerdings erfolgt nur in wenigen Kommunen nach der Installation ein Monitoring der durch die Erneuerung erreichten Reduzierung des Energieverbrauchs. Einsparungen werden in der Regel auf Grundlage realistischer Annahmen abgeschätzt oder indirekt aus Verbrauchsabrechnungen kalkuliert. Denn der Beitrag neuer Leuchten und Steuerungssysteme zur Einsparung kann nur dann aus Messdaten ermittelt werden, wenn dafür eigens Zähler installiert wurden. Dies gilt insbesondere bei der Steuerung durch Präsenzmeldung.

Motiviert durch den Bundeswettbewerb „Kommunen in neuem Licht“ des BMBF und die Fördermöglichkeiten im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des BMUB, wurden in der Stadt Norden verschiedene Projekte zur Modernisierung der Straßenbeleuchtung mit LED umgesetzt. Es wurden LED Leuchten mit verschiedenen Steuerungssystemen installiert, teilweise mit autarker Zeitsteuerung, teilweise betrieben über ein Telemangement mit frei wählbarem Dimmprofil, teilweise sind Präsenzmelder im Einsatz. Die neuen Leuchten ersetzen vorwiegend alte Pilzleuchten mit Quecksilberdampf-Hochdrucklampen. Zur Dokumentation der Einsparung wurden in mehrere Schaltkästen fernauslesbare Zähler

ler eingebaut. Die Analyse der Viertelstundenwerte zeigt die tatsächlich erreichte Energieeinsparung der neuen Leuchten und der verschiedenen Steuerungssysteme.

1.3 Ziel des Beitrags

Der vorliegende Beitrag stellt tatsächlich erreichte Energieeinsparung bei der Modernisierung von Straßenbeleuchtung mit LED-Leuchten und Einsatz verschiedener Steuerungen des Beleuchtungsniveaus anhand real gemessener Daten vor.

2 Die Straßenbeleuchtung in der Stadt Norden

In der Stadt Norden werden 4.150 Lichtpunkte betrieben. Vor der Modernisierung mit LED Leuchten wurden zum großen Teil Quecksilberdampf-Hochdrucklampen (HPM) als Leuchtmittel eingesetzt. Der Gesamtenergieverbrauch für die Straßenbeleuchtung belief sich auf rund 1.250.000 kWh. Seit 2012 kommen bei der Sanierung bzw. Neuinstallation vermehrt LED Leuchten zum Einsatz.

3 LED Projekt – „Kommunen in neuem Licht“

Das erste LED Projekt wurde im Nordsee-Heilbad Norden-Norddeich umgesetzt. Gefördert über den vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ausgeschriebenen Wettbewerb „Kommunen in neuem Licht“ wurden alte Pilzleuchten durch moderne LED Leuchten ersetzt. Die Bestandsleuchten waren vorwiegend mit HPM Leuchtmitteln mit einer Nennleistung von 80 Watt bestückt. 2-flammige Leuchten wurden teilweise in Halbnachtschaltung betrieben. Die Betriebsstunden der Straßenbeleuchtung betragen in Norden etwas unter 4.000 Stunden pro Jahr, wobei ca. 2.500 Stunden auf die Wintermonate (Oktober bis März) und 1.500 Stunden auf die Sommermonate (April bis September) entfallen, d.h. 63 % der Energie für die Straßenbeleuchtung wird im Winter benötigt

*Abb. 1: Veraltete Pilzleuchte in Norddeich
(Quelle: Stadt Norden)*



Andererseits sind die Bereiche, in denen sich vorwiegend Ferienwohnungen befinden, gerade in den Wintermonaten nur sehr schwach frequentiert. Aus diesem Grund eignen sich diese Gebiete bei der Modernisierung der Straßenbeleuchtung besonders gut für den Einsatz einer Präsenzsteuerung. In Bereichen, in denen ein ständiger Wohnsitz überwiegt, hat sich Norden für die Reduktion des Beleuchtungsniveaus in den Nachtstunden über ein Telemanagementsystem mit frei wählbarem Dimmprofil entschieden. Insgesamt wurde in diesem Projekt 320 neue Leuchte installiert, 60 davon mit Präsenzsteuerung, die restlichen 260 mit über das Telemanagementsystem wählbarem Dimmprofil.

3.1 Datenerfassung

Im Rahmen des Monitorings werden knapp ein Drittel der neuen Leuchten über Zähler in vier Schaltstellen in Norddeich vermessen. Die Erfassung der Daten ermöglicht einen realistischen Nachweis der erreichbaren Stromeinsparung durch effiziente LED-Technik mit bedarfsgerechter Steuerung des Beleuchtungsniveaus.



Die nebenstehende Abbildung zeigt die Verteilung der vier Schaltstellen Molenstraße, Muschelweg, Pelikanstraße und Briggstraße in Norddeich, in denen seit April 2012 die viertelstündlichen Leistungsbezüge erfasst werden

Abb. 2: Lage der Schaltstellen mit Zähler zur Datenerfassung in Norden-Norddeich

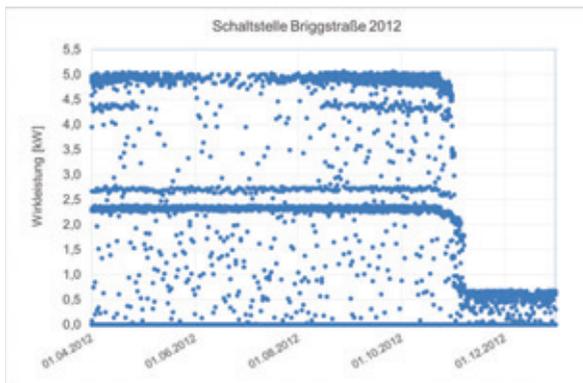
Die Umrüstung der Beleuchtung begann Ende Oktober 2012 und wurde im März 2013 abgeschlossen. Über die Schaltstellen Pelikanstraße und Briggstraße werden 53 Leuchten mit Präsenzmeldung erfasst, wohingegen die Schaltstellen Molenstraße und Muschelweg 44 Leuchten versorgen, die über das Telemanagementsystem gedimmt werden.

3.2 Präsenzsteuerung in Norden-Norddeich

Ein wesentlicher Vorteil von LED-Beleuchtung gegenüber konventionellen Leuchtmitteln ist ihre Steuerbarkeit. Dieser Vorteil wird in den Feriensiedlungen des Nordsee-Heilbades durch steuern des Beleuchtungsniveaus über eine Präsenz-Sensorik genutzt: Das Grundniveau der Beleuchtung ist auf 20 % eingestellt. Wird die Annäherung einer Person oder eines Fahrzeugs detektiert, fährt die Beleuchtung auf 100 % hoch. Die Leuchten kommunizieren untereinander, so dass der Lichtstrom in bis zu 4 Leuchten in Bewegungsrichtung gleichzeitig angehoben wird. Nach passieren einer Leuchte verringert sich das Beleuchtungsniveau wieder auf 20%. Der Wechsel des Beleuchtungsniveaus erfolgt in einer angepassten, für Fußgänger und Anwohner nahezu unmerklichen Geschwindigkeit. In den 3 Jahren Betrieb gab es bisher weder Beschwerden zum Lichtwechsel noch zum Niveau der Beleuchtung.

Vergleich alte/neue Beleuchtung

In der folgenden Abbildung ist die gemessene Wirkleistung von 1. April 2012 (Zählereinbau) bis 31. Dezember 2012 für die Schaltstelle Briggstraße dargestellt. Die maximale Leistung betrug 5,07 kW. Deutlich zu erkennen ist der Rückgang der Leistung auf ca. 0,7 kW nach der Umrüstung der Leuchten ab Ende Oktober 2012. Die Häufung der Messpunkte bei 2,3 kW zeigt die Halbnachtschaltung der alten Beleuchtung.



Nur eine der über die Schaltstelle Briggstraße versorgten Leuchten wurde in Ganznachtschaltung betrieben. Die Halbnachtschaltung führt zu einer durchschnittlichen Leistung von 3,4 kW bzw. ein jährlicher Energieverbrauch von 13.627 kWh für die alten Leuchten.

Abb. 3: Lastgang Schaltstelle Briggstraße (1.4.2012 - 31.12.2012)



In der nebenstehenden Abbildung ist die Verringerung der installierten Leistung während der Umrüstung zwischen 24. Oktober 2012 und 8. November 2012 zu sehen. Nach der Umrüstung beträgt die installierte Leistung nur noch 0,65 kW.

Abb. 4: Lastgang Schaltstelle Briggstraße (20.10.2012 - 31.12.2012)

Einen Vergleich der Energieverbräuche aus den gemessenen Viertelstundenwerten für 2012 und 2013 und die erreichten Energieeinsparungen zeigen die folgenden beiden Abbildungen:

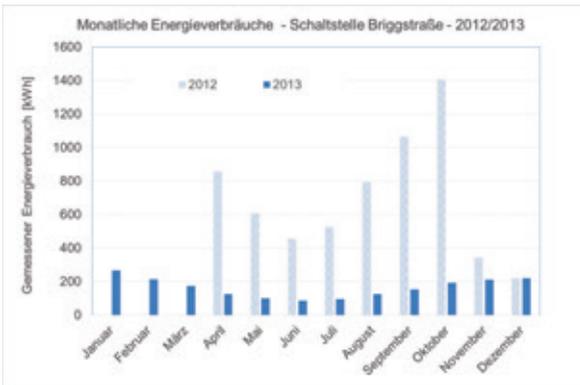


Abb. 5: Energieverbräuche Schaltstelle Briggstraße 2012/2013

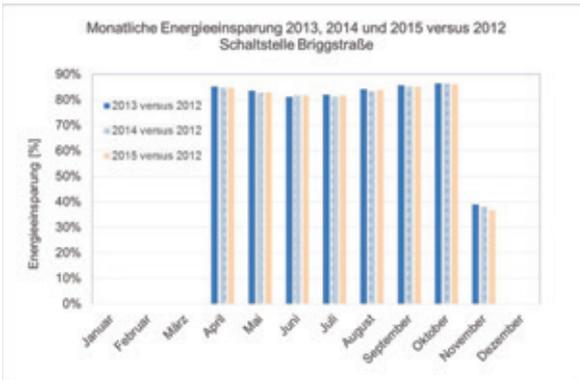


Abb. 6: Energieeinsparung in den Jahren 2013, 2014 und 2015, jeweils im Vergleich zu 2012 für die Schaltstelle Briggstraße

Ergebnis Präsenzsteuerung

Die Messwerte der Schaltstelle Briggstraße zeigen, dass bei der Umrüstung von Quecksilberdampf-Hochdrucklampen auf LED-Leuchten mit Präsenzsteuerung in Feriensiedlungen eine Einsparung zwischen 81% und 86% erreicht werden kann. Im Vergleich zu einer Umrüstung ohne Steuerung konnte durch die Präsenzmelder die Einsparung um bis zu 31% gesteigert werden. Ein erheblicher Zusatznutzen für das Nordsee-Heilbad, das direkt am Weltnaturerbe Wattenmeer liegt, ist auch die Reduktion der Lichtimmission durch das geringe Grundniveau der Beleuchtung von 20%.

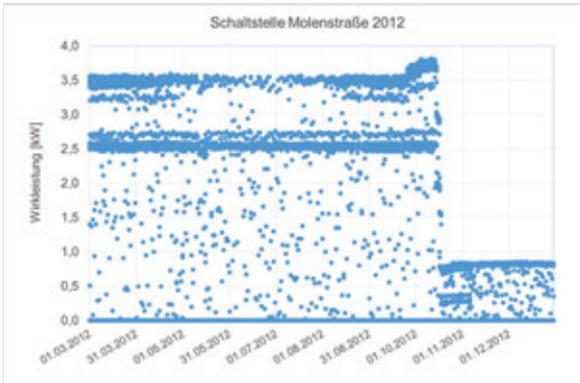
Für die Schaltstelle Pelikanstraße ergeben sich etwas geringere Einsparungen, da die Pelikanstraße - obwohl sie ebenfalls im Feriengebiet liegt - eher den Charakter einer Sammelstraße hat und deshalb häufiger frequentiert wird.

3.3 Dimmung über Telemanagementsystem in Norden-Norddeich

Eine weitere Möglichkeit zum Reduzieren des Beleuchtungsniveaus ist die Dimmung über ein Telemanagementsystem. In Norden-Norddeich wurde ein Telemanagementsystem installiert, das ein nahezu frei wählbares Profil für die Dimmung ermöglicht. In den ersten Monaten wurde die Beleuchtung zunächst mit einem Standardprofil ähnlich der Halbnachtschaltung betrieben. Im Februar 2013 erfolgte dann eine Optimierung auf ein Profil mit mehreren Dimmstufen.

Vergleich alte/neue Beleuchtung

In der folgenden Abbildung ist die gemessene Wirkleistung von 1. März 2012 (Zählereinbau) bis 31. Dezember 2012 für die Schaltstelle Molenstraße dargestellt. Die maximale Leistung betrug 3,82 kW. Deutlich zu erkennen ist der Rückgang der Leistung auf ca. 0,9 kW nach der Umrüstung der Leuchten ab Mitte Oktober 2012.



Die Häufung der Messpunkte bei 2,7 kW zeigt, dass ein Teil der alten Beleuchtung in Halbnachtschaltung betrieben wurde. Die Halbnachtschaltung führt zu einer durchschnittlichen Leistung von 2,95 kW bzw. ein jährlicher Energieverbrauch von 11.794 kWh für die alten Leuchten.

Abb. 7: Lastgang Schaltstelle Molenstraße (1.3.2012 - 31.12.2012)

Einen Vergleich der Energieverbräuche aus den gemessenen Viertelstundenwerten für 2012 und 2013 und die erreichten Energieeinsparungen zeigen die folgenden beiden Abbildungen:

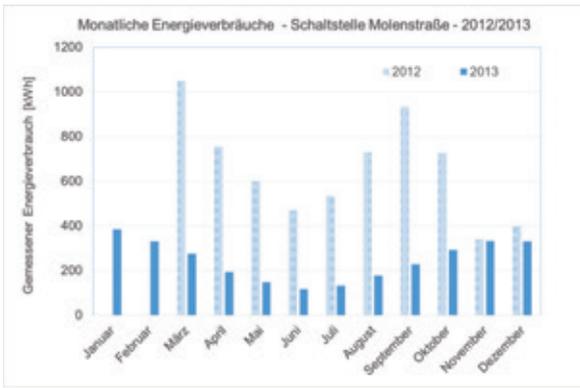


Abb. 8: Energieverbräuche Schaltstelle Molenstraße 2012/2013

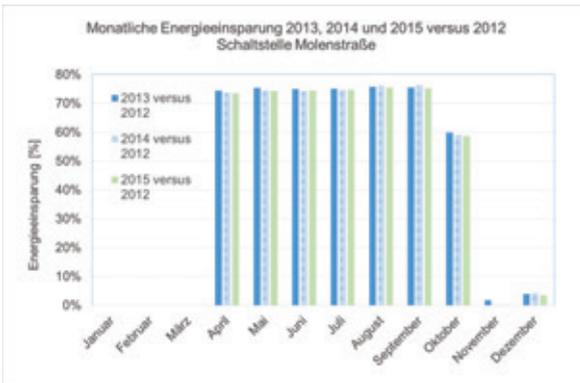


Abb. 9: Energieeinsparung in den Jahren 2013, 2014 und 2015, jeweils im Vergleich zu 2012 für die Schaltstelle Molenstraße

Ergebnis Dimmung über Telemangement

Die Messwerte der Schaltstelle Molenstraße zeigen, dass bei der Umrüstung von Quecksilberdampf-Hochdrucklampen auf LED-Leuchten mit einem angepassten Dimmprofil eine Einsparung von ca. 75% erreicht werden kann. Im Vergleich zu einer Umrüstung ohne Steuerung konnte durch die Reduzierung des Beleuchtungsniveaus die Einsparung um ca. 20% gesteigert werden. Auch beim Telemangementsystem wird ein Zusatznutzen für das Nordsee-Heilbad, durch die Verringerung der Lichtimmission in den Nachtstunden erreicht. Die Einsparungen in der Schaltstelle Muschelweg sind mit denen der Schaltstelle Molenstraße vergleichbar, da bei beiden dasselbe Dimmprofil hinterlegt ist.

4 Fazit

Über das Monitoring der Daten, die in den Schaltstellen in Norden-Norddeich gemessen wurden, konnte eine Energieeinsparung von über 80% für die Präsenzmeldung und 75% für ein optimiertes Dimmprofil (Telemangementsystem) nachgewiesen werden. Die Einsparungen sind in den drei Jahren nach der Installation weitgehend stabil geblieben.

Ein besonderer Dank der Autorinnen geht an den Fachdienst Umwelt und Verkehr im Fachbereich Planen, Bauen, Umwelt der Stadt Norden für das Ermöglichen der Datenanalyse sowie an die Stadtwerke Norden für die kompetente Unterstützung beim Monitoring und der zur Verfügung Stellung des umfangreichen Datenmaterials.

Straßenbeleuchtung im westlichen Balkan – Erste Erfahrungen mit Einspar-Contracting am Beispiel Serbien und Montenegro

*Sabine Piller, Beratung für Energieeffizienz und Licht, Freiligrathstraße 1, D 10967 Berlin
Dr. Siegfried Brenke, GFA Consulting Group, c/o Auf dem Rheinbüchel 2a, D 53572 Unkel
Zoran Kapor, GFA South East Europe, Kolarceva 7, 11000 Belgrad, Serbien*

Problemstellung

In den (meist veralteten) Straßenbeleuchtungssystemen der Länder des westlichen Balkans schlummert ein hohes Potenzial zur Entlastung der kommunalen Kassen durch die Reduzierung des Energieverbrauchs. Die Finanzierung der Investitionen stößt jedoch schnell an die Verschuldungsgrenzen der kommunalen Haushalte und hat verglichen mit anderen Vorhaben oft die geringere Priorität. Private „Energy Service Companies“ (ESCOs), die ihre Investitionen über die Energieeinsparung refinanzieren sind deshalb zunehmend eine willkommene Alternative. Auch wenn die Gesetzeslage im Moment noch nicht optimal ist, lässt sie inzwischen in den meisten Ländern die Anwendung von „Energy Performance Contracting“ (EnPC) zu und Modellverträge liegen teilweise vor. Damit die Kommunen solche Projekte ausschreiben und die dazugehörigen Verträge abschließen können, müssen jedoch verlässliche Daten zum vorhandenen Beleuchtungssystem und den aktuellen Prozessen vorliegen.

Ziel

Das Ziel von EnPC ist die Hebung von wirtschaftlichen Energieeffizienzpotenzialen in Kommunen durch private Partner. Gleichzeitig soll dabei die Qualität der Leistung (hier Straßenbeleuchtung) verbessert werden.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Straßenbeleuchtung ermöglicht die Anwendung von EnPC bei vergleichsweise geringem Investitionsaufwand. Zur Umsetzung eines solchen Projektes benötigen Kommunen Unterstützung bei der Ermittlung der Bestandsdaten, der Entwicklung sinnvoller Konzepte für die Straßenbeleuchtung und der Bestimmung der zu erwartenden Einsparungen sowie eine Hilfestellung bei Ausschreibung und Vertragsentwicklung. Der Beitrag gibt einen Überblick zu Bestandsdaten von Straßenbeleuchtungssystemen in Kommunen in Serbien und Montenegro und geht auf die ermittelten technischen und wirtschaftlichen Einsparpotenziale ein, die als Grundlage für aktuelle und zukünftige Ausschreibung dienen.

Die dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des „EBRD ESCO Pipeline Projects“ erreicht, – einem Projekt, das im Rahmen des durch die European Bank for Reconstruction and Development (EBRD) entwickelten und durch die EU finanzierten „Regional Energy Efficiency Programme (REEP) for the Western Balkans“, durchgeführt wurde.

Realisierungsgrad

Eine erste Ausschreibung wurde im Juni 2016 veröffentlicht. Weitere Ausschreibungen sind in Vorbereitung und werden in 2016 veröffentlicht.

Street lighting in the western Balkans – First experience with energy performance contracting from Serbia and Montenegro

*Sabine Piller, Beratung für Energieeffizienz und Licht, Freiligrathstraße 1, D 10967 Berlin
Dr. Siegfried Brenke, GFA Consulting Group, c/o Auf dem Rheinbüchel 2a, D 53572 Unkel
Zoran Kapor, GFA South East Europe, Kolarceva 7, 11000 Belgrad, Serbien*

Issue

Energy savings in old inefficient street lighting installations in the countries of the Western Balkan offer a high potential to reduce the burden on municipalities budgets. But the financing of investments in efficient street lighting soon faces the debt limit of the local budgets and other projects of higher priority. As a result, private Energy Service Companies (ESCOs) which refinance their investments by the achieved energy savings are increasingly a welcome option. Although the legal situation is not yet optimal, Energy Performance Contracting (EnPC) projects are now applicable in most countries and model contracts exist in most countries. To tender and contract such projects, municipalities need to have reliable data on the present street lighting system and the related processes available.

Aim

The aim of EnPC is to realise economically feasible energy efficiency potentials in municipalities by a private partner. Commonly, the quality of service (here street lighting) will be improved in parallel.

Description of the innovation/»best practice«

In comparison to other projects, the required invest volume for EnPC projects in street lighting is relatively low. To realise such projects, municipalities need support in the inventory process, the development of appropriate lighting concepts and the determination of savings that can be expected. Further assistance is required in preparing the tender documents and the contract. The current paper gives an overview of the inventory data of street lighting systems in Serbia and Montenegro and addresses the technical and economic saving potentials. This data will be the basis for current and future tendering.

The presented results were achieved within the „EBRD ESCO Pipeline Project“, a project that was carried out in the framework of the EU funded „Regional Energy Efficiency Programme (REEP) for the Western Balkans“ which was developed by the European Bank for Reconstruction and Development (EBRD).

Level of realization

A first tender was published in June 2016. Further tender documents are in preparation and will be published in 2016.

Straßenbeleuchtung im westlichen Balkan – Erste Erfahrungen mit Energiespar-Contracting am Beispiel Serbien und Montenegro

Sabine Piller, Beratung für Energieeffizienz und Licht, Freiligrathstraße 1, D 10967 Berlin
Dr. Siegfried Brenke, GFA Consulting Group, c/o Auf dem Rheinbüchel 2a, D 53572 Unkel
Zoran Kapor, GFA South East Europe, Kolarceva 7, 11000 Belgrad, Serbien

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden die technischen Rahmenbedingungen der Straßenbeleuchtungssysteme in Serbien und Montenegro vorgestellt und Energieeffizienzpotentiale aufgezeigt, die beispielsweise über Energy Performance Contracting Projekte realisiert werden können. Geringe Strompreise führen jedoch zu langen Vertragslaufzeiten solcher Projekt und stellen eine große Herausforderung bei der Umsetzung von Energiesparprojekten dar, die es zu überwinden gilt.

1 Einleitung

1.1 Die Region

Die beiden Länder Serbien und Montenegro gehören zum westlichen Balkan, der als Sammelbegriff die EU Beitrittskandidaten Albanien, Bosnien-Herzegovina, Kosovo, Mazedonien, Montenegro und Serbien sowie Kroatien, das seit 2013 bereits Mitgliedsstaat der EU ist, umfasst.



Verschiedene Förderinstitutionen sind in der Region aktiv (Europäische Kommission, EBRD, GIZ, Weltbank, KfW u.a.), um die Länder unter anderem bei der Identifizierung und Ausschöpfung von Energieeffizienzpotenzialen zu unterstützen.

Abb. 1: Region westlicher Balkan

Die hier dargestellten Daten wurden im Rahmen des „EBRD ESCO Pipeline Projects“ ermittelt, einem Projekt, das im Rahmen des durch die EBRD entwickelten und über den Investitionsrahmen für die Länder des Westbalkans (WBIF) der EU finanzierten Programms „Regional Energy Efficiency Programme (REEP) for the Western Balkans“, durchgeführt wird (siehe <http://www.wb-reep.org>).

1.2 Hintergrund

In den (meist veralteten) Straßenbeleuchtungssystemen der Länder des westlichen Balkans schlummert ein hohes Potenzial zur Reduzierung des Energieverbrauchs und damit der Entlastung der kommunalen Kassen. Die Finanzierung der Investitionen stößt jedoch schnell an die Verschuldungsgrenzen der kommunalen Haushalte und hat verglichen mit anderen Vorhaben oft die geringere Priorität. Private „Energy Service Companies“

(ESCOs), die ihre Investitionen über die Energieeinsparung refinanzieren sind deshalb zunehmend eine willkommene Alternative. Auch wenn die Gesetzeslage im Moment noch nicht optimal ist, lässt sie inzwischen in den meisten Ländern die Anwendung von „Energy Performance Contracting“ (EnPC) zu und Modellverträge liegen teilweise vor. Damit die Kommunen solche Projekte ausschreiben und die dazugehörigen Verträge abschließen können, müssen jedoch verlässliche Daten zum vorhandenen Beleuchtungssystem und den aktuellen Prozessen vorliegen.

1.3 Ziel des Beitrags

Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick zu Bestandsdaten von Straßenbeleuchtungssystemen in serbischen und montenegrinischen Kommunen und geht auf die technischen und wirtschaftlichen Einsparpotenziale ein, die als Grundlage für aktuelle und zukünftige Ausschreibung dienen.

2 Energiespar-Contracting

Das Ziel von Energiespar-Contracting, im Englischen als „Energy Performance Contracting“ (EnPC) bezeichnet, ist die Hebung von wirtschaftlichen Energieeffizienzpotenzialen bei Kunden (hier Kommunen) durch private Partner. Der private Partner verfügt als Energiedienstleister - englisch: Energy Service Company, kurz „ESCO“ - über ein umfangreiches Know-how zur Steigerung der Energieeffizienz. Oft soll bei der Umsetzung von EnPC Projekten auch die Qualität der Leistung (hier Straßenbeleuchtung) verbessert werden.

Verglichen mit sonstigen Energiespar-Contracting Projekten, die i. W. auf den Gebäudebestand zielen, bieten Straßenbeleuchtungsprojekte einige Vorteile:

- Die Anzahl der technischen Komponenten, die zur Energieeinsparung beitragen können, ist übersichtlich: Lampe, Leuchte, Vorschaltgerät bzw. Steuerungskomponenten.
- Straßenbeleuchtung ist in der Regel in jeder Kommune vorhanden und bietet aufgrund veralteter Anlagen häufig ein hohes Einsparpotenzial bei vergleichsweise geringen Investitionskosten.
- Auch in Kommunen mittlerer Größe ist das benötigte Investitionsvolumen groß genug, um für private Partner interessant zu sein.

Wie bei allen Energiespar-Contracting Projekten muss allerdings auch bei der Straßenbeleuchtung in der Phase der Projektentwicklung größte Sorgfalt auf die Festlegung der sogenannten „Baseline“ gelegt werden. Die „Baseline“ bildet die Energieverbräuche der Bestandsanlage ab, sowie die Kosten für den Energiebezug und die Wartung/Instandhaltung. Dies ist die Grundlage für die Berechnung der möglichen Einsparungen und damit für die Verpflichtung, die der private Partner in Form einer Einspar-Garantie bei Vertragsabschluss eingeht.

3 Die Straßenbeleuchtung in Serbien und Montenegro

3.1 Allgemeines

In der Qualität der Straßenbeleuchtung besteht in beiden Ländern ein deutliches Gefälle zwischen den innerstädtischen Bereichen und der Beleuchtung in Umlandgemeinden bzw. Dörfern mit verkehrstechnisch geringerer Bedeutung. Innerstädtische Hauptstraßen, sowie Fußgängerzonen oder Hauptplätze besitzen oft ein sehr hohes Beleuchtungsniveau, welches allerdings in den Nebenstraßen erheblich abfallen kann. Umliegende Dörfer sind oft nur mit einzelnen, weitverteilten Lichtpunkten ausgestattet.

Eine Dokumentation des Beleuchtungssystem liegt/lag nur in wenigen Fällen vor. Im Rahmen des hier beschriebenen Projektes wurden die Daten zunächst über Fragebögen bei den Kommunen abgefragt und anschließend (in Montenegro im Rahmen einer umfassenden Scoping Study) bei Treffen in den Kommunen konsolidiert.

Die Kommunen, die die Ausschreibung eines EnPC Projektes erwägen, haben für die Ermittlung der Baseline (s.o.) zunächst eine umfangreiche Datenerfassung vorgenommen.

3.2 Infrastruktur

Die Energieversorgung der Straßenbeleuchtung erfolgt fast ausschließlich über Freileitungen. Meist dienen Strommaste als Befestigung für die Straßenleuchten. Masthöhen unter 6 m sind eher selten. In den oben bereits erwähnten innerstädtischen Bereichen sind Mastabstände zwischen 30 m und 40 m üblich, in kleinen ländlichen Kommunen ist oft nur jeder zweite oder dritte Strommast mit einer Leuchte bestückt. Es überwiegen Beton- oder Holzposte.



Abb. 2: Beispiele von Straßenbeleuchtungsanlagen in Serbien

Geschaltet wird die Straßenbeleuchtung über astronomische Schaltuhren. Vereinzelt sind Photozellen im Einsatz.

3.3 Leuchtmittel

Obschon die Natriumdampf-Hochdrucklampe (HPS) seit Ende der 90er Jahre eine weite Verbreitung gefunden hat, existieren in vielen Kommunen noch Leuchten mit Quecksilberdampf-Hochdrucklampen (HPM). Die meistverbreitete Nennleistung der HPM Lampen beträgt 125 W. Nennleistungen von 80 W oder gar 50 W sind so gut wie nicht vorhanden eher wurden hohe Leistungen wie 250 W und 400 W installiert.

Ebenso weit verbreitet sind hohe Leistungen bei den HPS Lampen. Auch hier gibt es eine hohe Anzahl mit Nennleistungen von 250 W und teilweise 400 W.

Zum Einsatz kommen aber auch sogenannte „Plug-In“ Lampen, die mit 110 W oder 220 W in Leuchten betrieben werden, die ursprünglich mit HPM Lampen von 125 W bzw. 250 W bestückt waren.

Halogen-Metaldampflampen existieren insgesamt nur in einer geringen Anzahl. Die installierten Nennleistungen liegen bei dieser Technologie in Regel bei 100 W oder höher.

Vereinzelt sind in kleinen Kommunen noch Glühlampen mit Leistungen zwischen 100 W und 300 W zu finden.

Für die serbischen Kommunen, die Fragebögen ausgefüllt haben, liegt der durchschnittliche Anteil von HPM Lampen bei ca. 40%. Aufgrund der höheren Strompreise ist die Umrüstung der Straßenbeleuchtung auf HPS Lampen in Montenegro etwas weiter fortgeschritten der Anteil von HPM Lampen liegt hier bei etwa 30%.

3.4 Leuchten

Bei den installierten Leuchten dominieren einige große Hersteller wobei eine in den kleinen Kommunen und in untergeordneten Straßen weit verbreitete Leuchte, von einem serbischen Hersteller produziert wird (siehe die erste der folgenden Abbildungen).



Abb. 3: Beispiele von Straßenleuchten in Serbien und Montenegro

Viele Leuchten sind 20 Jahre und älter und verfügen nur über eine simple Lichtlenkung. Elektronische Vorschaltgeräte sind die Ausnahme, eine Leistungsreduktion in den Nachtstunden ist äußerst selten. Es gibt Nachtabschaltungen, z.B. im Winter in touristischen Gebieten in Montenegro oder in kleinen Dörfern.

4 Einsparpotenziale

Aus dem oben Dargestellten ergibt sich, dass in beiden Ländern technische Einsparpotenziale in der Straßenbeleuchtung vorhanden sind. Der veraltete Bestand kann durch wesentlich effizientere Leuchten ersetzt werden. In den Kommunen, in denen noch HPM Leuchten installiert sind, ist das Einsparpotenzial natürlich am größten. Eine Leistungsreduktion in den Nachtstunden eröffnet weitere Möglichkeiten zur Reduktion des Energieverbrauchs, dies gilt insbesondere für die sehr hohen Beleuchtungsniveaus in den innenstädtischen Bereichen.

Eingeschränkt sind die Potenziale vor allem in den kleineren ländlichen Kommunen. Dennoch kann hier eine effizientere Beleuchtung zu einem etwas besseren Beleuchtungsniveau führen.

Das wirtschaftliche Potenzial für EnPC Projekte, in denen die Investition in effiziente Beleuchtung über die Energieeinsparung (und ggf. über die Einsparung von Wartungskosten) realisiert wird, ist stark vom Stromtarif abhängig. In Serbien lag der Strompreis bis vor kurzem noch um 5 Eurocent/kWh, in Montenegro kann mit einem Tarif von 7 Eurocent/kWh gerechnet werden. Bedingt durch die niedrigen Stromtarife muss auch das Investitionsvolumen niedrig gehalten werden. Aus diesem Grund wurde in den Konzepten für die Mo-

modernisierung der Straßenbeleuchtung in beiden Ländern weiterhin Leuchten mit hocheffizienter Optik und mit HPS als Leuchtmittel berücksichtigt, neben der inzwischen üblichen modernen LED Technologie. Die Konzepte sehen außerdem eine Leistungsreduktion für etwa die Hälfte der neu zu installierenden Leuchten vor.

Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich für die im Rahmen des Projektes kalkulierten Konzepte technische Amortisationszeiten (Simple Payback) zwischen 6 und 9 Jahren. Dabei werden zusätzlich zu den Einsparungen der Energiekosten auch reduzierte Wartungs-/Instandhaltungskosten angenommen, da die neuen Anlagen mit langlebigen Komponenten ausgestattet sein sollen. Die tatsächlichen Vertragslaufzeiten sind entsprechend länger, da Kapitalkosten sowie sonstige Serviceleistungen und Ausgaben des ESCOs ebenfalls über die Contracting Raten abgedeckt werden müssen.

Der Anteil der modernisierten Leuchten liegt in der Regel bei über 80% und es wird eine Energieeinsparungen bezogen auf die gesamte Straßenbeleuchtung von 30% bis 50% erreicht.

In der ersten, Anfang Juni 2016 in Serbien veröffentlichten Ausschreibung eines ESCO Projektes wurde eine maximale Vertragslaufzeit von 10 Jahren, bei einer garantierten Energieeinsparung von mindestens 40% vorgegeben.

5 Fazit

In der Straßenbeleuchtung in serbischen und montenegrinischen Kommunen schlummert ein hohes Potential an technisch realisierbaren Energieeinsparmöglichkeiten. Die Effizienzsteigerung durch den Einsatz moderner Leuchten und Steuerung dient nicht nur dem Klimaschutz sondern liegt auch im Interesse der Kommunen, da die Haushalte dadurch entlastet werden können. Als Beitrittskandidaten werden die beiden Länder durch die Europäische Kommission bei der Identifizierung und Ausschöpfung von Energieeffizienzpotenzialen unterstützt und EnPC Projekte bieten eine gute Möglichkeit, die Potenziale bei möglichst geringer Bindung kommunaler Mittel zu heben.

Andererseits sind aufgrund der geringen Strompreise und der hohen Verschuldung der Kommunen die Rahmenbedingung für die Umsetzung von Effizienzprojekten schwierig, so dass leider weniger Projekte umgesetzt werden, als für das Erreichen von Energieeinsparzielen sinnvoll wäre. Der gesetzliche Rahmen (zumindest in Serbien) hat sich durch die Verabschiedung entsprechender Dokumente (By-law, Rulebook) verbessert und Modellverträge bieten eine gute Grundlage für die Marktentwicklung.

Aus technischer Sicht eröffnet die Weiterentwicklung der LED Technik zu noch höheren Lichtausbeuten bei gleichzeitig verbesserter Robustheit der Komponenten sowie sinkenden Preisen die Möglichkeit Einsparprojekte wirtschaftlich attraktiver zu machen.

In den weiteren über REEP unterstützen EnPC Projekten, deren Ausschreibung in der zweiten Jahreshälfte 2016 erfolgt, wird sich zeigen, ob EnPC Projekte als zukünftiges Erfolgsmodell für die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen in den Länder des westlichen Balkans gelten kann.

Effizienz in der Straßenbeleuchtung – nur möglich durch eine örtlich und zeitlich variable Lichtverteilung

Völker, Stephan; Steblau, Juri – Technische Universität Berlin / Fachgebiet Lichttechnik

Problemstellung und Forschungsfragen

Die Straßenbeleuchtung im zurückliegenden Jahrhundert war geprägt durch die Gasentladungslampen. Sie lieferten zuverlässig einen hohen Lichtstrom mit einer akzeptablen Lebensdauer. Eine präzise Verteilung des Lichtstromes auf die tatsächlichen Nutzflächen erfolgte nicht. Der Begriff Effizienz lässt sich jedoch nur dann sinnvoll anwenden, wenn der vereinbarte Zweck mit dem geringstmöglichen Einsatz an Mitteln erfolgt. Im Falle der Straßenbeleuchtung bedeutet dies, nur soviel Licht auf die tatsächlich vorhandenen Nutzflächen zu bringen, wie es für den Zweck der Einhaltung der Verkehrssicherungspflicht, der Gestaltung oder der Angstfreiheit erforderlich ist.

Stand der Wissenschaft/Technik

Heute erfolgt die lichttechnische Planung mittels Standardlichtverteilungen. Diese sind i.d.R. nur sehr grob auf unterschiedliche Mastabstände und Masthöhen abgestimmt. Differieren diese entstehen dunkle Bereiche/Tarnzonen bzw. werden andere Teile der Straße zu hell und damit ineffizient beleuchtet. Für eine definierte Anstrahlung der Fassaden fehlen entsprechende Einstellmöglichkeiten in der verwendeten Planungssoftware.

Forschungshypothesen

Die tatsächlich benötigte Energie für eine hochqualitative Straßenbeleuchtung ist bei einer präzisen Planung und Auslegung deutlich geringer, als für eine geplante Standardanlage.

Versuchsaufbau

Zunächst wurde eine umfangreiche Analyse von Fahrrad- und Personunfällen auf insgesamt 9,7 km Straßen in Berlin durchgeführt. Überall dort, wo eine schlechte Beleuchtung als mögliche Ursache wahrscheinlich ist, wurden umfangreiche Simulationen für eine Optimierung durchgeführt und diese mit einer Standardplanung verglichen. Die Validierung der Ergebnisse erfolgt auf dem LED-Laufsteg.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Im Ergebnis der Simulationen konnte bereits gezeigt werden, dass die Optimierung der LVK zu einem deutlich geringen Energiebedarf führt, wie eine Standardlichtstärkeverteilung. Um sicherzustellen, dass die simulierten LVKs auch die erforderlichen Sichtbarkeiten garantieren, werde diese in den kommenden Wochen im realen Feldversuch auf dem LED-Laufsteg in Berlin validiert.

Photometrische Bestandsaufnahme der Straßenbeleuchtung einer Stadt

Dipl.-Ing. Matthias Giesener, City-Technologie GmbH, Germany

Problemstellung

Alle Städte und Gemeinden haben die Aufgabe ihr kommunales Vermögen zu bewerten und zu bilanzieren. Dies ist im Bereich der öffentlichen Straßenbeleuchtung häufig nur empirisch möglich sofern überhaupt Informationen vorliegen. Auch verantwortliche Stadtwerke sehen sich im Rahmen ihrer Informationspflicht gegenüber den Städten und Kommunen, für die sie die Beleuchtungsanlagen betreiben, dem gleichen Problem gegenüber gestellt.

Ziel

Die photometrische Bestandsaufnahme betrifft die öffentlichen Verkehrswege (städtische Straßen). Sie basiert auf der Europäischen Norm CEN/TR 13201. Sie dient zum einem der Erfassung und Bewertung des kommunalen Vermögens zum anderen stellt sie den lichttechnischen Zustand der Außenbeleuchtung visuell und nachhaltig messtechnisch dokumentiert dar.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Die Bestandsaufnahme erfolgt durch eine dynamische Leuchtdichte- und Beleuchtungsstärken Messung. Mit einem Messfahrzeug werden in den Nachtstunden die Straßen in einem Stadtgebiet befahren und die photometrischen sowie weitere relevante Daten erfasst.

Am Beispiel einer deutschen oder französischen Mittelstadt 70.000EW wird ein praktisches Beispiel gezeigt.

Realisierungsgrad

Das Verfahren zur photometrischen Bestandsaufnahme, die Überführung der Messergebnisse in einen schriftlichen Bericht mit visualisiertem, georeferenzierten Kartenmaterial sowie die Implementierung in einer Benutzersoftware wurden bereits bei mehreren Städten in Frankreich und Skandinavien erfolgreich umgesetzt.

Photometric inventory of street lighting in a city

Dipl.-Ing. Matthias Giesener, City-Technologie GmbH, Germany

Issue

All cities and towns have the task to assess their Municipal Property and accounted for. This is often only empirically possible if any information is available in the public street lighting. Also responsible technical enterprises see themselves as part of their duty to inform cities and local authorities, for which they are the lighting systems, provided the same problem against.

Aim

The photometric survey concerns the public roads (urban roads). It is based on the European standard CEN / TR 13201. It is used for one of the detection and evaluation of municipal assets and secondly to provide the light-technical condition of exterior lighting visually and sustainable metrologically documented represent.

Description of the innovation/»best practice«

The inventory is carried out by measuring a dynamic luminance and illuminance. With a measuring vehicle, the streets are at night navigate in an urban area and recorded photometric and other relevant data.

Using the example of a German, Scandinavian or French City a practical example is shown.

Level of realization

The procedure for photometric survey, the transfer of the measurement results in a written report with visualized, georeferenced maps and the implementation in a user software have been implemented successfully in several cities in Germany, Scandinavia and France.

Innovative Straßenbeleuchtung und Smart City Lösungen

Dr. Ernst Smolka, Geschäftsführer Schröder GmbH

Problemstellung

Die Prognose der vereinten Nationen zeigt das Ausmaß an einer stark wachsenden Weltbevölkerung. Bis zum Jahr 2050 sollen drei Viertel der Weltbevölkerung in Städte leben [Quelle: Shell // Centre for Liveable Cities Singapore]. Diese Urbanisierung kann Innovationen vorantreiben und Wohlstand gleichmäßiger verteilen. Sie kann allerdings auch zu verminderter Lebensqualität, Umweltschäden, Ressourcenverschwendung und sozialen Spannungen führen.

Ziel

Zukünftige Lebensräume sollen für eine stetig wachsende und sich weiterentwickelnde Bevölkerung ausgerichtet werden. Hierfür sind Lösungen erforderlich die vielseitig, upgradefähig und zur Bereicherung der Lebensräume beitragen. Die Idee ist es das flächendeckende Straßenbeleuchtungsnetz als Plattform einer zukünftig intelligent vernetzten Stadt zu verwenden. Somit kann die Kommune oder Stadt das Straßenbeleuchtungsnetz nutzen, um Umweltziele zu erreichen, Sicherheit zu schaffen, Mensch und Umwelt zu verbinden und neue Mobilitätskonzepte zu fördern.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Die Verteilung der einzelnen Leuchtenstandorte innerhalb einer Kommune oder Stadt bietet eine hervorragende Ausgangssituation, um einen Mehrwert für Mensch und Umwelt erzielen zu können. Der einzelne Leuchtenstandort soll neben einer bedarfsgerechten und energieeffizienten Beleuchtung zukünftig auch die Digitalisierungswelle unterstützen, soziale Interaktion fördern, Umweltziele umsetzen und E-Mobilität vorantreiben und für sichere Umgebungen sorgen. Hierfür hat Schröder eine vollmodulare Systemleuchte entwickelt, die neben einer intelligenten Lichtsteuerung über Telemanagement auch Lösungen für Kamera, Lautsprecher, WLAN, Sensorik, E-Mobilität in einer formschönen Stele integriert.

Realisierungsgrad

Die Lösung von Schröder wurde als Weltpremiere im Zuge der Premiumpartnerschaft mit der New Mobility World der IAA Pkw 2015 auf 18.000 qm Fläche mit über 50 intelligenten Lichtpunkten installiert und offiziell gelauncht. Schröder kann bisher weitere Referenzen in Deutschland und Frankreich vorweisen. Aus den bisherigen Markterkenntnissen bestätigt Schröder eine positive Entwicklung für ein solches System in der Stadt, Kommune und Industrie.

Intelligente, vernetzte Außenbeleuchtungssysteme der Zukunft

Martin Przewloka, Helmut Wörner IoTWare, 63128 Dietzenbach, Deutschland

Problemstellung

Die LED dringt als hocheffiziente Lichtquelle immer mehr in Außenbeleuchtungssysteme sowohl im privaten, geschäftlichen wie auch öffentlichen Bereich vor. Im Wesentlichen konzentriert man sich heute auf den Austausch des Leuchtkörpers, d.h. die Ersetzung der konventionellen Leuchtkörper wie bspw. Glühlampen, Leuchtstoff- oder Hochdrucklampen durch LED-Module. Beleuchtungssysteme der Zukunft sollten sich darüber hinaus an den konkreten Bedarfen orientieren, d.h. neben einer maximalen Effizienz und der Einhaltung gesetzlicher Vorschriften auch Aspekte einer situationsgerechten Ausleuchtung, Vermeidung von Streulicht und Lichtverschmutzung bis hin zur optischen Gestaltung orientieren. Zudem erfordert der sichere Betrieb dieser Systeme eine kontinuierliche Zustandsüberwachung der Systeme hinsichtlich Funktionsfähigkeit bis hin zur Ermöglichung einer vorausschauenden Wartung. Nicht zuletzt müssen auch autark betriebene Systeme (im Regelfall solar versorgte Systeme), die bspw. dann zum Einsatz kommen, wenn keine zentrale Energieversorgung vorhanden ist, aufgrund technischer und umweltbedingter Limitierungen (Akkukapazität, Jahreszeiten) intelligent und situationsgerecht betrieben werden.

Ziel

Die IoTWare hat sich zum Ziel gesetzt, völlig neue intelligente und vernetzte Außenbeleuchtungssysteme, wie sie bspw. im öffentlichen Bereich zur Ausleuchtung von Straßen oder Parkflächen eingesetzt werden können, zu entwickeln. Eine solare Versorgung ist integriert und erweitert damit den möglichen Anwendungsbereich erheblich. Die integrierte Vernetzung der Systeme soll zum einen sicherstellen, dass ein bedarfsgerechter, hocheffizienter Betrieb dieser Systeme gewährleistet ist, zum anderen aber auch eine Fernzustandskontrolle über das Internet ermöglicht wird. Die Systeme können über die gängigen Kartensysteme (bspw. Google Maps) kontrolliert, gesteuert und gewartet werden.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Die vernetzten LED-Außenbeleuchtungssysteme sind als solar betriebene Einheiten in wenigen Minuten installiert. Ein Li-Ionenakku garantiert einen sicheren Betrieb in Kombination mit einem eingebauten Mikrocomputer, der unter anderem auch das Energiemanagement übernimmt. Die Schaltprogramme können aus der Ferne verändert und angepasst werden. Ebenso kann der aktuelle Zustand, die Ladekapazität, die Gesamtbetriebsdauer usw. fernausgelesen werden. Zusätzliche Sensoren bspw. zur Temperaturmessung, zur Lärmmessung oder zur Verkehrsmessung können direkt adaptiert und deren Werte über das universelle Kommunikationsprotokoll gleichermaßen übertragen werden.

Realisierungsgrad

Die Systeme wurden von der IoTWare entwickelt und befinden sich bereits in diversen Einsatzszenarien im Probebetrieb. Die Systeme sind zur Zeit einmalig.

Smart, networked exterior lighting systems for future applications

*Martin Przewloka, Benedikt-Alexander Mokroß, Alexander Lenhardt, Helmut Wörner
IOTware GmbH, Dietzenbach, Deutschland*

Issue

The LED penetrates as a highly efficient light source more and more in outdoor lighting systems both for use in the private and in the commercial sector. Furthermore, applications in the public domain are also progressing. However, in most cases main focus of today is the replacement of the luminous body, such as the exchange of a conventional light bulb or a high-pressure sodium lamp by a LED module.

Lighting systems of the future should consider the concrete needs of users and facility operators, which demand in particular maximum efficiency and flexibility. In addition to the compliance with legal requirements, aspects of a situation-based illumination while avoiding light pollution have to be considered. Besides the safe and efficient operation, a continuous condition monitoring of these lighting systems in terms of status parameters, functionality and maintenance relevant data is required.

Increasingly, autonomous lighting systems are requested. Ideally these systems work fully independently from external power supplies, usually solar powered. Fully solar powered lighting systems can just be realized by implementation of a smart and intelligent energy management fully aligned to the end user requirements.

Aim and description of the innovation

IOTware has set itself the goal to develop and distribute completely new intelligent and networked exterior lighting systems. For example, these systems can be used in public areas for the illumination of parks, parking areas or bus stops. A solar power technology is integrated, thus expanding the possible scope of applications considerably. The integrated networking possibilities of these systems is firstly to ensure a demand-driven, highly efficient operation, secondly to guarantee a remote state control over the Internet. All lighting systems will be managed using a cloud based administration application supported by so called geo-maps (e.g. Google maps).

The networked LED outdoor lighting systems are installed in a few minutes. A Li-Ion battery guarantees safe operation in combination with a built-in microcomputer responsible for the energy management among others. The switching programs can be changed remotely and adjusted to specific needs. Likewise, the current state, the charge capacity, the total operating time, etc. can be read remotely. Additional sensors, for example for temperature measurement, for measuring acoustic noise or even traffic measurement can be directly adapted and transmit their data through the embedded universal communication protocol.

Level of realization

The described smart lighting systems were developed by IOTware and are already in various deployment scenarios in trial operation.

Intelligente, vernetzte Außenbeleuchtungssysteme der Zukunft

*Martin Przewloka, Benedikt-Alexander Mokroß, Alexander Lenhardt, Helmut Wörner
IOTware GmbH, Dietzenbach, Deutschland*

Zusammenfassung

Beleuchtungssysteme der Zukunft müssen sich mehr und mehr an den konkreten Bedarfen ihrer Nutzer orientieren. Hierzu zählen neben einer maximalen Effizienz und der Einhaltung gesetzlicher Vorschriften auch Aspekte einer sicheren und situationsgerechten Ausleuchtung, Vermeidung von Streulicht und Lichtverschmutzung bis hin zur optischen Gestaltung. Zudem erfordert der sichere Betrieb dieser Systeme eine kontinuierliche Zustandsüberwachung hinsichtlich Funktionsfähigkeit, aber auch die Ermöglichung einer vorausschauenden Wartung. Derartige smarte Systeme, die im Regelfall zum Zwecke maximaler Unabhängigkeit solar versorgt werden, erfordern die Entwicklung und Adaption skalierbarer IT-Gesamtlösungen, sogenannte end-to-end-Lösungen, deren Grundprinzipien im Folgenden beschrieben werden und aktuell von der IOTware GmbH umgesetzt werden.

1. Stand der Technik und Anforderungen an intelligente Außenbeleuchtungssysteme

Die LED dringt als hocheffiziente Lichtquelle immer mehr in Außenbeleuchtungssysteme sowohl im privaten, geschäftlichen wie auch öffentlichen Bereich vor. Im Wesentlichen konzentriert man sich allerdings heute lediglich auf den Austausch des Leuchtkörpers, d.h. die Ersetzung der konventionellen Leuchtmittel wie bspw. Glühlampen, Leuchtstoff- oder Hochdrucklampen durch LED-Module. Damit werden erhebliche Chancen einer verbesserten Beleuchtungsstruktur verpasst, da beispielsweise die Betriebsformen dieser Systeme demselben starren Plan unterliegen wie zuvor unter Verwendung der veralteten Leuchtkörper. Fest vorgegebene Schaltzeiten, ggf. noch ergänzt um einen helligkeitssensorgesteuerten Betrieb, sind hierbei maßgeblich vorzufinden. Von einem bedarfsgerechten Betrieb hinsichtlich Ausleuchtung aber auch mit dem Anspruch einer externen Überwachung und Steuerung dieser Systeme ist man noch weit entfernt.

Außenbeleuchtungssysteme der Zukunft müssen dagegen den folgenden Bedarfen gerecht werden:

Aus Anwendungssicht:

- Sichere Ausleuchtung, optimal angepasst an die externen Bedingungen wie beispielsweise Jahreszeiten und Wetter
- Maximale Effizienz in der Energienutzung bis hin zum autarken Betrieb dieser Anlagen mittels einer eigenständigen, regenerativen Energieversorgung (Solar)
- Vermeidung von Lichtverschmutzung wie beispielsweise Streulicht

- Einfache Inbetriebnahme nach dem sogenannten ‚Plug&Play-Prinzip‘
- Sehr hohe, idealerweise wartungsfreie Lebensdauer in einem sehr hohen Betriebstemperaturspektrum von mindestens -20°C bis + 50°C
- Optional: offene Systeme zur Adaption weiterer Sensoren
- Ansprechendes Design

Aus Betreibersicht:

- Permanente Zustandsüberwachung und -meldung der Systeme über das Internet.
- Veränderung der Betriebsparameter, wie beispielsweise der Schaltzeiten, über das Internet
- Sichere Datenübertragung und maximale Absicherung gegenüber Missbrauch sowie insbesondere gegen Internetkriminalität
- Zukunftssicherheit und idealerweise Etablierung von Standards

Für den Fall, dass Anwender und Betreiber identisch sind, sind die vorgenannten Bedarfe für diese Zielgruppe in Kombination zu sehen.

2. Beleuchtungssysteme im autarken Betrieb

Die ermittelten Bedarfe legen es nahe, intelligente Beleuchtungssysteme so zu konstruieren, dass diese vollständig unabhängig von einer externen, kabelgebundenen Infrastruktur betrieben werden können. Die Vernetzung über das Internet ist hierbei als mobile Anwendung, die Stromversorgung der Systeme über eine Kombination aus Solarzellen und einer Energiezwischenspeicherung in Form von Lithium-Ionen-Batterien¹ vorzusehen.

In Deutschland lassen sich etwa 800 bis 1000kWh-Stunden pro kWh-Peakleistung an Jahresenergieertrag erzielen². Legt man eine Solarfläche von 33x33cm² (also zirka 0,1m²), angebracht auf der zur Sonne zugewandten Seite, eines Beleuchtungssystems zu Grunde, so kann der erzielbare Jahresertrag bei einem Zellenwirkungsgrad von 18% und einer Energieeffizienz des gesamten Systems aus Zelle, Wandler plus Speicher von 90% wie folgt nach unten abgeschätzt werden:

$$E_{\text{Jahr}} = 0.1\text{m}^2 \times 0.18 \times \frac{1\text{kWh}}{\text{m}^2} \times \frac{800\text{kWh}}{\text{kWh}} \times 0.9 \sim 13\text{kWh}$$

¹ Lithium-Ionen-Batterien stellen zurzeit die vorteilhafteste und betriebssicherste Variante der Energiespeicherung dar. Die rasant fortschreitende Entwicklung der Batterietechnologien wird sich zudem positiv auf die beschriebenen Beleuchtungssysteme auswirken, indem diese damit beispielsweise schrittweise leistungsstärker dimensioniert werden können.

² Siehe: Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Damit stehen theoretisch etwa 35 Wattstunden pro Nacht zur Verfügung, vorausgesetzt, dass das System in der Lage ist, diese Energiemenge ohne Einschränkungen zur Verfügung zu stellen. Bei dieser Rechnung ist aber auch zu berücksichtigen, dass stets eine sehr gute Sonnenausrichtung gewährleistet ist, so dass infrastrukturbedingt die Systeme auch mit einer geringeren Energiemenge betreibbar sein müssen.

Ein sicherer, kontinuierlicher Nachtbetrieb zur Ausleuchtung einer Verkehrsstraße oder eines Fußgängerweges kann aufgrund dieser Randbedingungen nur über die enge Aneinanderreihung von Beleuchtungssystemen oder die Hinzunahme weiterer Solarkapazitäten (wie bspw. zusätzliche Solarpanels) realisiert werden. Ein nichtstarrer, intelligenter Betrieb mittels vernetzter Systeme, zusätzlich optimiert hinsichtlich Eigenstromverbrauch der Steuerung, ist dagegen möglich und von der IOTware entwickelt worden.

Effizientes Energiemanagement schließt unter diesen Randbedingungen auch die Vernetzung der Systeme ein. Die Netzinfrastruktur und Kommunikationsprotokollen müssen hinsichtlich minimalen Energieverbrauchs optimiert werden, damit der größte Teil des Energieertrags in die Ausleuchtung fließen kann. Ebenso müssen Tiefentladung und Überladung des Akkusystems ausgeschlossen werden, um einen langjährigen Betrieb zu gewährleisten. Alle Systeme müssen optimal aufeinander abgestimmt werden.

3. Softwarearchitekturen

Das Herzstück der smarten Beleuchtungssysteme bilden skalierfähige IT-Architekturen. Dabei hat sich die IOTware für zwei aufeinander aufbauende Prinzipien von Softwarearchitekturen entschieden:

- 1.) Entwicklung einer nachrichtengesteuerten Architektur (Message-Bus bzw. Event-Bus) nach dem publish-subscribe-Prinzip mit flexiblen Erweiterungsmöglichkeiten bspw. hinsichtlich einer Adaption weiterer Komponenten und/oder Sensoren
- 2.) Entwicklung einer konsequent ereignisgesteuerten Architektur („event-driven“), mit der Möglichkeit einer äußerst energieeffizienten Implementierung, da sämtliche Kommunikation ausschließlich über frei definierbare Regelwerke und Ereignisse gesteuert wird. Die Beleuchtungssysteme werden als vollständig cyberphysikalische Systeme umgesetzt.³

Die Realisierung von nachrichten- und ereignisgesteuerten Architekturen ermöglicht eine asynchrone Abarbeitung von Code und erlaubt den systemseitigen Aktoren und Sensoren, stets ansprechbar zu bleiben. So kann das System im autarken Betrieb jederzeit nach einem vorausgegangenen Energieausfall basierend auf dem letzten validen Systemzustand aus dem persistenten Speicher durch eine sogenannte State-Komponente wiederhergestellt werden. Des Weiteren erlaubt das Architekturprinzip einer losen Kopplung aller zum

³ Siehe hierzu auch: Schwalm, T., Przewloka, M.: Intelligente Sensoreinheiten und ein Cloud-Sensormanagementsystem für das Internet der Dinge

Einsatz kommenden eingesetzten Komponenten einen leichten Austausch einzelner Bausteine bzw. systemseitige Erweiterungen. Beispielsweise lassen sich so sehr leicht die Kommunikationsmodule tauschen bzw. ersetzen: z.B. GSM versus WIFI versus Bluetooth.

Die zurzeit entwickelten Systeme der IOTware wurden nach dem Prinzip des Messagebus realisiert und sollen daher nachfolgend kurz betrachtet werden.

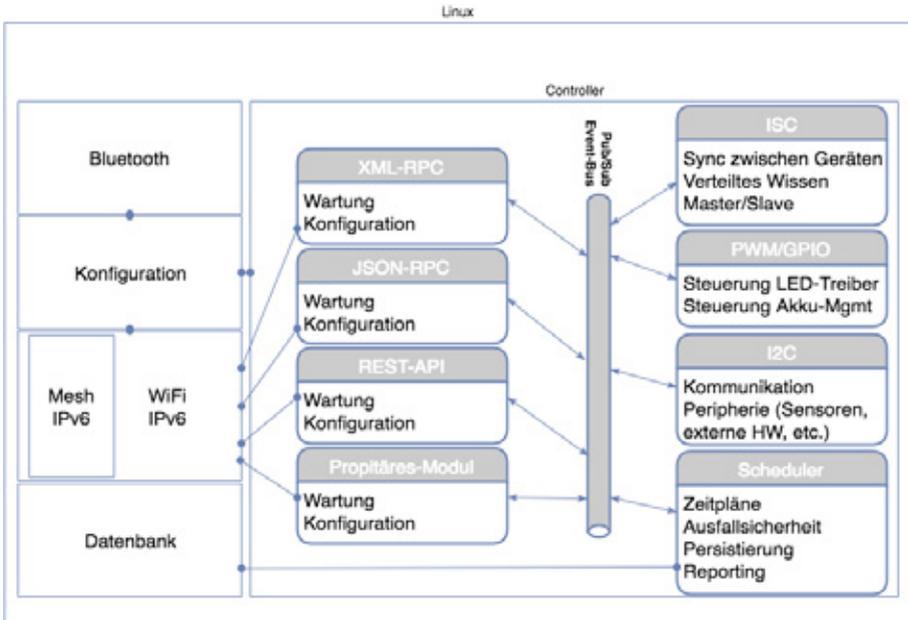


Abbildung 1: Softwarekomponenten der nachrichtengesteuerten Softwarearchitektur der intelligenten Beleuchtungssysteme

Zentrale interne Kommunikationseinheit der Beleuchtungssysteme bildet der Message-Bus bzw. Event-Bus, über den sämtliche Komponenten asynchron kommunizieren. Hierzu zählen sowohl das intelligente Akkumanagement, welches sicherstellt, dass die Batterien immer optimal geladen werden⁴, wie auch die LED-Beleuchtungsmodulare, die mittels Pulsweitenmodulation (PWM) gesteuert werden. Letzteres erlaubt das softwaregesteuerte Dimmen der Modulare, welches essentiell für das Energiemanagement der Systeme ist. Die Kommunikationssysteme, welche die Beleuchtungseinheiten entweder untereinander (peer-to-peer) oder mit einer Zentrale über Internetprotokolle miteinander vernetzen, sind ebenfalls modular aufgebaut und können daher jederzeit ausgetauscht werden. Dies erlaubt zudem einen zukunftssicheren Betrieb der Systeme hinsichtlich potenzieller Weiterentwicklung neuer Kommunikationsstandards.

⁴ Hierbei wird das sogenannte Maximum Power Point Tracking Ladeprinzip (MPPT) implementiert, d.h. die Belastung der Zellen erfolgt immer so, dass Lastwiderstand durch den Energiespeicher und Innenwiderstand der Zelle identisch sind. Damit wird den Zellen die maximale Leistung entnommen. Siehe hierzu auch Jitendra P.: Maximum Power Point tracker solar charge controller (MPPT).

Das gesamte System basiert auf einer schlanken Linux-Plattform. Damit wird zudem erreicht, dass die Software plattformunabhängig entwickelt werden kann, d.h. idealerweise keine Abhängigkeit hinsichtlich des verwendeten Microcomputers besteht, sofern dieser die Implementierung eines Linux-Betriebssystems unterstützt. Auch dies garantiert eine zukunftssichere Erweiterbarkeit.

4. Konzeptionierung der Gesamtsysteme

Die Entwicklung und Realisierung der Gesamtsysteme erfolgt unter den Prinzipien maximaler Effizienz und Flexibilität. Die Systeme können permanent über ein Cloud-Managementsystem von zentraler Stelle aus administriert werden, indem beispielsweise Zustandsinformationen abgefragt werden, Betriebsmodi (wie beispielsweise saisonabhängige Schaltprogramme) verändert beziehungsweise neu gesetzt werden oder auch wartungsrelevante Informationen abgerufen werden. Damit ist im Falle eines solaren, autarken Betriebs auch jederzeit die Restbetriebsdauer jedes einzelnen Systems ausgehend vom aktuellen Ladezustand abrufbar. Mittels analytischer Funktionen ist sogar die Restlebensdauer der Batterie als schwächstes Glied in einer Zellen-Batterie-Ladeinfrastruktur bestimmbar.

Das Prinzip der Energie- und Kosteneffizienz macht es erforderlich, die Kommunikation der Beleuchtungssysteme über das Internet nicht in Form einer heute oftmals vorherrschenden sternförmigen Infrastruktur auszuführen. Stattdessen hat die IOTware flexible Systeme entwickelt, die sowohl peer-to-peer (also zwischen benachbarten Systemen) wie auch mit dem Internet direkt (zentralisiert) kommunizieren können. Letztere sind die sogenannten Mastersysteme, welche frei definierbar eine bestimmte Anzahl an dezentralen Nachbarsystemen mit verwalten. Die peer-to-peer-Kommunikation erfolgt nach den WIFI-Standards, die Kommunikation mit der Cloud über GSM nach Mobilfunkstandards. Sämtliche Subsysteme arbeiten zum Zwecke eines optimalen Energiemanagements im Regelbetrieb weites gehend autark.

Beleuchtungssysteme können jederzeit hinzugefügt oder entfernt werden. Jedes System ist eindeutig identifizierbar und zusätzlich mit einer Geo-Information versehen. Der Konfigurationsaufwand wird auf ein Minimum beschränkt und weites gehend automatisiert, um unnötige Komplexität auf der Anwendungsseite zu vermeiden.

Die Kommunikation erfolgt nach den Standards und den (verschlüsselten) Protokollen der jeweiligen Verfahren. Dies gewährleistet den Betrieb der Einheiten konform zu den heutigen Sicherheitsstandards.

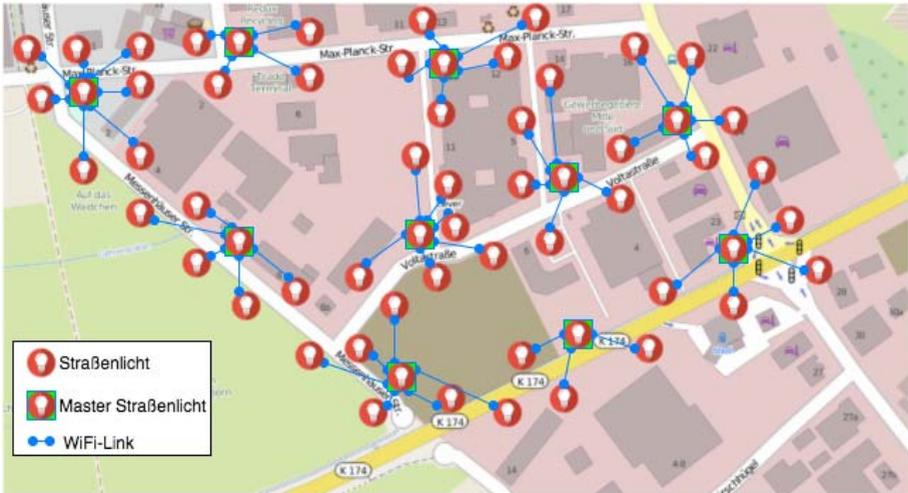


Abbildung 2: Vernetzung der Beleuchtungssysteme im sogenannten peer-to-peer-Prinzip und im Master-Prinzip

5. Realisierungsgrad, Aktueller Stand und Ausblick

Die beschriebenen Systeme wurden von der IOTware zunächst in Form von Prototypen entwickelt und ersten Tests unterzogen. Ein wesentlicher Schwerpunkt lag neben der Entwicklung einer internetbasierten Vernetzung in der Entwicklung autarker, solarbetriebener Systeme. Mittels der Prototypenentwicklung konnte die Machbarkeit gezeigt werden, so dass aktuell die Umsetzung in Form eines marktreifen Produkts erfolgt.

Die Anwendungsbereiche liegen neben der Beleuchtung von öffentlichen Bereichen in der Ausleuchtung von Industrieanlagen bis hin zu Installationen im privaten Sektor. Sämtliche Entwicklungen orientieren sich an Standards, damit eine permanente Erweiterbarkeit gewährleistet werden kann. So ist beispielsweise angedacht, die Beleuchtungssysteme für eine Adaption weiterer Sensoren zu öffnen, um beispielsweise Umweltdaten an den Beleuchtungsstandorten mit zu erfassen und über die implementierte Kommunikationsinfrastruktur weiterzuleiten.

Literatur:

Jitendra P.: Maximum Power Point tracker solar charge controller (MPPT): MPPT charge controller. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken 2012, ISBN 978-3-659-18508-3.

Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> zuletzt abgerufen am 03.07.2016

Schwalm, T., Przewloka, M.: Intelligente Sensoreinheiten und ein Cloud-Sensormanagementsystem für das Internet der Dinge; in: ‚Prozesse, Technologie, Anwendungen, Systeme und Management‘, mana Buch 2016 in print

Erhebung der Kundenanforderungen für LED-Straßenleuchten im Bereich von Hauptverkehrsstraßen

Jens Kilian, M.Eng., Prof. Dr.-Ing. Eva Schwenzfeier-Hellkamp, Prof. Dr. rer. pol. Hildegard Manz-Schumacher Fachhochschule Bielefeld / Forschungsschwerpunkt ITES

Problemstellung

Werden Kundenanforderungen, wie z.B. das komplexe Entscheidungskriterium Wartungsfreundlichkeit, bereits in der Entwicklungsphase einer neuen LED-Straßenleuchte nicht berücksichtigt, so steigt die Wahrscheinlichkeit eines Produktflops. Am Kunden vorbei entwickelte LED-Straßenleuchten bringen nicht nur unzufriedene Anwender, sondern auf lange Sicht auch sinkende Absatzzahlen mit sich.

Ziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens liegt in der Ermittlung von kundenrelevanten Komponenten einer LED-Leuchte für Hauptverkehrsstraßen bezüglich der Wartungsfreundlichkeit, um so die markt- und umweltorientierte Produktentwicklung in der energieeffizienten LED-Technologie voranzutreiben und eine Prozessoptimierung bei der Auswahl der richtigen Leuchte zu fördern. So soll die Wahrscheinlichkeit von Produktflops deutlich reduziert und ein sicheres, kundenorientiertes Produkt erzielt werden.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Um eine am Kunden orientierte LED-Straßenleuchte zu entwickeln, sollen Methoden und Prozesse zur Anwendung kommen, die der Industrie Hilfestellung bei zukünftigen Produktentwicklungen geben. Wesentlicher Bestandteil ist die Erfassung der Bedürfnisse der Kunden. Das *House of Quality*, das zentrale Tool aus dem *Quality Function Deployment* (QFD), baut auf den Bedürfnissen der Kunden auf und transformiert diese in technische Produktanforderungen. Anschließend werden die Ergebnisse aus dem House of Quality in einem paarweisen Vergleich gegenübergestellt und objektiv bewertet, so dass ein Ranking der kundenrelevantesten Komponenten bezüglich der Wartungsfreundlichkeit herausgearbeitet werden kann. Eine neutrale Marktuntersuchung zeigt abschließend, wie die fünf häufigsten eingesetzten LED-Straßenleuchten die ermittelten Kundenanforderungen erfüllen.

Realisierungsgrad

Die Ergebnisse der Forschungsarbeit werden an Unternehmen, besonders an kleine und mittelständische Unternehmen rückgekoppelt, um diese auf Grund geringerer Risikobereitschaft zu stärken. Durch eine neutrale aber anwendungsorientierte Betrachtung des Leuchtenmarktes sind die Ergebnisse zusätzlich für Kommunen hilfreich, um zukünftige Projekte im Bereich der Straßenbeleuchtung erfolgreich abzuschließen. Bereits in einem vergangenen Forschungsprojekt wurde die Zusammenarbeit mit Kommunen gestärkt und es wurden gemeinsam Kriterien zur Wartungsfreundlichkeit von Straßenleuchten erarbeitet.

Ascertainment of customer's requirements for LED streetlights of main roads

Jens Kilian, B.Eng., Prof. Dr. rer. Pol. Hildegard Manz-Schumacher, Prof. Dr.-Ing. Eva Schwenzfeier-Hellkamp Bielefeld University of Applied Sciences / Research program ITES

Issue

Customer's requirements, e.g. the sophisticated decision-making criterion maintainability, have to take already in the development phase of a new LED streetlight into account, because of the increased probability of a non-success. A LED streetlight which does not meet the customer's requirements will cause dissatisfied customers and dwindling sales figures in the long term.

Aim

The objective of this research focus is to determine customer-relevant components of a LED streetlight for main roads regarding to maintainability to forward the market-oriented and environmental product development of the energy-efficient LED technology. This will promote a process optimization in the selection of the best streetlight and will achieve a safe and customer-oriented product.

Description of the innovation/»best practice«

To develop a customer-oriented LED streetlight, there is expected to apply methods and processes, which are helpful for future product developments of enterprises. The essential part is to acquire customer's requirements. The 'House of Quality' is the main tool of the 'Quality Function Deployment' (QFD) and transforms the customer's requirements into technical product requirements. Subsequently, the results of the 'House of Quality' are compared and evaluated in a 'Pairwise Comparison' in a very objective way, so that a ranking of the most customer-relevant components regarding to maintainability of streetlights can work out. A neutral analysis of the five most used LED streetlights for main roads in Germany shows how the customer's requirements are implemented.

Level of realization

The objective of the research will be feeding back to enterprises, especially to small and medium-sized enterprises (SME), to boost them because of their risk-shy nature. Because of the neutral but applied-oriented reflection of the lighting market, the objective of the research is also helpful for municipalities to finalize future streetlight projects successfully. In a past research focus there was already an intensive and very successful cooperation regarding to maintainability of streetlights with municipalities.

Ascertainment of customer's requirements for LED streetlights of main roads

*Jens Kilian, M.Eng.,
Prof. Dr.-Ing. Eva Schwenzfeier-Hellkamp,
Prof. Dr. rer. pol. Hildegard Manz-Schumacher*

*Bielefeld University of Applied Sciences
Research program ITES
Interaktion 1
33619 Bielefeld*

Summary

The research work wants to determine customer requirements of the sophisticated decision-making criterion "maintainability" with the objective of transferring them to technical characteristics and of working out a ranking by using different quality management tools. From the technical point of view, the realization of a larger housing e.g. was a less important criterion (relative weighting 0.5 %), whereas from the customer's point of view, it is much more important (relative weighting 13.2 %). To draw a meaningful conclusion, a new ranking was worked out which took into account technical criteria as well as customer requirements.

1 Introduction

For several years cities, districts and municipalities have used LED lights to illuminate their streets. In the course of the field of research "Smart Light", the research program ITES (Intelligente Technische EnergieSysteme – Smart Technical Energy Systems) of Bielefeld University of Applied Sciences wants to promote the market-oriented and environmental product development of the energy-efficient LED technology. The focus is on product improvement with regard to maintainability to generate an internationally competitive advantage for the German lighting industry.

2 Research design

First of all, a survey was carried out among the heads of department of street lighting in 73 large German cities (response rate 58 %). This survey had the intention to evaluate the decision-making criteria, which are relevant for purchasing LED lights for main roads. These results were used to elaborate two "Houses of Quality" by nine persons with different expertise in the area of lighting technology. The first House of Quality was worked out

in terms of the customer's requirements in general and the second in terms of maintainability. After this, an objective valuation of technical product requirements was made by working out a "Pairwise Comparison". The Pairwise Comparison was elaborated in another survey among the same heads of departments of street lighting who had been involved in the first survey (response rate 42 %). The research work was completed by a market analysis of the five most commonly used LED street lights for main roads in Germany, which shows how customer requirements are implemented.

2.1 Survey to evaluate the decision-making criteria relevant for purchasing LED lights for main roads

First of all, we will present the main results of the survey to evaluate the decision-making criteria relevant for purchasing LED lights for main roads with the focus on maintainability. Tab. 1 shows the criteria for maintainability sorted by arithmetic average. The "Interchangeability of the electronic control gear" and the "Interchangeability of the LED module" are the two most important criteria, whereas a "Smooth surface of the cooling fin" is the most unimportant.

Tab. 1: Evaluation of the maintainability of LED street lights sorted by arithmetic average
Evaluation criteria: 1 = very important; 2 = important; 3 = quite important; 4 = quite unimportant; 5 = unimportant; 6 = very unimportant

Rank	Criterion	Median	Arithmetic average
1.	Interchangeability of the electronic control gear	1	1.5
2.	Interchangeability of the LED module	1	1.5
3.	Interchangeability of the seals	2	1.9
4.	Screws, which are secured against loss	2	2.0
5.	Opening without the need of tools	2	2.1
6.	Clearly arranged cabling	2	2.1
7.	No tool change	2	2.3
8.	Smooth surface of the cooling fin	3	2.7

2.2 House of Quality – The main tool of the QFD method

The House of Quality is the main tool of the Quality Function Deployment (QFD) and transfers the customer's requirements to technical product requirements. There are two key questions: "What do the users expect?" and "How can these expectations be put into practice?" [The02].

The House of Quality of the maintainability clarifies that a "Maintenance-friendly position" of the components contributes to the realization of the three most important customer's requirements "Interchangeability of the electronic control gear", "Interchangeability of the LED module" and "Interchangeability of the seals". Moreover, a "Maintenance-friendly position" influences the six technical product requirements "Plug connection", "Labeled wires", "Consistent coloring (inside)", "Modularity", "Clamp connection" and "Larger housing". "Larger Housing" provides more space inside the light to place the components in a

maintenance-friendly way. So it is possible to realize plug connections and/or clamp connections which, in turn, provide the “Modularity” of the components. For the construction of an LED street light of main roads the technical criterion “Maintenance-friendly position” should be paramount because this criterion obtained 277 points of maximum 450 possible points in the relation matrix and thus obtained 15.5 % of the total points (2,167). Besides, this criterion positively influences six other technical requirements in the cross-impact matrix.

On the one hand, the most important customer-based components were detected and, on the other hand, it was possible to work out the technical requirements to realize the customer’s requirements by the work of the research program ITES of Bielefeld University of Applied Sciences.

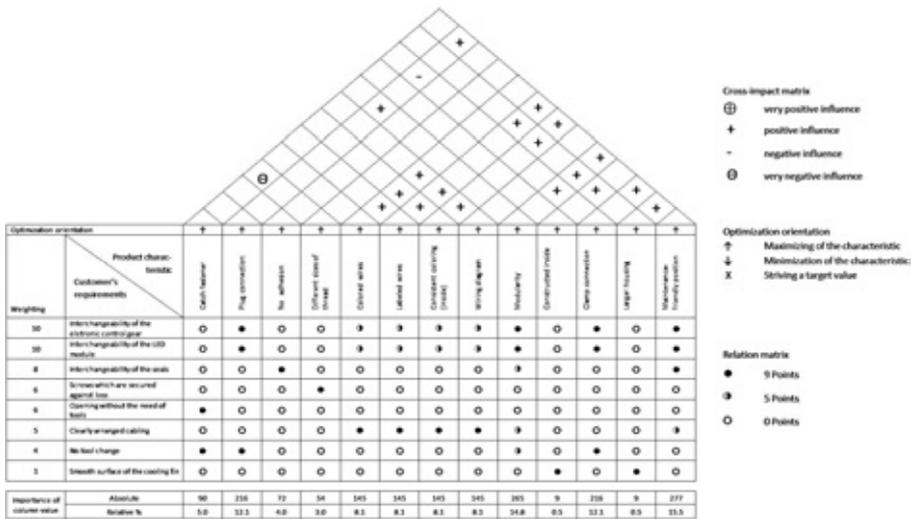


Fig. 1: The House of Quality of the maintainability

From the technical point of view, the criteria “Maintenance-friendly position” (15.5 %), “Modularity” (14.8 %), “Clamp connection” and “Plug connection” (in each case 12.1 %) are the most important ones which should be realized. “Constructed inside” and a “Larger housing” are the most unimportant criteria from the technical point of view.

It is important not only to take the technical point of view into account but also the customer’s requirements so that the research work goes on with an elaboration of a “Pairwise Comparison” in the form of a survey among large German cities.

2.3 Pairwise Comparison – A comparative methodology

The Pairwise Comparison is a comparative methodology which is used for taking a decision of different choices. By elaborating a Pairwise Comparison it is possible to contrast the different choices systematically because the importance of every single choice will not be generalized but graded [Zel06]. To work out the Pairwise Comparison the results of the House of Quality had to be categorized (see middle column in Tab. 2). Five Pairwise Comparisons were made in total. The first one refers to the categories and the other four refer to the technical requirements within the respective category.

The results of the performed Pairwise Comparison are shown clearly in Tab. 2 so that the context of every Pairwise Comparison and the resulting weighting of every criterion are clear. For the questioned heads of department of street lighting of the large German cities, a, “Catch fastener” is the most important technical criterion (14.8 %), followed by “Constructed inside (cooling fin)” and a “Larger Housing” (in each case 13.2 %). “Colored wires” (4.3 %) and “Labeled wires” (3.3 %) are the most unimportant technical criteria from the customer’s point of view.

Tab. 2: Evaluation of the Pairwise Comparison

Light with greatest usefulness to the customer’s requirements and needs 100.0 %	Construction with regard to cooling 26.4 %	Constructed inside (cooling fin) 50.0 % 13.2 %
		Larger housing 50.0 % 13.2 %
	Opening/Closing of the light 22.2 %	Catch fastener 66.7 % 14.8 %
		Different sizes of thread for screws which are secured against loss 33.3 % 7.4 %
	Clarity of the components 18.1 %	Colored wires 23.6 % 4.3 %
		Labeled wires 18.1 % 3.3 %
		Consistent coloring (inside) 27.8 % 5.0 %
		Wiring diagram 30.6 % 5.5 %
	Interchangeability of the components 33.3 %	Plug connection 20.0 % 6.7 %
		No adhesion for the interchangeability of the seals 17.5 % 5.8 %
		Modularity 25.0 % 8.3 %
		Clamp connection 15.0 % 5.0 %
		Maintenance-friendly position 22.5 % 7.5 %

3 Conclusion

A comparison of the results of the House of Quality and the Pairwise Comparison, which are sorted by arithmetic average, show that there are deviations of the different results because of different focuses. It was necessary to work out two rankings with different focuses to elaborate one objective and generally valid ranking. Tab. 3 shows the comparison and uniting of the results of the House of Quality and the Pairwise Comparison.

Tab. 3: Uniting the results of the House of Quality and the Pairwise Comparison (in each case sorted by arithmetic average)

Rank	House of Quality		Pairwise Comparison		New Ranking	
	Criterion	rel. weighting [%]	Criterion	rel. weighting [%]	Criterion	rel. weighting [%]
1.	Maintenance-friendly position	15.5	Catch fastener	14.8	Modularity	11.6
2.	Modularity	14.8	Constructed inside (cooling fin)	13.2	Maintenance-friendly position	11.5
3.	Plug connection	12.1	Larger housing	13.2	Catch fastener	9.9
4.	Clamp connection	12.1	Modularity	8.3	Plug connection	9.4
5.	Wiring diagram	8.1	Maintenance-friendly position	7.5	Clamp connection	8.6
6.	Consistent coloring (inside)	8.1	Different sizes of thread for screws which are secured against loss	7.4	Constructed inside (cooling fin)	6.9
7.	Colored wires	8.1	Plug connection	6.7	Larger housing	6.9
8.	Labeled wires	8.1	No adhesion for the interchangeability of the seals	5.8	Wiring diagram	6.8
9.	Catch fastener	5.0	Wiring diagram	5.5	Consistent coloring (inside)	6.6
10.	No adhesion for the interchangeability of the seals	4.0	Consistent coloring (inside)	5.0	Colored wires	6.2
11.	Different sizes of thread for screws which are secured against loss	3.0	Clamp connection	5.0	Labeled wires	5.7
12.	Constructed inside (cooling fin)	0.5	Colored wires	4.3	Different sizes of thread for screws which are secured against loss	5.2
13.	Larger housing	0.5	Labeled wires	3.3	No adhesion for the interchangeability of the seals	4.9

Tab. 3 shows that there are great deviations between the different results. The technical criterion “Larger housing” ranks thirteenth (0.5 %) in the House of Quality, whereas it ranks third (13.2 %) in the Pairwise Comparison. The technical criterion, “Constructed inside (cooling fin)”, shows the same tendency. A Smaller deviation is shown with regard to the criterion “Maintenance-friendly position”, which ranks first (15.5 %) in the House of Quality and fifth (7.5 %) in the Pairwise Comparison. “Modularity” ranks second (14.8 %) in the House of Quality and fourth (8.3 %) in the Pairwise Comparison.

Even if the results of the House of Quality and the Pairwise Comparison differ, the comparison shows a significant result: The House of Quality is a method to transfer customer’s

requirements into technical requirements so that this method has a technical focus for ranking criteria. The Pairwise Comparison is a method to compare criteria systematically and was carried out by heads of department of street lighting of large cities German so that this method has its focus on the customer's requirements. The research work goes on with an elaboration of a ranking, which takes into account the technical focus as well as the customer's requirements. The new ranking is shown in the right column of Tab. 3 and is calculated by the arithmetic average of the results of the House of Quality and the Pairwise Comparison. The advantage of this approach is the equal consideration of the results of the House of Quality and the Pairwise Comparison.

In the new ranking, "Modularity" ranks first (11.6 %) and "Maintenance-friendly position" ranks second (11.5 %) so that these criteria are the most important ones to realize an LED streetlight for main roads. "Different sizes of thread for screws which are secured against loss" ranks twelfth (5.2 %) and "No adhesion for the interchangeability of the seals" ranks thirteenth (4.9 %) in the new elaborated ranking so that these criteria are the most unimportant ones.

4 References

- [Dil00] Dill, C.: "Paarweiser Vergleich", University of Karlsruhe, October 06th 2000
http://nosnos.synology.me/MethodenlisteUniKarlsruhe/imihome.imi.uni-karlsruhe.de/npaarweiser_vergleich_b.html, last accessed: January 03th 2016

- [The02] Theden, P.; Colsmann, H.: "*Qualitätstechniken. Werkzeuge zur Problemlösung und ständigen Verbesserung*". 3th printing, Munich: Carl Hanser Verlag, 2002.

- [Zel06] Zelewski, S; Peters, M.: "Multikriterielle Wirtschaftlichkeitsanalysen mithilfe des Analytic Hierarchy Process", WISU, 8-9/06, Lange Verlag GmbH & Co. KG, pp. 1069-1075

Optimierte Spektren für Human Centric Lighting – Theoretische Grenzen

Dr. Sebastian Knoche, ITZ Innovations- und Technologiezentrum GmbH (TRILUX Gruppe)

Problemstellung und Forschungsfragen

Im Rahmen des Verbundforschungsprojekts OLIVE werden Lichtsysteme zur Verbesserung von Leistung und Gesundheit entwickelt. Hierbei stellt sich die Frage, inwieweit sich melanopischer Wirkfaktor und ähnlichste Farbtemperatur eines Spektrums unabhängig voneinander steuern lassen.

Stand der Wissenschaft/Technik

Die vorliegende Untersuchung basiert auf dem melanopischen Wirkspektrum sowie der Definition des melanopischen Wirkfaktors aus der DIN SPEC 5031-100. Das melanopische Wirkspektrum beschreibt die Lichtempfindlichkeit der intrinsisch photosensitiven retinalen Ganglienzellen, welche an vielen nicht-bildgebenden Prozessen, so auch der Synchronisation der inneren Uhr, beteiligt sind. Generell weisen Spektren mit hoher Farbtemperatur einen hohen Blauanteil und einen hohen melanopischen Wirkfaktor auf.

Forschungshypothesen

Da das melanopische Wirkspektrum von den CIE Normspektralwertfunktionen abweicht, sollten sich melanopische Wirksamkeit und Farbkoordinaten eines Spektrums prinzipiell unabhängig voneinander steuern lassen.

Versuchsaufbau

Zuerst wird ein Punkt auf dem planckschen Lokus oder Tageslicht-Lokus in der CIE xy-Farbtabelle als Ziel-Farbtort spezifiziert. In einer numerischen Optimierung wird der melanopische Wirkfaktor des Spektrums maximiert (oder minimiert) unter der Nebenbedingung dass die Farbkoordinaten des Spektrums auf dem Ziel-Farbtort liegen. Als weitere Nebenbedingung wird ein Farbwiedergabeindex von $R_a \geq 80$ implementiert.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Wenn das Spektrum vom Optimierungsalgorithmus ohne Rücksicht auf die Farbwiedergabe variiert werden darf, spannen minimal und maximal erreichbarer melanopischer Wirkfaktor einen weiten Bereich auf. Die optimierten Spektren bestehen aus zwei Peaks und haben daher eine sehr schlechte Farbwiedergabe. Unter Hinzunahme der Nebenbedingung $R_a \geq 80$ werden derartige Peak-Spektren verboten, was den Gestaltungsspielraum einschränkt. Als Folge verschmälert sich die Bandbreite erreichbarer melanopischer Wirkfaktoren. Zudem lässt sich an den Ergebnissen erkennen, dass bei höheren Farbtemperaturen des Ziel-Farbtorts auch höhere melanopische Wirkfaktoren möglich sind. Dieses Ergebnis stimmt überein mit der bisher bekannten Korrelation des melanopischen Wirkfaktors mit der Farbtemperatur und zeigt, dass auch durch aufwändiges Maßschneidern der Spektren diese „natürliche“ Korrelation nur recht eingeschränkt zu umgehen ist.

Optimised emission spectra for human centric lighting – Theoretical constraints

Dr. Sebastian Knoche, ITZ Innovations- und Technologiezentrum GmbH (TRILUX Group)

Research issue

In the joint research project OLIVE, lighting systems for the improvement of health and performance are being developed. In this context, the question arises to which extent the melanopic factor and the correlated colour temperature of a spectrum can be changed independently from each other.

State of science/technology

The present study is based on the melanopic action spectrum and melanopic factor defined in DIN SPEC 5031-100. The melanopic action spectrum describes the sensitivity of the intrinsic photosensitive retinal ganglion cells to light. These cells are involved in many non-image-forming processes, such as the synchronisation of the circadian clock. In general, light spectra with high correlated colour temperature have large fractions of blue light and a large melanopic factor.

Research hypothesis

Because the melanopic action spectrum is different from the CIE colour-matching functions, it should be possible to control the melanopic factor of a spectrum and its chromaticity coordinates independently from each other.

Experimental setup

At first, target chromaticity coordinates on the Planckian or daylight locus in the CIE xy-diagram are specified. In a numerical optimisation, the melanopic factor of a spectrum is maximised (or minimised) subject to the constraint that the chromaticity coordinates of the spectrum equal the specified target chromaticity coordinates. As a further constraint, a colour rendering index of $R_a \geq 80$ is implemented.

Results in comparison with previous findings

When the optimisation algorithm is allowed to vary the spectrum without regard to the colour rendering index constraint, maximum and minimum attainable melanopic factor span a wide range. The optimised spectra consist of two peaks and have, therefore, an unacceptable colour rendition. When the constraint $R_a \geq 80$ is included, such peak spectra are ruled out. Consequently, the band of possible melanopic factors becomes narrower. In addition, the results demonstrate that with higher colour temperature of the target chromaticity coordinates, higher melanopic factors can be realised. This result coincides with the well-known correlation of the melanopic factor with the colour temperature and shows that this “natural correlation” can hardly be circumvented by spectral tailoring.

Optimierte Spektren für Human Centric Lighting – Theoretische Grenzen

Dr. Sebastian Knoche,
ITZ Innovations- und Technologiezentrum GmbH (TRILUX Gruppe)
Kleinbahnstr. 27, 59759 Arnsberg

Zusammenfassung

Wir untersuchen, in welchen Grenzen sich der melanopische Wirkfaktor von Lichtquellen durch spektrales Maßschneidern variieren lässt. In numerischen Simulationen wird der melanopische Wirkfaktor eines Spektrums maximiert oder minimiert, unter der Nebenbedingung dass das Spektrum auf einem vorgegebenen Farbort liegt und ggf. einen Mindest-Farb wiedergabeindex $R_a \geq 80$ hat. Es zeigt sich, dass bei Berücksichtigung der Nebenbedingung $R_a \geq 80$ der melanopische Wirkfaktor nur in einem engen Band variiert werden kann: Bei geringen Farbtemperaturen können nur geringe melanopische Wirkfaktoren erreicht werden, bei hohen Farbtemperaturen nur hohe melanopische Wirkfaktoren. Diese Ergebnisse sind relevant für die Auslegung von Leuchten für das Human Centric Lighting.

1 Einleitung

Im derzeit vielbeachteten Feld des *Human Centric Lighting* ist die biologische Lichtwirkung ein wichtiger Aspekt, um die Gesundheit und den circadianen Rhythmus des Menschen zu unterstützen. Der Fokus der Betrachtungen liegt derzeit auf der *melanopischen Wirksamkeit* von Licht, welche vom Lichtspektrum abhängt und durch den melanopischen Wirkfaktor quantifiziert wird. Blau-angereichertes Licht mit hohem melanopischen Wirkfaktor wirkt dabei generell aktivierend auf den Menschen und sollte morgens angewendet werden, während in den Abend- und Nachtstunden warme Lichtfarben mit geringer melanopischer Wirkung zu bevorzugen sind um einen erholsamen Nachtschlaf nicht zu gefährden.

Aus diesen Anforderungen erwächst die technische Aufgabe, Lichtquellen mit variablem melanopischen Wirkfaktor zu entwickeln, deren Spektren maßgeschneidert sind um einen möglichst hohen oder möglichst niedrigen melanopischen Wirkfaktor aufzuweisen. Gleichzeitig dürfen die visuellen Aspekte der Beleuchtung nicht vernachlässigt werden, welche beispielsweise Ansprüche an Lichtfarbe und Farbwiedergabe stellen. In diesem Papier werden theoretische Grenzen bei der Optimierung des melanopischen Wirkfaktors aufgezeigt.

2 Grundlagen

2.1 Theoretische Grundlagen und Definitionen

Wir beginnen mit einer Zusammenstellung der wichtigsten physikalischen und farbmetrischen Grundlagen, auf denen die nachfolgenden numerischen Untersuchungen aufbauen. Das Spektrum $\phi_\lambda(\lambda)$ einer Lichtquelle gibt die Verteilung der Strahlungsleistung pro Wellenlängenintervall an, siehe Abb. 1 a) für ein Beispiel. Im farbmetrischen System der CIE [1] wird die Lichtfarbe eines Spektrums durch die drei Farbwerte (Tristimulus-Werte) X, Y, Z angegeben, welche sich gemäß

$$X = \int \bar{x}(\lambda)\phi_\lambda(\lambda) d\lambda, \quad Y = \int \bar{y}(\lambda)\phi_\lambda(\lambda) d\lambda, \quad Z = \int \bar{z}(\lambda)\phi_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

berechnen, wobei $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ die Spektralwertfunktionen des CIE1931 Normalbeobachters sind, siehe Abb. 1 b). Die Farbkoordinaten auf der CIE xy-Farbtabelle ergeben sich hieraus als $x = X/(X + Y + Z)$ und $y = Y/(X + Y + Z)$. Aus den Farbkoordinaten lässt sich auch die ähnlichste Farbtemperatur CCT bestimmen [1].

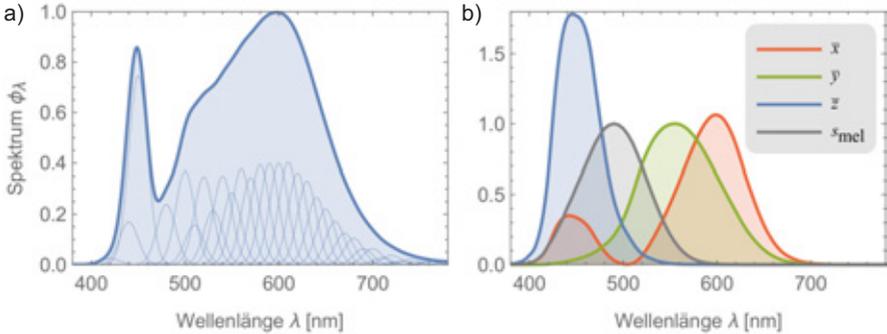


Abb. 1: a) Lichtspektrum welches sich als Summe von mehreren Gauß-Funktionen (dünn gezeichnet) ergibt. b) Die genormten Spektralwertfunktionen $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ und das melanopische Wirkspektrum s_{mel} .

Zusätzlich zur visuellen Wahrnehmung von Licht gibt es eine nicht-visuelle Wirkung, welche durch die *intrinsisch photosensitiven retinalen Ganglienzellen (ipRGCs)* vermittelt wird. Diese enthalten das lichtempfindliche Protein *Melanopsin*. Der melanopische Wirkfaktor ist definiert als [2]

$$a_{mel,v} = \frac{\int s_{mel}(\lambda)\phi_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int V(\lambda)\phi_\lambda(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

wobei $s_{mel}(\lambda)$ das melanopische Wirkspektrum ist, siehe Abb. 1 b), und $V(\lambda)$ die Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges. Man beachte dass $V(\lambda) = \bar{y}(\lambda)$ per Definition gilt. Der melanopische Wirkfaktor beschreibt also das Verhältnis zwischen nichtvisuellem Stimulus und visuellem Stimulus des Lichts mit Spektrum $\phi_\lambda(\lambda)$.

2.2 Natürliche und typische Werte für den melanopischen Wirkfaktor

Als natürliches Licht kann zunächst einmal Tageslicht angenommen werden, welches vornehmlich mit hohen Farbtemperaturen vorkommt. Bei geringeren Farbtemperaturen kann man das Spektrum eines planckschen Strahlers als Referenzlicht heranziehen. So ist seitens der CIE das Referenzspektrum bei der Berechnung des Farbwiedergabeindex definiert als plancksches Spektrum für Farbtemperaturen unter 5000 K und als Tageslichtspektrum für höhere Farbtemperaturen [1, 3]. Diese Spektren können mathematisch für beliebige Farbtemperaturen berechnet werden, und anschließend ihr melanopischer Wirkfaktor. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 über einen weiten Bereich dargestellt.

Als Vergleich zu diesem Referenzlicht wurden außerdem einige spezielle Spektren analysiert und in Abb. 2 eingetragen. Das Licht einer Glühlampe und des bedeckten Himmels (CIE Normlichtarten A und D65, [1]) liegen aufgrund ihrer Definition auf der Kurve unseres Referenzlichts. Das Licht der direkten Sonneneinstrahlung [4] und des blauen Himmels [5]

(Auswahl von 9000 – 14000 K aus der Granada Skylight Spectral Database) liegen ebenfalls sehr eng an unserer Referenzkurve. Weiterhin wurden einige Spektren kommerziell erhältlicher LEDs mit Farbwiedergabeindex Ra ≥ 80 aus der Sammlung der IES [6] analysiert und Abb. 2 hinzugefügt. Die LED-Spektren liegen in der Regel bei geringerem melanopischen Wirkfaktor als natürliches Licht gleicher Farbtemperatur. Dies liegt daran, dass der prominente Blau-Peak leuchtstoffkonvertierter LEDs üblicherweise bei kürzeren Wellenlängen liegt als die maximale Sensitivität der ipRGCs.

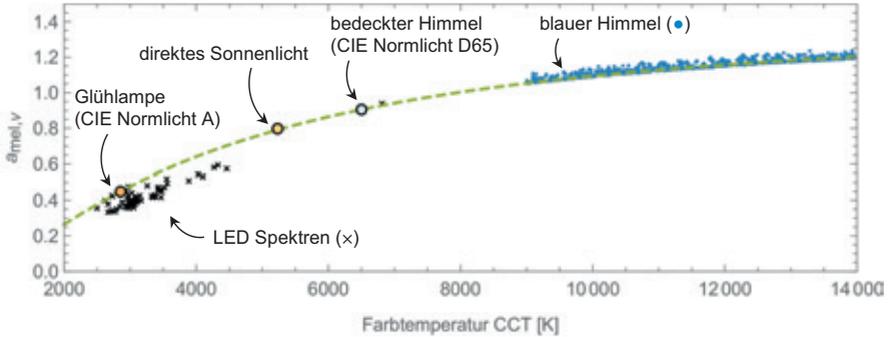


Abb. 2: Melanopischer Wirkfaktor für verschiedene Lichtquellen unterschiedlicher Farbtemperatur. „Natürliches Licht“ (plancksches Spektrum für CCT < 5000 K bzw. Tageslichtspektrum für CCT ≥ 5000 K) ist als gestrichelte grüne Linie dargestellt.

3 Numerische Optimierung von Spektren

Die Grundidee zur Bestimmung theoretischer Grenzen des melanopischen Wirkfaktors ist wie folgt. Zunächst wird eine Farbtemperatur CCT vorgegeben, für die ein Ziel-Farbart in xy-Diagramm definiert wird (auf dem planckschen Kurvenzug bei CCT < 5000 K bzw. auf dem CIE-Tageslichtkurvenzug bei CCT ≥ 5000 K). Ein numerischer Algorithmus variiert dann ein Spektrum um dessen melanopischen Wirkfaktor zu maximieren bzw. zu minimieren, unter der Nebenbedingung dass der Ziel-Farbart eingehalten wird. Dieses Vorgehen wird für viele Farbtemperaturen zwischen 2000 und 14000 K durchgeführt.

3.1 Erste Optimierungs-Strategie

Im einfachsten Fall wird das Spektrum durch die Angabe der Intensität zu jeder Wellenlänge zwischen 380 nm und 780 nm in Schritten von 1 nm bestimmt. Der numerische Algorithmus darf jede dieser 401 Intensitäten variieren, solange die einzelnen Intensitäten nicht negativ werden und das Gesamt-Spektrum auf dem Ziel-Farbart liegt. In diesem Fall kann man Spektren, Wirkspektren und Spektralwertfunktionen als Vektoren darstellen,

$$\vec{\phi}_\lambda = \begin{pmatrix} \phi_\lambda(380 \text{ nm}) \\ \vdots \\ \phi_\lambda(780 \text{ nm}) \end{pmatrix}, \quad \vec{s}_{mel} = \begin{pmatrix} s_{mel}(380 \text{ nm}) \\ \vdots \\ s_{mel}(780 \text{ nm}) \end{pmatrix}, \quad \vec{x} = \begin{pmatrix} \bar{x}(380 \text{ nm}) \\ \vdots \\ \bar{x}(780 \text{ nm}) \end{pmatrix}, \quad \text{etc.} \quad (3)$$

In dieser Darstellung reduzieren sich die gewichteten Integrale dann zu Skalarprodukten, z.B. $\int s_{mel}(\lambda)\phi_\lambda(\lambda) d\lambda = \vec{s}_{mel} \cdot \vec{\phi}_\lambda$. Auf diese Weise, also als diskrete Summe in Schritten von 1 nm, werden diese Integrale auch üblicherweise in der Farbmetrik ausgewertet [1].

Aus einem gegebenen Ziel-Farbort x_{ziel}, y_{ziel} werden zunächst die Ziel-Farbwerte $X_{ziel}, Y_{ziel}, Z_{ziel}$, siehe Gl. (1), berechnet, wobei die Normierung auf $Y_{ziel} = 100$ festgelegt wird. Das Optimierungsproblem lautet dann

$$\begin{aligned} & \text{maximiere/minimiere } \vec{s}_{mel} \cdot \vec{\phi}_\lambda \\ & \text{mit Nebenbedingungen } \vec{x} \cdot \vec{\phi}_\lambda = X_{ziel}, \vec{y} \cdot \vec{\phi}_\lambda = 100, \vec{z} \cdot \vec{\phi}_\lambda = Z_{ziel}, \vec{\phi}_\lambda \geq \vec{0} \end{aligned} \quad (4)$$

was als *lineare Optimierung* oder *Linear Programming* bekannt ist. Zur numerischen Lösung sind effiziente Algorithmen verfügbar.

Die Resultate sind in Abb. 3 dargestellt. Abb. 3 a) zeigt, dass der melanopische Wirkfaktor theoretisch über einen weiten Bereich variiert werden kann, welcher umso größer ist je höher die Farbtemperatur ist. Im Prinzip lassen sich Farbtemperatur und melanopische Wirksamkeit eines Spektrums weitgehend unabhängig voneinander einstellen.

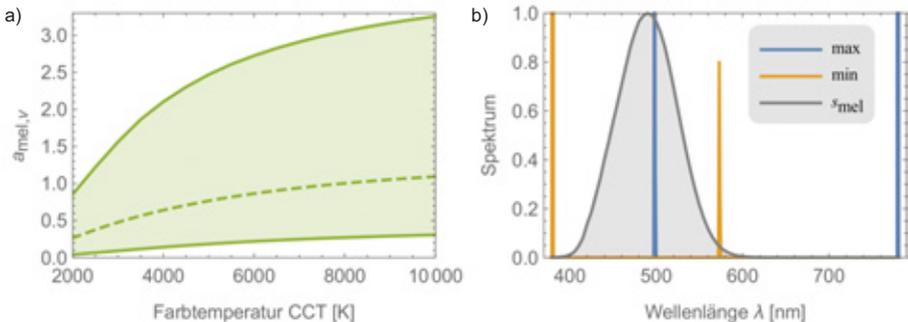


Abb. 3: a) Theoretisch maximal und minimal mögliche melanopische Wirkfaktoren bei festgelegtem Farbort entsprechend der Farbtemperatur CCT. Zum Vergleich ist das „natürliche Licht“ aus Abb. 2 wieder als gestrichelte Linie dargestellt. b) Optimierte Spektren mit Farbtemperatur 4000 K.

Die Spektren, welche einen maximalen bzw. minimalen melanopischen Wirkfaktor bei festgelegtem Farbort auf dem planckschen Kurvenzug bei 4000 K haben, sind in Abb. 3 b) gezeigt. Diese bestehen jeweils nur aus zwei engen Peaks, sind also eine Überlagerung zweier monochromatischer Lichtarten. Aus diesem Grund haben diese melanopisch optimierten Spektren eine höchst unzulängliche Farbwiedergabe und sind für den praktischen Gebrauch ungeeignet. Das Spektrum, welches $a_{mel,v}$ maximiert (blaue Linie in Abb. 3) hat einen Peak beim Maximum des melanopischen Wirkspektrums (grau eingezeichnet), sowie einen weiteren am roten Ende des Spektrums um den Ziel-Farbort zu erreichen.

3.2 Zweite Optimierungsstrategie mit Farbwiedergabeindex $R_a \geq 80$

Um das Problem der Peaks zu beseitigen, wurde eine neue Nebenbedingung bei der Optimierung eingeführt: Der Farbwiedergabeindex R_a des Spektrums soll mindestens 80 sein. Aufgrund von Nichtlinearitäten in der Berechnung des Farbwiedergabeindex [3] kann der effiziente Algorithmus des Linear Programming nicht mehr verwendet werden. Um die Rechenzeit der Optimierung in einem vernünftigen Rahmen zu halten, muss daher die Anzahl der Freiheitsgrade (401 im obigen Fall) deutlich reduziert werden.

Wir stellen das Spektrum daher als Überlagerung von Basis-Spektren $\phi_\lambda^{(v)}$ mit Amplituden $c^{(v)}$ dar,

$$\phi_\lambda(\lambda) = \sum_{v=1}^{v_{max}} c^{(v)} \cdot \phi_\lambda^{(v)}(\lambda) \quad \text{mit} \quad \phi_\lambda^{(v)}(\lambda) = \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_v)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (5)$$

Als Basis-Spektren wurden hier Gaußfunktionen gewählt, welche über die Wellenlängen-Achse verteilt sind. Die Wellenlängen λ_v , an denen die einzelnen Gauß-Kurven zentriert sind, sind äquidistant mit Abstand $\delta\lambda$. Die Standardabweichung σ , ein Maß für die Breite der Gauß-Kurve, wählen wir mit $\sigma = \delta\lambda$ so, dass sich benachbarte Gaußkurven überschneiden. In Abb. 1 a) ist dargestellt, wie eine solche Überlagerung von Gauß-Kurven ein typisches LED-Spektrum abbilden können, dort mit $\delta\lambda = 10$ nm.

Der numerische Optimierungsalgorithmus darf nun die Amplituden $c^{(v)}$ variieren, um den melanopischen Wirkfaktor des Spektrums maximal oder minimal werden zu lassen. Als Nebenbedingung werden die gegebenen Farborte $X_{ziel}, Y_{ziel}, Z_{ziel}$ (wie oben) berücksichtigt sowie dass der berechnete Farbwiedergabeindex des Spektrums mindestens 80 betragen soll. Die Amplituden $c^{(v)}$ dürfen selbstverständlich nicht negativ werden.

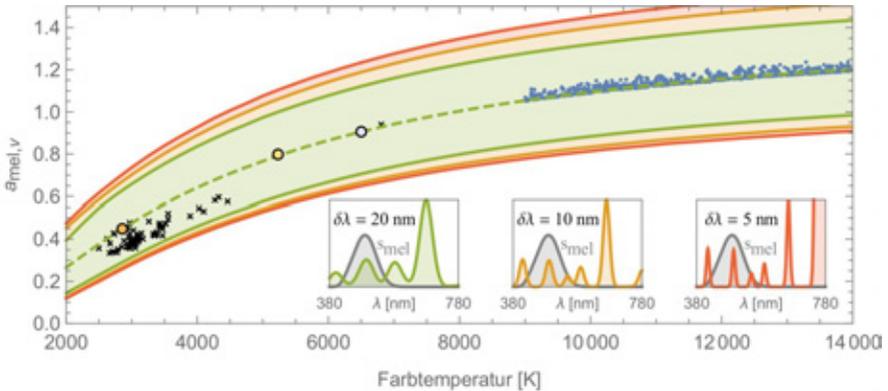


Abb. 4: Theoretische Grenzen des melanopischen Wirkfaktors bei festgelegtem Farbort und $Ra \geq 80$.

Dargestellt sind die Optimierungsergebnisse für $\delta\lambda = 20$ nm (grünes Band), $\delta\lambda = 10$ nm (orange) und $\delta\lambda = 5$ nm (rot). Zum Vergleich sind die Lichtquellen aus Abb. 1 ebenfalls gezeigt. Die Insets zeigen die Spektren mit 4000 K welche $a_{mel,v}$ maximieren, und im Vergleich dazu $s_{mel}(\lambda)$ (grau).

In Abb. 4 sind die Ergebnisse der Optimierung für verschiedene $\delta\lambda$ dargestellt (farbige Bereiche). Die Grenzen, in denen der melanopische Wirkfaktor variiert werden kann, bilden nun ein deutlich engeres Band um die gestrichelte Linie des Referenz-Lichts. Je kleiner $\delta\lambda$, desto feiner kann das Spektrum eingestellt werden. Trotz festgeschriebenem $Ra \geq 80$ führt dies wiederum dazu, dass die optimierten Spektren aus engen Peaks bestehen je kleiner $\delta\lambda$ wird, siehe Insets in Abb. 4. Die tatsächliche Farbwiedergabe wird in diesen Fällen wieder sehr schlecht sein. Daher wird die praktisch relevante Grenze des melanopischen Wirkfaktors eher durch das grüne Band ($\delta\lambda = 20$ nm) bestimmt. Hier zeigt sich, dass der genormte Farbwiedergabeindex Ra unzulänglich ist, da durch geschicktes Positionieren von Peaks ein hoher Ra -Wert erreichbar ist obwohl einige Spektralfarben komplett ausgelassen werden.

4 Konklusion

In diesem Paper haben wir den Wertebereich des melanopischen Wirkfaktors erkundet. Dazu haben wir zunächst seine Werte für übliche Lichtquellen berechnet und im Anschluss daran den Bereich des theoretisch Möglichen eingegrenzt.

Dadurch, dass das melanopische Wirkspektrum sein Maximum im kurzwelligen Teil des sichtbaren Spektrums hat, gilt grob, dass blau-reiches kaltweißes Licht einen hohen melanopischen Wirkfaktor hat, warm-weißes Licht hingegen einen geringen. Diese Korrelation lässt sich durch maßgeschneiderte Spektren jedoch theoretisch umgehen (Abb. 3): Farbtemperatur und melanopischer Wirkfaktor können prinzipiell unabhängig voneinander variiert werden.

Der Spielraum schrumpft jedoch deutlich, wenn weitere praktisch relevante Nebenbedingungen berücksichtigt werden sollen. Die Forderung nach einer akzeptablen Farbwiedergabe ($R_a \geq 80$, keine zu engen Peaks im Spektrum) führt dazu, dass der melanopische Wirkfaktor nur noch in einem engen Band variiert werden kann (Abb. 4).

Die bevorzugte Farbtemperatur im Bürobereich liegt in der Regel um 4000 K. Wenn man versucht, unter Beibehaltung dieser bevorzugten Farbtemperatur die melanopische Wirksamkeit über den Tag zu variieren, gelingt dies maximal in den Grenzen $0.5 \leq a_{mel,v} \leq 0.8$. Ob diese Dynamik bereits Einflüsse auf den circadianen Rhythmus hat, wäre von medizinischer Seite zu klären. Lässt man eine Änderung der Farbtemperatur über den Tag zu, kann man eine größere Dynamik erreichen. Die maximale Spanne des melanopischen Wirkfaktors hängt dabei von der für den Menschen akzeptablen maximalen und minimalen Farbtemperatur ab, und kann aus Abb. 4 abgelesen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] CIE (Hrsg.), „Technical Report CIE 015:2004 - Colorimetry“, CIE, Wien, 2004.
- [2] „DIN SPEC 5031-100:2015-08, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren“, Beuth Verlag, Berlin, 2015.
- [3] CIE (Hrsg.), „Technical Report CIE 013:1995 - Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources“, CIE, Wien, 1995.
- [4] „Reference Solar Spectral Irradiance“, National Renewable Energy Laboratory, [Online]. Available: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>. [Zugriff am 23 Juni 2016].
- [5] J. Hernández-Andrés, J. Romero und R. Lee, „Colorimetric and spectroradiometric characteristics of narrow-field-of-view clear skylight in Granada, Spain“, *Journal of the Optical Society of America A*, Bd. 18, Nr. 2, pp. 412-420, Februar 2001.
- [6] IES (Hrsg.), „TM-30-15 - IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition“, IES, New York, 2015.

Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Aufmerksamkeitssteigerung durch biologisch wirksames Licht

Inga Rotherth, Prof. Dr. Stephan Völker, Technische Universität Berlin

Problemstellung und Forschungsfragen

Viele Untersuchungen zu nicht-visuellen Wirkungen von Licht haben gezeigt, dass spektral angepasstes Licht die Leistungsfähigkeit steigern kann (z.B. Smolders 2014, Wessolowski 2014, Shamsul 2013). Aufgrund unterschiedlicher Versuchsdesigns sind wenige Ergebnisse direkt miteinander vergleichbar. Die spektrale Empfindlichkeit der ipRGC-Zellen beschreibt die Melatoninsuppression abends und nachts. Ob diese Funktion auch für andere nicht-visuelle Wirkungen tagsüber gilt, ist noch nicht abschließend geklärt. Wie lange die Probanden in den durchzuführenden Versuchen dem Licht ausgesetzt sein müssen, um einen aufmerksamkeitssteigernden Effekt zu messen, ist noch unklar.

Stand der Wissenschaft/Technik

In der Literatur reicht die Beleuchtungsdauer in den Versuchen von einigen Minuten bis hin zu mehreren Stunden. Chang 2012 berichtet, dass die erste Stunde des Lichtpulses den größten Effekt auf die Melatoninsuppression hat. In den Untersuchungen zur Gehirnaktivität mittels fmRI von Vandewalle 2006 verschwindet der Effekt 10 Minuten nach dem Lichtausschalten wieder. Bei der Performance fand Smolders 2014 eine zeitliche Verzögerung des Effekts um 20 Minuten.

Forschungshypothesen

Die aufmerksamkeitssteigernde Wirkung des Lichts lässt sich innerhalb der ersten Stunde mit einem Konzentrationstest messen. Möglicherweise gilt dies auch für kürzere Zeiten, was für ein praktikables Versuchsdesign nachfolgender Versuche optimal wäre.

Versuchsaufbau

Der Versuchsraum ist mit steuerbaren warmweißen und kaltweißen LEDs ausgestattet. In dem Raum führen mehrere Versuchspersonen gleichzeitig in regelmäßigen Zeitabständen einen Konzentrationstest (D2-Test) durch und geben ihre aktuelle Müdigkeit auf der Karolinska-Sleepiness-Scale an. Es werden zwei Beleuchtungsniveaus (200 lx vs. 600 lx am Auge) und zwei Farbtemperaturen (3.000 K vs. 6.000 K) untersucht.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Der Versuch wird im Frühjahr 2016 durchgeführt und die Ergebnisse werden auf der Tagung berichtet. Der zeitliche Verlauf der Aufmerksamkeitssteigerung durch biologisch wirksames Licht am Tag beeinflusst das Versuchsdesign und die Versuchsdauer von größeren Hörsaalstudien, die in 2016 / 2017 innerhalb des Verbundprojekts *NiviL* (nicht-visuelle Lichtwirkungen) durchgeführt werden. Das Projekt zielt darauf ab, eine breite Datenbasis verschiedener nicht-visueller Wirkungen in verschiedenen Anwendungsgebieten und Bevölkerungsgruppen zu erheben, um daraus ein Modell abzuleiten.

Investigation of the temporal process of improved attention by biologically effective light

Inga Rotherth, Prof. Dr. Stephan Völker, Technische Universität Berlin

Research issue

Studies about non-visual effects of light have shown, that spectral modified light can enhance performance (e.g. Smolders und de Kort 2014, Wessolowski et al. 2014, Shamsul et al. 2013). Because of different experimental settings few results are truly comparable. The spectral sensitivity of the ipRGCs describes melatonin suppression in the evening and at night. If this function is also valid for other non-visual effects during daytime, is not fully clarified yet. It is still uncertain, how long subjects should be exposed to the light to measure a performance enhancing effect.

State of science/technology

Literature states exposing durations from some minutes till several hours in experiments. Chang et al. 2012 reports, that the first hour of the light pulse has the greatest effect on the melatonin suppression. The effect disappears 10 minutes after turning the lights off in a study about brain activity with fmRI from Vandewalle et al. 2006. Smolders and de Kort 2014 found a time delay of 20 minutes of the effect on performance.

Research hypothesis

The attention enhancing effect of light can be measured with a concentration test within the first hour. Perhaps this is also valid for shorter time durations, what would be preferable for following experimental designs.

Experimental setup

The experimental room is equipped with separate controlled warm white and cold white LEDs. A group of subjects simultaneously performs a concentration test (D2 test) and rates their current sleepiness on the Karolinska-Sleepiness-Scale in this room. Two illuminance levels (200 lx vs. 600 lx at the eye) and two spectra (3.000 K vs. 6.000 K) are studied.

Results in comparison with previous findings

The experiment will be conducted in spring 2016 and the results will be reported at the conference. The temporal process of attention enhancement through biologically effective light during the day influences the experimental design and the duration of a greater study in a lecture hall, that will be conducted in the project NiviL (non-visual lighting effects) in 2016 / 2017. The projects aims to develop a broad data base of non-visual effects in different applications and derive a model.

Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Aufmerksamkeitssteigerung durch biologisch wirksames Licht

*Inga Rotherth, Prof. Dr. Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik
Einsteinufer 19, 10587 Berlin*

Zusammenfassung

Um verschiedene Studienergebnisse zu nicht-visuellen Wirkungen miteinander zu vergleichen, müssen das Versuchsdesign und die Versuchsdauer genau berücksichtigt werden. In diesem Versuch wurde eine optimale Versuchsdauer im Hinblick auf eine Messung der aufmerksamkeitssteigernden Wirkung von Licht mithilfe des D2R-Tests unter Berücksichtigung des Lerneffektes untersucht. Der Versuch fand in einem Hörsaal statt, der mit warmweißen und kaltweißen LEDs ausgestattet ist. Es nahmen 40 Versuchspersonen unter unterschiedlichen Lichtbedingungen teil. Weitere Versuche im Rahmen des Verbundprojekts NiviL (Nicht-visuelle Lichtwirkungen) können nun darauf aufbauen.

1 Einleitung

Viele Untersuchungen zu nicht-visuellen Wirkungen von Licht haben gezeigt, dass biologisch wirksames Licht die Leistungsfähigkeit steigern kann (z.B. Smolders und de Kort 2014; Wessolowski et al. 2014; Shamsul et al. 2013). Bisher wird oft die spektrale Empfindlichkeit der ipRGC-Zellen herangezogen. Diese Empfindlichkeit beschreibt jedoch die Melatonin-suppression in der Nacht und es ist unklar, ob diese Funktion auch für nicht-visuelle Wirkungen tagsüber gilt. Aufgrund unterschiedlicher Versuchsdesigns sind wenige Ergebnisse direkt miteinander vergleichbar.

Um Studienergebnisse miteinander zu vergleichen, müssen Versuchsdauer, Art der Beleuchtung (Niveau und spektrale Verteilung), Tages- und Jahreszeit, individuelle Fakten der Probanden (Alter, Geschlecht, Gesundheitszustand, Chronotyp...) beachtet werden. Ein wichtiger Aspekt im Versuchsdesign ist die Versuchsdauer. Wie lange die Probanden in den durchzuführenden Versuchen dem Licht ausgesetzt sein müssen, um einen aufmerksamkeitssteigernden Effekt zu messen, ist noch unklar. In der Literatur reicht die Beleuchtungsdauer in den Versuchen von einigen Minuten bis hin zu mehreren Stunden. Nur wenige Studien haben sich mit Zeit, beziehungsweise mit dem Verlauf der Effekte über die Zeit, beschäftigt. Chang et al. (2012) berichten, dass die erste Stunde der Lichtexposition den größten Effekt auf die Melatonin-suppression hat. In den Untersuchungen zur Gehirnaktivität mittels fmRI von Vandewalle et al. (2006) verschwindet der Effekt 10 Minuten nach dem Lichtausschalten wieder. Bei der Performance fanden Smolders und de Kort (2014) eine zeitliche Verzögerung des Effekts um 20 Minuten.

Zur Messung der Aufmerksamkeit wurde in vielen Studien (z.B. Barkmann et al. 2012; Keis et al. 2014; Gramm 2015) der D2R-Test nach Brickenkamp et al. (2010) verwendet. Er liefert eine standardisierte Konzentrationsleistung und ist auch für Gruppen wie z.B. Schulklassen geeignet. Der D2R-Test wurde entwickelt, um einmalig in einem Versuch die Konzentrationsleistung zu bestimmen. Studien (Keis et al. 2014) haben gezeigt, dass der D2R-Test einen Lerneffekt besitzt, welcher bei wiederholter Durchführung wie z.B. unter

verschiedenen Beleuchtungsbedingungen, den potentiellen Effekt des Lichts überlagern kann.

Der in diesem Artikel vorgestellte Versuch beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie ein geeignetes Versuchsdesign aussehen sollte – mit besonderem Hinblick auf die Beleuchtungsdauer, die Vergleichbarkeit der Studienergebnisse und die Anwendbarkeit des D2R-Tests. Die zu untersuchende Hypothese lautet: Die aufmerksamkeitssteigernde Wirkung des Lichts lässt sich innerhalb der ersten Stunde mit einem Konzentrationstest messen.

2 Methoden

2.1 Versuchsdesign

Der D2R-Test soll daraufhin untersucht werden, wie lang die Lichtexposition und demnach die Versuchsdauer sein muss, um einen Effekt auf die Aufmerksamkeit zu finden (ohne Lerneffekt). Dabei soll der Effekt durch veränderte vertikale Beleuchtungsstärke und der Effekt durch verändertes Spektrum betrachtet werden. Da völlig verschiedene Spektren dieselbe Farbtemperatur haben können, dient die Farbtemperatur hier nur zur Unterscheidung der Spektren und nicht als unabhängige Größe.

Für die Lichtexposition werden vier Lichtszenen verwendet: zwei vertikale Beleuchtungsstärken (200 lx vs. 650 lx) bei konstantem Spektrum (4000 K) und zwei Spektren (3000 K vs. 6000 K) bei konstanter vertikaler Beleuchtungsstärke (200 lx) (siehe Tab. 1 und Abb. 1). Analog gibt es vier verschiedene Probandengruppen. Gruppe 1 sieht an Tag 1 die Lichtszene mit 200 lx und an Tag 2 die Lichtszene mit 650 lx. Bei Gruppe 2 ist die Reihenfolge der Tage vertauscht. Dies geschieht in Hinblick auf den Lerneffekt des D2R-Tests über mehrere Tage: Werden die Testergebnisse besser, weil eine andere Lichtszene vorliegt oder weil die Probanden geübter sind? In Gruppe 3 und 4 wird das Spektrum analog zu Gruppe 1 und 2 variiert.

Tab. 1: Verteilung der Probanden (Anzahl N) auf die Gruppen und Lichtszenen pro Gruppe und Tag: *geänderte Größe* und (konstante Größe)

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
Anzahl N	9	11	11	9
Tag 1	200 lx (4000 K)	650 lx (4000 K)	(200 lx) 3000 K	(200 lx) 6000 K
Tag 2	650 lx (4000 K)	200 lx (4000 K)	(200 lx) 6000 K	(200 lx) 3000 K

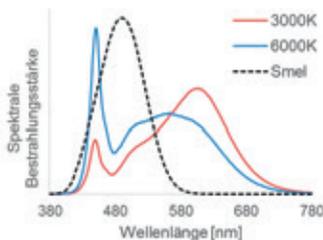


Abb. 1: Spektren der verwendeten LED-Leuchten und melanopische Empfindlichkeitskurve $S_{mel}(\lambda)$

40 Probanden (Alter von 18 J bis 29 J, Mittelwert 24 J, 26 männlich und 14 weiblich) nahmen an dem Versuch teil. Sie wurden zufällig in die vier Gruppen aufgeteilt (siehe Tab. 1). Jede Gruppe kam an zwei aufeinanderfolgenden Tagen zur gleichen Zeit 09.00 – 11.00 Uhr zum Versuch. Der Ablauf innerhalb eines Tages blieb gleich.

Der Versuch fand in einem Hörsaal der Technischen Universität Berlin statt. Er besitzt keine Fenster, sodass Tageslichteinfluss ausgeschlossen ist. Die Beleuchtung besteht aus LED-Deckeneinbau-Leuchten mit 2 verschiedenen LED-Spektren (siehe Abb. 1), die separat angesteuert werden können. Der Spektralbereich kann damit zwischen 3000 K und 6000 K eingestellt werden. Die vertikale Beleuchtungsstärke beträgt auf Augenhöhe der Probanden $200 \text{ lx} \pm 30 \text{ lx}$ bzw. $650 \text{ lx} \pm 30 \text{ lx}$.

Zu Beginn eines Versuchstages wurde eine Einverständniserklärung unterschrieben, der Ablauf und der D2R-Test erklärt. Ein Versuchsblock bestand aus einem D2R-Test, einem Fragebogen zum Wohlbefinden und weiteren wechselnden Fragebögen. Danach war Pause bis zum nächsten Testblock. In der Pause waren Sudokus, Lesen oder nichts tun erlaubt. Es durften keine Geräte mit selbstleuchtendem Bildschirm wie Handy oder Tablet genutzt werden. Insgesamt gab es sechs Versuchsblöcke. Der Versuch dauerte zwei Stunden. Der erste Versuchsblock diente als Übungsrunde für die Probanden. Im fünften Versuchsblock wurde der Fragebogen zur Beleuchtung ausgeteilt. Nach dieser Zeit sollten die Probanden sich an die Beleuchtung gewöhnt haben. Der zweite Versuchstag lief analog ab, bis auf einige Kontrollfragebögen. Am Ende des zweiten Versuchstages bekamen die Probanden eine Aufwandsentschädigung. Der Versuch fand im Februar bis März 2016 statt.

Tab. 2: Zeitlicher Versuchsablauf der Versuchsblöcke an einem Tag von 09.00 – 11.00 Uhr

0 min	10 min	20 min	30 min	50 min	75 min	115 min
Einleitung	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4	Block 5	Block 6

2.2 Messgrößen

Die Aufmerksamkeit der Probanden wird mit dem D2R-Test nach Brickenkamp et al. (2010) gemessen. Dabei müssen „d“s mit zwei Strichen angestrichen werden. Die erlaubte Zeit wurde von standardmäßig 20s auf 15s gesenkt, um Randeffekte zu vermeiden. Anhand der Geschwindigkeit und der Fehlerrate wird die Konzentrationsleistung berechnet.

Zusätzlich zur objektiven Messung bewerten die Probanden ihre Aufmerksamkeit und ihr allgemeines Wohlbefinden in einem Fragebogen. Der Fragebogen besteht aus der Karolinska Sleepiness Scale (Åkerstedt und Gillberg 1990), einer Gesichterskala aus fröhlichen bis traurigen Smileys (Andrews und Withey 1976) und einer 7-stufigen Lickert-Skala mit folgenden Items: „Ich fühle mich ...“ wohl, konzentriert, angespannt, interessiert, gestresst, ruhig, motiviert und munter. Zusätzlich wurde auf einer 7-stufigen Lickert-Skala gefragt, wie anstrengend und wie gut erkennbar der D2R-Test war.

Um auch die Akzeptanz der eingestellten Beleuchtung zu erfassen, wurde ein Fragebogen zur Bewertung der Beleuchtung bearbeitet. Er umfasst 7-stufige Lickert-Skalen der folgenden Items: Beleuchtung allgemein, Helligkeit im Raum / auf der Arbeitsfläche, Lichtfarbe, Farbe der Gegenstände, Blendung, Reflexionen auf der Arbeitsfläche und Vorstellbar für eigenes Büro / Wohnzimmer. Es wurden Beschwerden wie Kopfschmerzen und Müdigkeit

abgefragt. Außerdem wurden die Probanden gefragt, ob sie glauben, dass die Beleuchtung aktiviert, motiviert, beruhigt, beim Konzentrieren unterstützt oder das Wohlbefinden steigert.

Da die Konzentrationsleistung von individuellen Gegebenheiten beeinflusst wird, wurden weitere Fragebögen ausgefüllt. Ein allgemeiner Personenfragebogen enthält das Alter, das Geschlecht, die Berufsgruppe, lichtechnische Vorkenntnisse, Links- oder Rechtshändigkeit und das Tragen einer Sehhilfe. Mit einem Sehtestgerät (Oculus Binoptometer 4P) wurde die Sehschärfe der Probanden überprüft (bestanden ab einem Visus von 0,8). Ein Fragebogen zur Lichthistorie gibt Aussage darüber, wie lange und bei welchem Wetter sich die Probanden vor dem Versuch im Freien aufgehalten haben, wann sie schlafen gegangen und wieder aufgestanden sind und ob sie Kaffee getrunken hatten. Weiterhin werden die allgemeine Gesundheit (SF12 nach Morfeld et al. 2011), die Schlafqualität (PSQI nach Buysse et al. 1989), der Chronotyp (D-MEQ nach Griefahn et al. 2001), die Gestresstheit (PSS nach Cohen et al. 1983) und die Depressivität (PHQ9 nach Kroenke et al. 2001) abgefragt. Diese Daten dienen der Kontrolle und der Vergleichbarkeit mit anderen Studienergebnissen.

3 Ergebnisse und Diskussion

In der folgenden Grafik ist links die Konzentrationsleistung des D2R-Tests über die sechs Versuchszeitpunkte des ersten Tages aufgetragen. Bis zum dritten Testzeitpunkt ist ein signifikanter Anstieg der Konzentrationsleistung vorhanden (lineares Modell mit Messwiederholung, $p = 0.000$). Danach sind keine signifikanten Unterschiede mehr feststellbar (lineares Modell mit Messwiederholung, $p > 0.05$). Für einzelne Versuchsteilnehmer fällt die Konzentrationsleistung zum letzten Versuchszeitpunkt sogar wieder ab. Eine Versuchsdauer von einer Stunde ist in diesem Fall ausreichend, da nicht mehr als zwei Tests als Lernkurve verworfen werden müssen. Aus den Tests 3 und 4 wird dann der Mittelwert gebildet.

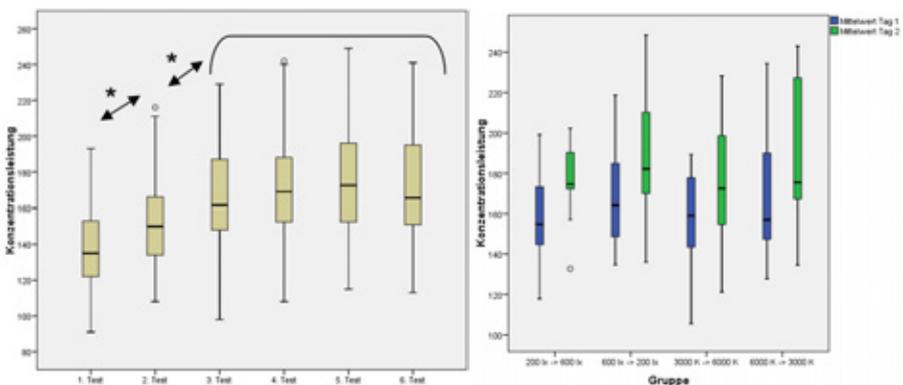


Abb. 2: links: Verlauf der Konzentrationsleistung über die Testzeitpunkte, * signifikanter Unterschied, rechts: Konzentrationsleistung für die beiden Versuchstage und die vier Gruppen

Vergleicht man den ersten Versuchstag mit dem zweiten Versuchstag wie in Abb. 2 rechts, fällt auf, dass die Konzentrationsleistung am zweiten Tag signifikant weiter zunimmt (lineares Modell mit Messwiederholung, $p = 0.000$). Dabei hat die Reihenfolge der Beleuchtung, von hell zu dunkel bzw. warm zu kalt oder andersrum, keinen Einfluss (lineares Modell mit Messwiederholung, $p = 0.961$). Der Lerneffekt des D2R-Test könnte somit potentielle Effekte durch die Beleuchtung überlagern.

Daher werden in diesem Versuch die Gruppenergebnisse miteinander verglichen (Zwischensubjektvergleich). Dies hat den Nachteil, dass die interindividuelle Streuung deutlich stärkeren Einfluss hat. Die Anzahl der Probanden war hier mit 10 Personen pro Gruppe jedoch zu klein um signifikante Ergebnisse zu liefern (ANOVA, $p = 0.556$).

4 Ausblick

Der nächste Versuch wird daher mit einer größeren Probandenzahl und mit einem größeren Spektral- und Beleuchtungsstärkebereich gezielt die ipRGC-Zellen stimulieren. In diesem Versuch war die Altersgruppe sehr homogen und die Versuchspersonen vorwiegend Studierende, die u.a. durch Klausuren geübt sind, für eine gewisse Zeit sehr konzentriert zu arbeiten. Deshalb wird in einem weiteren Versuch auch eine ältere Altersgruppe mit einbezogen. Außerdem wird zwecks noch besserer Vergleichbarkeit ein auditiver Reaktionstest integriert.

Der D2R-Test eignet sich gut zur objektiven Messung der Konzentrationsleistung. Im Rahmen von wiederholten Tests z.B. unter verschiedenen Beleuchtungssituationen mit den gleichen Probanden ist aufgrund des Lerneffekts Vorsicht bei der Interpretation der Ergebnisse geboten.

Diese ersten Ergebnisse umfassen bisher nur die Konzentrationsleistung des D2R-Tests. Im Rahmen des NiviL Projekts befinden sich weitere Untersuchungen bezüglich der subjektiven Messgrößen wie die subjektive Aufmerksamkeit, das Wohlbefinden und die Akzeptanz der Beleuchtung in Arbeit. In den Studien wird ein besonderer Schwerpunkt auf individuelle Faktoren wie Gesundheit, Chronotyp oder Stress gelegt, die über die umfangreichen Kontrollfragebögen bereits abgedeckt sind. Weitere Untersuchungen dahingehend können leicht nachträglich ergänzt werden.

Danksagung

Diese Forschungsarbeit wurde mit finanzieller Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungsprojekts Nicht-visuelle Lichtwirkungen – NiviL (Förderkennzeichen: 13N13398) durchgeführt.



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Literaturverzeichnis

- Åkerstedt, Torbjörn; Gillberg, Mats (1990): Subjective and Objective Sleepiness in the Active Individual. In: *Int J Neurosci* 52 (1-2), S. 29–37. DOI: 10.3109/00207459008994241.
- Andrews, Frank M.; Withey, Stephen B. (1976): Social indicators of well-being: Americans' perception of quality of life. In: *The Management Group*.
- Barkmann, Claus; Wessolowski, Nino; Schulte-Markwort, Michael (2012): Applicability and efficacy of variable light in schools. In: *Physiology & behavior* 105 (3), S. 621–627. DOI: 10.1016/j.physbeh.2011.09.020.
- Brickenkamp, R.; Schmidt-Atzert, L.; Liepmann, D. (2010): Test d2 - Revision, Aufmerksamkeits- und Konzentrationstest. Göttingen: Hogrefe.
- Buysse, Daniel J.; Reynolds Iii, Charles F.; Monk, Timothy H.; Berman, Susan R.; Kupfer, David J. (1989): The Pittsburgh sleep quality index: A new instrument for psychiatric practice and research. In: *Psychiatry Research* 28 (2), S. 193–213. DOI: 10.1016/0165-1781(89)90047-4.
- Chang, Anne-Marie; Santhi, Nayantara; St Hilaire, Melissa; Gronfier, Claude; Bradstreet, Dayna S.; Duffy, Jeanne F. et al. (2012): Human responses to bright light of different durations. In: *The Journal of Physiology* 590 (Pt 13), S. 3103–3112. DOI: 10.1113/jphysiol.2011.226555.
- Cohen, Sheldon; Kamarck, Tom; Mermelstein, Robin (1983): A Global Measure of Perceived Stress. In: *Journal of Health and Social Behavior* 24 (4), S. 385–396.
- Gramm, Stefan (2015): Energieeffiziente Beleuchtung unter Berücksichtigung von Tageslicht und verschiedenen Nutzeranforderungen. Technische Universität Berlin.
- Griefahn, Barbara; Kunemund, Christa; Brode, Peter; Mehnert, Peter (2001): Zur Validität der deutschen Übersetzung des Morningness-Eveningness-Questionnaires von Horne und Ostberg. The Validity of a German Version of the Morningness-Eveningness-Questionnaire Developed by Horne and Ostberg. In: *Somnologie* 5 (2), S. 71–80. DOI: 10.1046/j.1439-054X.2001.01149.x.
- Keis, Oliver; Helbig, Hannah; Streb, Judith; Hille, Katrin (2014): Influence of blue-enriched classroom lighting on students' cognitive performance. In: *Trends in Neuroscience and Education* 3 (3-4), S. 86–92. DOI: 10.1016/j.tine.2014.09.001.
- Kroenke, Kurt; Spitzer, Robert L.; Williams, Janet B. W. (2001): The PHQ-9. In: *J Gen Intern Med* 16 (9), S. 606–613. DOI: 10.1046/j.1525-1497.2001.016009606.x.
- Morfeld, M.; Kirchberger, I.; Bullinger, M. (2011): SF-36 Fragebogen zum Gesundheitszustand. Deutsche Version des Short Form-36 Health Survey 2, ergänzte und überarbeitete Version. Manual.[SF-36–German version of the Short Form-36 Health Survey 2, revised version. Manual]: Göttingen: Hogrefe Verlag.
- Shamsul, B.M.T.; Sia, C. C.; Ng, Y.G.; Karmegan, K. (2013): Effects of Light's Colour Temperatures on Visual Comfort Level, Task Performances, and Alertness among Students. In: *AJPHR* 1 (7), S. 159–165. DOI: 10.12691/ajphr-1-7-3.
- Smolders, Karin C.H.J.; de Kort, Yvonne A.W. (2014): Bright light and mental fatigue: Effects on alertness, vitality, performance and physiological arousal. In: *Journal of Environmental Psychology* 39, S. 77–91. DOI: 10.1016/j.jenvp.2013.12.010.
- Wandewalle, Gilles; Baletau, Evelyne; Phillips, Christophe; Degueldre, Christian; Moreau, Vincent; Sterpenich, Virginie et al. (2006): Daytime Light Exposure Dynamically Enhances Brain Responses. In: *Current Biology* 16 (16), S. 1616–1621. DOI: 10.1016/j.cub.2006.06.031.
- Wessolowski, Nino; Koenig, Heiko; Schulte-Markwort, Michael; Barkmann, Claus (2014): The effect of variable light on the fidgetiness and social behavior of pupils in school. In: *Journal of Environmental Psychology* 39, S. 101–108. DOI: 10.1016/j.jenvp.2014.05.001.

Der Einfluss von monochromatischem Licht auf Patienten mit einer Bipolar-I-Erkrankung im Vergleich zu gesunden Kontrollpersonen

Falk Wieland, Philipp Ritter, Arne Kalbreyer, TU Dresden

Problemstellung und Forschungsfragen

Im Rahmen des BMBF NivIL Projekts werden die Auswirkungen von rotem und blauem LED Licht auf den Melatoninspiegel und das EEG von Patienten mit einer Bipolar-I Erkrankung und gesunden Kontrollpersonen untersucht. 19 Frauen und 14 Männer mit einem mittleren Alter von 44 Jahren und einer diagnostizierten Bipolar-I-Störung nahmen an der Untersuchung teil. Die gesunde Vergleichsgruppe umfasste 36 Frauen und 21 Männer mit einem mittleren Alter von 39 Jahren.

Stand der Wissenschaft/Technik

1998 – Cajochen et al, „Evening administration of melatonin and bright light: Interactions on the EEG during sleep and wakefulness“

Ergebnisse: EEG Aktivität im Theta- und Alpha-Band wurde durch helles Licht vermindert
2014 – Okamoto, Marks S Rea und Mariana G Figueiro, „Temporal dynamics of EEG activity during short and long wavelenght light exposures in the early morning“

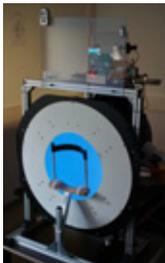
Ergebnisse: Kein signifikanter Haupteffekt für die Stärke der Alpha- und Theta-Wellen in Abhängigkeit von der Lichtbedingung

Forschungshypothesen

Die blaue Lichtbedingung (475 nm) führt zwischen 23.00 -23.30 Uhr zu einem signifikant stärkeren Anstieg der Vigilanz (Alpha- zu Theta-Wellen Verhältnis im EEG) im Vergleich zu rotem Licht (624 nm) mit gleicher Photonenzahl. Es wird eine erhöhte Melatoninunterdrückung bei den erkrankten Personen durch blaues Licht im Vergleich zu gesunden Kontrollen erwartet.

Versuchsaufbau

Für die Probanden begann der Versuchsabend um 18:00 Uhr und sie erhielten eine Standardmahlzeit, anschließend wurden die EEG Elektroden angelegt (C3, O1, F3, A2 sowie Cz und GND). Die Ableitung erfolgte mit 256 Hz Abtastrate mittels eines Somnotouch Gerät von Somnomedics. Ab 20 Uhr wurde das Licht gedimmt (ca. 2 lux). Um 21Uhr erhielten die Probanden ein Mydriatikum, anschließend wurde mittels einer Augenklappe völlige Dunkelheit erzeugt. Blutproben für den Melatoninwert wurden um 21:00, 22:00, 23:00, 23:30 und 00:00 Uhr genommen. Musik hören und Hörbücher waren für die Probanden möglich, der Wachheitszustand wurde regelmäßig überprüft. Die Lichtexposition wurde von 23 bis 23:30 Uhr durchgeführt.



Die Photonenzahl betrug $1,6 \cdot 10^{13}$ Photonen pro Sekunde und cm^2 . Es wurden LEDs mit den Peakwellenlängen von 475 nm (blau) und 624 nm (rot) genutzt, es ergeben sich Helligkeiten am Auge des Probanden von 8 lux für blau und 9,2 lux für rot

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Aufgrund der sehr großen Datenmenge war eine Auswertung der Melatoninkonzentrationen und EEG Daten bis zum Zeitpunkt der Einreichung der Beiträge nicht möglich.

Influence of monochromatic light on people with bipolar affective disorder in comparison to healthy subjects

Falk Wieland, Philipp Ritter, Arne Kalbreyer, TU Dresden

Research issue

Funded within the BMBF NivL Project, this study aims to investigate the effects of red and blue light on people with bipolar affective disorder (19 women, 14 men, mean age 44 years) in comparison to healthy participants (36 women, 21 men, mean age 39 years).

State of science/technology

1998 – Cajochen et al, „Evening administration of melatonin and bright light: Interactions on the EEG during sleep and wakefulness“

Findings: EEG activity in theta and alpha range is suppressed under bright light

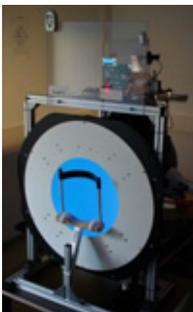
2014 – Okamoto, Marks S Rea und Mariana G Figueiro, „Temporal dynamics of EEG activity during short and long wavelength light exposures in the early morning“

Findings: no significant difference on EEG alpha and beta power levels within different light conditions

Research hypotheses

For the blue light condition melatonin suppression in people with bipolar affective disorder is stronger than in healthy subjects. Blue light administered between 11:00 and 11:30 pm leads to raised alertness (theta to alpha power ratio) in comparison to the red light condition for all participants.

Experimental set-up



All participants start the experiment at 6 pm and get an average meal. The EEG is initialized (C3, O1, F3, A2, Cz and GND electrodes) and with a Sampling rate of 256 Hz. Lights are switched off at 8 pm. At 9 pm participants pupils are being dilated and eyepatches are applied to create complete darkness. Listening to music is allowed, wakefulness is controlled every 15 minutes. Blood samples for the measuring of melatonin are taken at 9 pm, 10 pm, 11 pm, 11:30 pm and 00:00. The Light condition starts at 11 pm and lasts for 30 minutes. Number of photons is $1,6 \cdot 10^{13}$ per second and cm^2 . LEDs with peak wavelength of 475 nm (blue) und 624 nm (red) are used, Full Width at Half Maximum is 25 nm (red) and 18 nm (blue). This creates light levels of 8 lux for blue and 9,2 lux for red at eye level of the participant.

Results in comparison with previous findings

No results are available at the time of submission due to the large amount of data collected.

Der Einfluss von monochromatischem Licht auf Patienten mit einer Bipolar-I-Erkrankung im Vergleich zu gesunden Kontrollpersonen

Falk Wieland, Philipp Ritter, Arne Kalbreyer

TU-Dresden Leistungselektronik, TU Dresden Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie, TU Dresden Leistungselektronik

falk.wieland2@tu-dresden.de, philipp.ritter@uniklinikum-dresden.de

Zusammenfassung

Im Rahmen des BMBF NivIL Projekts werden die Auswirkungen von rotem und blauem LED-Licht auf den Melatoninspiegel und das EEG von Patienten mit einer diagnostizierten Bipolar-I-Erkrankung und gesunden Kontrollpersonen untersucht. Im Beitrag wird der Versuchsaufbau, Probandenauswahl und die geplante Datenauswertung der EEG Daten diskutiert. Aufgrund der sehr großen Datenmenge war eine Auswertung der Melatoninkonzentrationen und EEG Daten bis zum Zeitpunkt der Einreichung der Beiträge nicht möglich.

1 Problemstellung, Stand der Technik und Forschungshypothesen

In vorhergehende Studien konnte der Nachweis gebracht werden, dass durch nächtliche Lichtexposition die Aufmerksamkeit erhöht wird. Helles, weißes Licht (mehr als 2000 Lux am Auge) reduziert die Schläfrigkeit, erhöht die Aufgabenausführungsgeschwindigkeit, erhöht Körpertemperatur und Herzfrequenz, reduziert die niederfrequenten (Theta und Alpha) Hirnströme, erhöht die Hochfrequenz- (Beta) Anteile der Hirnströme und unterdrückt die Melatoninausschüttung ((1), (2), (3), (4), (5), (6)). Einige Studien zeigen, dass eine Erhöhung der Aufmerksamkeit bei Lichtexposition sehr stark von der Melatoninunterdrückung abhängig ist. ((5), (7)). Die nächtliche Melatoninunterdrückung bei gesunden Menschen kann durch kurzweiliges Licht verhindert werden. ((8), (9)), allerdings ist in (10) kein Unterschied zwischen rotem und blauem Licht nach einer Dunkelphase im EEG sichtbar geworden.

Bei Patienten mit einer Bipolar I Erkrankung wird vermutet, dass die Auswirkungen von Licht auf den Melatoninspiegel am Abend im Vergleich zu gesunden Kontrollpersonen sehr viel stärker sind ((11), (12), (13), (14)).

Problematisch an den meisten zitierten Studien ist, dass das genaue Lichtspektrum unklar, die im Auge ankommende Lichtdosis durch unterschiedliche Pupillengrößen unterschiedlich oder auch die Probandenzahl sehr gering ist.

In einem Teilprojekt des BMBF NivIL Forschungsvorhabens werden die Auswirkungen von rotem und blauem LED Licht auf den Melatoninspiegel und das EEG bei Patienten mit einer Bipolar I Erkrankung und gesunden Kontrollen untersucht. Als Vergleichskriterium dient eine Dunkelbedingung. Es wurden die zuvor genannten Probleme berücksichtigt und eine möglichst gute Dokumentation der Lichtmenge, Spektrum und eine hohe Fallzahl angestrebt.

Es wird erwartet, dass die blaue Lichtbedingung (475 nm) zu einem signifikant stärkeren Anstieg der Wachheit (Alpha- zu Thetawellen Verhältnis bzw. Anstieg der Beta-Aktivität im EEG) im Vergleich zu rotem Licht (624 nm) mit gleicher Photonenzahl bei allen Probanden führt. Gleichzeitig wird eine erhöhte Melatoninunterdrückung bei den erkrankten Personen im Vergleich zu gesunden Kontrollen erwartet.

2 Versuchsaufbau und Durchführung

Versuchsaufbau

Für den Versuch wurden Halbkugeln mit 50 cm Innendurchmesser und Bariumsulfatbeschichtung innen beschafft. An diese Halbkugeln wurden vier eigens angefertigte LED-Platinen (Abbildung 1) von innen an eine Blende mit Innenlochdurchmesser 30 cm geschraubt (Abbildung 3). Auf den LED-Platinen sind LEDs mit den Farbspektren in Abbildung 2 aufgebracht, für den Versuch wird aber nur rot und blau benötigt.

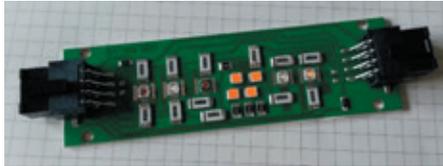


Abbildung 1 Aluminiumkern-Platine mit blau, amber, 2000K weiß und photo-rot LEDs.

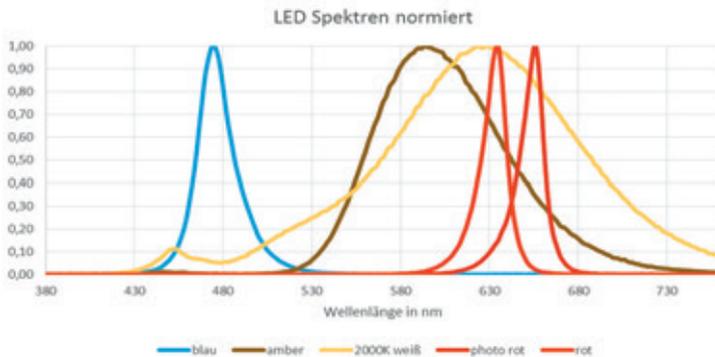


Abbildung 2 Farbspektren der LEDs auf der LED-Platine

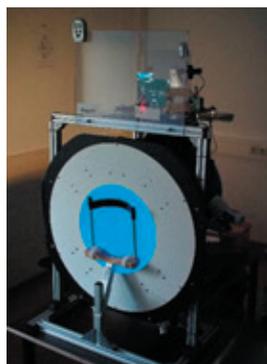
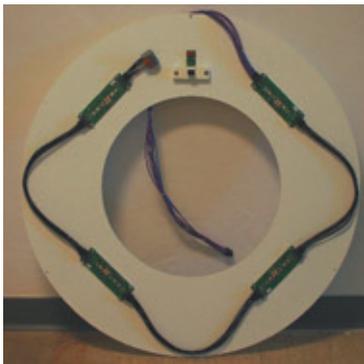


Abbildung 3 links: Innenseite der Blende mit den LED-Platinen und dem Farbsensor; rechts Halbkugel im Einsatz

Die LEDs werden durch eigens entwickelte Stromquellen (Abbildung 4) mit einem Konstantstrom betrieben. Die Stromstärke ist in einem sehr weiten Bereich per Analog und PWM Signal einstellbar. Maximal kann pro LED-Kanal eine LED-Reihenschaltung mit einem Strom von 3 A bei einer maximalen Spannung von 45 V betrieben werden. 6 Kanäle sind möglich und frei konfigurierbar. Die Stromwelligkeit beträgt bei 5 mA Ausgangsstrom ca. 5 %

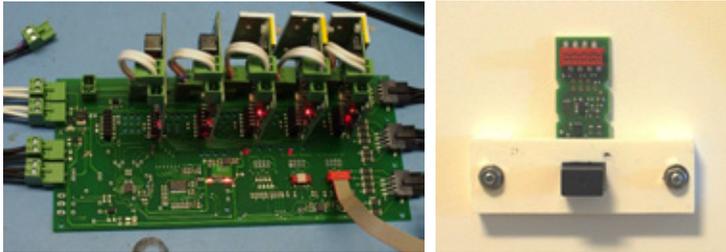


Abbildung 4 : links: eigens entwickelte Stromquellen für die LED Platinen; rechts: Mazet True Color Farbsensor montiert in der Kugel

Die Regelung der Stromquellen erfolgt durch einen Microcontroller vom Typ ATmega328P. Dieser liest einen in der Kugelblende montierten Mazet True Color Farbsensor (Abbildung 4) aus und regelt die Helligkeit der einzelnen LEDs auf einen für jedes Lichtszenario fest eingestellten Sollwert. Im aktuellen Versuch wurde pro Szenario nur eine LED genutzt, insofern wurde nur der jeweils passende Tristimuluswert des Farbsensors genutzt. Im Display wird dem Bediener das aktuelle Szenario und die Rückmeldung, ob die Helligkeit in der Kugel dem definierten Wert entspricht, angezeigt.

Durch die Regelung können LED Helligkeitsschwankungen sehr gut ausgeglichen werden und die Helligkeit in der Kugel ist an jedem Untersuchungstag konstant, eine ständige Kontrolle ist nicht nötig (Abbildung 5).

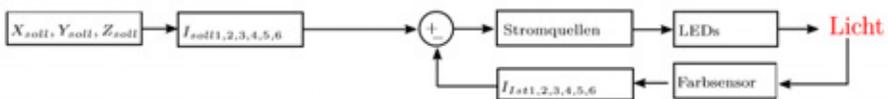


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Helligkeits- /Farbregelung in der Kugel

Photonenzahl

Um die Bestrahlungsstärken für die Untersuchung festzulegen, wurden aus der Kurve in Quelle (9), Abbildung 2B der Wert für 40% Melatoninunterdrückung abgelesen, es ergeben sich für eine Wellenlänge von 472 nm die Photonenzahl von rund $1,6 \cdot 10^{13}$ Photonen pro Sekunde und cm^2 . Der Wert wurde gewählt um einen Unterschied zwischen den gesunden Kontrollen und den Patienten messen zu können. Dies ist im Bereich der Sättigung (60-70% Melatoninunterdrückung) nicht möglich.

Umgerechnet auf die LEDs mit den Peakwellenlängen von 475 nm (blau, Halbwertsbreiten 25 nm) und 624 nm (rot, Halbwertsbreite 18 nm) entspricht diese Photonenzahl Helligkeiten am Auge des Probanden von 8 lux für blau und 9,2 lux für rot.

Studienteilnehmer und Rekrutierung:

Hundertsechzehn Probanden besuchten eine erste Visite in der Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie am Universitätsklinikum Carl Gustav Carus in welcher sie ein Strukturiertes Klinisches Interview zur Diagnostik psychischer Störungen durchlaufen. Eine augenärztliche Untersuchung zur Überprüfung des Farbsehvermögens, der Linsen trübung und eine Retinoskopie wurde durchgeführt.

Tab. 1: Anzahl der Probanden in der Studie

	gesamt	weiblich			männlich		
		Anzahl	Mittelwert Alter	Standard- abweichung Alter	Anzahl	Mittelwert Alter	Standard- abweichung Alter
gescreent	116	71	40,7	10,6	45	40,8	10,0
eingeschlossen	92	56	39,0	10,8	36	41,2	9,6
davon Bipolar I	35	20	41,5	12,0	15	45,6	9,5
gesunde Kontrollen	57	36	40,4	10,3	21	38,1	8,4
Alle Messnächte absolviert	90	55	41,0	10,8	35	41,2	9,7
davon Bipolar I	33	19	42,2	11,9	14	45,8	9,9
gesunde Kontrollen	57	36	40,4	10,3	21	38,1	8,4

Gesunde Kontrollprobanden wurden über Aushänge rekrutiert. Patienten mit einer Bipolar I Störung wurden über die Bipolar Spezialsprechstunde der Institutsambulanz der Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie am Universitätsklinikum Carl Gustav Carus Dresden und über weitere PIAs der Kliniken mit Versorgungsauftrag im Raum Dresden rekrutiert. Potentielle Probanden wurden für die Screening-Untersuchung kontaktiert und nach umfassender Aufklärung über die Studie um ihr Einverständnis zur Teilnahme gebeten.

Einschlusskriterien:

allgemeine Einschlusskriterien: Alter 21-55 Jahre, euthyme Stimmungslage (YMRS \leq 7 und MADRS \leq 7), sprachliche und geistige Fähigkeit die Studienanforderungen zu erfüllen, Einwilligung in die Studie nach umfassender Aufklärung,

spezifische Einschlusskriterien für die Patientengruppe:

gesicherte Diagnose einer Bipolaren Störung Typ I anhand SKID I (Structured Clinical Interview for DSM IV),

spezifische Einschlusskriterien für gesunde Kontrollprobanden:

keine psychiatrische Störung außer Anpassungsstörung in Vollremission, keine Verwandten ersten oder zweiten Grades mit einer psychiatrischen Störung aus den Bereichen F2x.x, F3x.x oder F4x.x

Ausschlusskriterien:

Abhängigkeit von illegalen Drogen oder Alkohol, somatische Erkrankungen die die Schlafqualität erheblich beeinflussen, Autoimmun- oder chronisch entzündliche Erkrankungen und neoplastische Erkrankungen, Diabetes mellitus, Psychiatrische Diagnosen aus Bereichen F0x.x und F2x.x, PTBS und emotional-instabile Persönlichkeitsstörung, sowie andere schwere Persönlichkeitsstörungen und psychiatrische Erkrankungen, die die Durchführbarkeit der Studie gefährden (Ausschluss per Durchführung eines SKID I + II durch Facharzt); Ophthalmologische Erkrankungen (Katarakt, Farbsinnstörungen (Achromasie, Farbenfehlsichtigkeit (Farbsehvermögen nach Ishihara-Farbsehtest), Medikation: Benzodiazepine, Zopiclon, Zolpidem, niedrigpotent Neuroleptika, Melatonin, Pregabalin, Gabapentin; Schwangerschaft; Schichtarbeit; Reise mit Zeitverschiebung >2 h in den letzten 2 Wochen

Randomisierung

Die Probanden werden zwei Lichtexpositionsszenarien- dunkel-rot-blau und dunkel-blau-rot zugeteilt um „carryover“-Effekte auszugleichen, die sich eventuell durch eine Exposition gegenüber einer der Wellenlängen ergeben könnte.

Die Randomisierung hinsichtlich der Reihenfolge der Expositionsbedingungen erfolgt mittels Block-Randomisierung mit Blöcken der Größe 4.

Versuchsablauf

Die Probanden wurden aufgefordert in den sieben Tagen vor der Visite einen regelmäßigen Schlaf-Wach-Rhythmus mit mindestens 7 Std Schlaf pro Nacht und Aufstehenszeit nicht später als 7:30 Uhr einzuhalten. Am Untersuchungstag sollte keine Kaffee-/Alkoholaufnahme nach 13:00 Uhr mehr stattfinden.

Die Probanden erschienen um 18:00 Uhr im Studienlabor und erhielten um 19:00 eine einheitliche Mahlzeit. Um 20:00 Uhr wurde ein peripherer Venenverweilkatheter gelegt, der Blutentnahmen zu den Zeitpunkten 21:00, 22:00, 23:00, 23:30 und 0:00 Uhr gewährleistete. Die EEG Elektroden wurden angelegt und um 21:00 Uhr wurde das Zimmer abgedunkelt, wobei die maximal zulässige Lichtintensität 2 Lux betrug. Zusätzlich erhielten die Probanden eine lichtdichte Augenmaske und es erfolgte die Applikation des Mydratikums Tropicamid (1 Tropfen (5mg/1ml)/Auge). Musik hören und Hörbücher waren möglich, der Wachheitszustand wurde regelmäßig überprüft. Zwischen 23:00 Uhr und 23:30 Uhr fand die Licht- (die Augenmaske wird abgenommen) bzw. Dunkel-Exposition (die Augenmaske bleibt aufgesetzt) statt. Die Probanden saßen nach der Lichtexposition bis zu Ihrer Entlassung mit Augenmaske in Dunkelheit.

EEG Ableitung

Die Ableitung erfolgte mit 256 Hz Abtastrate mittels eines Somnotouch© Gerät von Somnomedics©. Die Elektroden C3, O1, F3, A2 sowie Cz (Referenz) und GND wurden entsprechend dem 10-20 System mit Goldnapfelektroden abgeleitet. Der Beginn und das Ende der Lichtexposition wurde an den EEG Geräten durch einen Tastendruck als Marker gespeichert.

EEG Auswertung

Alle EEGs wurden visuell auf Schlaf untersucht und selbiger markiert. Die EEG Daten wurden aus der Domino Light Software in das EDF Format exportiert. Anschließend erfolgte die weitere Auswertung der Daten in Matlab

Ein EEG Segment wird mit 1024 Datenpunkten, dies entspricht 4 Sekunden bei 256 Hz, Abtastrate, definiert. Folgende EEG Segmente wurden als „schlecht“ markiert

- vor 22 Uhr liegend
- mit Schlaf markiert
- maximaler Amplitudenwert im Segment größer 80mV
- Artefakte wurden als solche definiert, wenn die maximale Amplitude im Segment größer ist als die laufende, gemittelte maximale Amplitude über 100 Segmente plus 2 mal die Standardabweichung der maximalen Amplitude über 100 Segmente. Die gefundenen „schlechten“ Segmente wurden markiert, und die Suche begann erneut. Dieser Auswahlprozess konvergiert und wurde wiederholt bis keine „schlechten“ Segmente mehr gefunden worden.

Nach der „schlecht“ Markierung erfolgte eine Nullphasen zweite Ordnung Butterworth Filterung auf das gesamte EEG mit einem Tiefpass- (35 Hz) und Hochpassfilter (1 Hz). Anschließend wurden alle „schlechten“ Segmente aus dem Signal entfernt und die verbliebenen Segmente mit einer Hann-Funktion gefensterter. Es folgte die DFT Analyse jeweils über ein

Segment mit 1024 Datenpunkten. Es ist geplant die Leistungen in den Frequenzbändern Theta, Alpha, und Beta jeweils vor-, während- und nach der Lichtexposition in den 3 Varianten (dunkel, blau, rot) zu Vergleichen.

3 Ergebnisse

Aufgrund der sehr großen Datenmenge war eine Auswertung der Melatoninkonzentrationen und EEG Daten bis zum Zeitpunkt der Einreichung der Beiträge nicht möglich.

4 Literatur

1. **SS, Campbell and D, Dawson.**: Enhancement of nighttime alertness and. *Physiol Behav.* 48:317–320 1990.
2. **P, Badia, et al.** Bright light effects on body temperature, alertness, EEG and behavior. *Physiol Behav.* 50:583–588 1991.
3. **C, Cajochen, et al.** Evening administration of melatonin and bright light: interactions on the EEG during sleep and wakefulness. *J Sleep Res.* 7:145–157 1998.
4. **A, Daurat, et al.** Bright light during nighttime: effects on the circadian regulation of alertness and performance. *Biol Signal Recept.* 9:309–318 2000.
5. **C, Cajochen, et al.** Dose–response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human-alertness. *Behav Brain Res.* 115:75–83 2000.
6. **Okamoto, Marks S Rea und Mariana G Figueiro.** Temporal dynamics of EEG activity during short and long wavelength light exposures in the early morning. *BMC Notes.* 7:113 2014.
7. **Figueiro MG, Bullough JD, Bierman A, Fay CR, Rea MS.** On light as an alerting stimulus at night. *Acta Neurobiol Exp.* 67:171–178 2007.
8. **GC, Brainard, JP, Hanifin and Greeson JM Byrne B, Glickman G, Gerner E, Rollag MD.** Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *J Neurosci.* 21:6405–6412 2001.
9. **K. Thapan, J. Arendt, D.J. Skene.** An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J Physiol.* 535:261–267 2001.
10. **MG, Figueiro, et al.** Preliminary evidence that both blue and red light can induce alertness at night. *BMC Neurosci.* 10:105 2009.
11. **Hallam KT, Begg DP, Olver JS, Norman TR.** Abnormal dose-response melatonin suppression by light in bipolar type I patients compared with healthy adult subjects. *Acta Neuropsychiatrica.* 21: 246–255 2009.
12. **Lewy AJ, Nurnberger JI Jr, Wehr TA et al.** Supersensitivity to light: possible trait marker for manic-depressive illness. *Am J Psychiatry.* 142:725–727 1985.
13. **Lewy AJ, Wehr TA, Goodwin FK, Newsome DA.** Manicdepressive patients may be supersensitive to light. *Lancet.* 1:383–384 1981.
14. **Nathan PJ, Burrows GD, Norman TR.** Melatonin sensitivity to dim white light in affective disorders. *Neuropsychopharmacology .* 21:408–413 1999.

Wirkung von dynamischer Beleuchtung auf Herzratenvariabilität und Wohlbefinden

*Sarah Kroetz, Oliver Stefani, Achim Pross
Visual Technologies, Fraunhofer IAO Stuttgart*

Problemstellung und Forschungsfragen

Der menschliche Tagesrhythmus synchronisiert sich mit dem Tageslicht. Tagsüber, wenn die Sonne scheint, sind wir aktiv und leistungsfähig, während wir nachts normalerweise schlafen. Dieser sogenannte circadiane Rhythmus lässt sich auch durch künstliches Licht, vor allem dessen kurzwelligigen Anteil, der die Ausschüttung des Nachthormons Melatonin unterdrückt, beeinflussen. Mit der vorliegenden Studie untersuchten wir die Wirkungen einer alternativen Beleuchtungsmöglichkeit mit dynamischer Helligkeitsänderung in Bezug auf Aktivierung, Leistungssteigerung, Herzratenvariabilität und Wohlbefinden.

Stand der Wissenschaft/Technik

In einer früheren Studie bevorzugten die Probanden dynamische Beleuchtung gegenüber statischem Licht. Sie fühlten sich danach wacher und beschrieben das dynamische Licht als abwechslungsreich und weniger eintönig.

Forschungshypothesen

Es wurde untersucht, inwiefern dynamisches Licht aktivierend wirken und welchen Einfluss sie auf das Wohlbefinden der Probanden haben. Da eine aktivierende Wirkung erwartet wurde, sollte demnach die Herzratenvariabilität geringer sein. Außerdem wurden eine Verringerung der Müdigkeit und ein gesteigertes Wohlbefinden der Probanden erwartet.

Versuchsaufbau

An einer RGBW-LED-Lichtwand wurden drei verschiedene Lichtszenarien über jeweils 9 Minuten abgespielt. Die Probanden saßen an einem Schreibtisch neben der Lichtwand und erhielten verschiedene Aufgaben und Fragebögen, die sie während den Lichtszenarien bearbeiteten. Es wurden zwei dynamische Lichtszenarien und ein statisches Lichtszenario getestet. Parallel dazu wurde mit einem Pulsgurt die Herzrate aufgezeichnet.

Ergebnisse

Der durchschnittliche Puls der Probanden war während dem statischen Lichtszenario geringer als während den beiden dynamischen Lichtszenarien. Dieser Unterschied konnte jedoch nur während der kreativen Tätigkeit nachgewiesen werden, während der die Probanden tendenziell entspannter waren. Ebenfalls während des Kreativtests konnte ein tendenziell höherer Wert des pNN50 während des statischen Szenarios nachgewiesen werden. Die weiteren Parameter der Herzratenvariabilität unterscheiden sich zwischen den einzelnen Lichtszenarien nicht signifikant. Das Wohlbefinden wurde mit dem Mehrdimensionalen Befindlichkeitsfragebogen evaluiert. Über die Dauer des Versuchs konnten keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Lichtszenarien festgestellt werden.

Effects of discernible illuminance changes on heart rate variability and well-being

Sarah Kroetz, Achim Pross, Oliver Stefani
Visual Technologies, Fraunhofer IAO Stuttgart

Research issue

Daylight is an important “Zeitgeber” to the human body. Artificial light, especially short wavelengths can activate humans at night and cause melatonin suppression. To avoid this effect, which is associated with an increased risk of cancer, this study introduces dynamic light scenarios designed to activate humans without an increased suppression of melatonin. We carried out tests for subjective sleepiness, concentration, creativity, heart rate variability and well-being while subjects were exposed to different light scenarios.

Related work

In an earlier study, subjects preferred dynamic lighting for creative work. After dynamic light exposure they felt more awake and described the light situation as more diversified and less monotonous. There is various research indicating that dynamic light has stronger activating effects on humans than static light.

Research hypothesis

We investigated effects of two dynamic and one static light scenario on heart rate variability and well-being. Referring to earlier studies we expected higher activation during dynamic light and therefore lower heart rate variability and less tiredness. We expected an increase in well-being during the dynamic light scenarios. Tests were carried out to investigate if subjects perform better in concentration and creativity tasks during dynamic light.

Experimental setup

36 subjects were exposed to all three lighting scenarios random order. They were sitting next to a 2.25 x 2.85 m LED light wall, similar to sitting next to a window. During each scenario subjects wore a Polar H7 heart rate sensor while doing the concentration task and the test for creative thinking. Afterwards they filled in the Karolinska sleepiness questionnaire and a multidimensional mood state questionnaire (MDMQ) for well-being.

Results in comparison with previous findings

Subjects had a higher average heart rate during both dynamic light scenarios than during the static light scenario. During the dynamic scenarios lower heart rate variability was detected, while subjects were performing the task for creative thinking. Results of the mood state questionnaire show no indication for diverging well-being of the subjects after the three scenarios or before the study. The three light scenarios had neither positive nor negative effects on the various categories of well-being.

Wirkung von dynamischer Beleuchtung auf Herzratenvariabilität und Wohlbefinden

*Sarah Kroetz, Achim Pross, Oliver Stefani
Visual Technologies, Fraunhofer IAO Stuttgart*

Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Studie werden die Wirkungen von zeitlich dynamischer Beleuchtung auf Herzratenvariabilität und Wohlbefinden der Probanden erforscht. Das dynamische Licht soll eine Alternative zur herkömmlichen statischen Beleuchtung sein. Da künstliches Licht während der Nacht oft mit Melatoninunterdrückung und deren Nachteile einhergeht, wird untersucht, ob dynamische Beleuchtung auch ohne veränderten Blauanteil aktivierend wirken kann. Dazu werden zwei unterschiedlich dynamische und ein statisches Lichtszenario verwendet, die von einer Lichtwand dargeboten werden. Die Ergebnisse der Herzratenvariabilität zeigen Hinweise auf eine erhöhte Aktivierung während den dynamischen Lichtszenarien. Die Befragung zum Wohlbefinden ergab keine Unterschiede zwischen dynamischer und statischer Beleuchtung.

Einleitung

Der Tagesrhythmus des menschlichen Körpers synchronisiert sich vor allem mit dem natürlichen Hell-Dunkel-Rhythmus (Aschoff 1981). Tagsüber, wenn die Sonne scheint, sind wir aktiv und leistungsfähig, während wir nachts normalerweise schlafen. Dieser sogenannte circadiane Rhythmus lässt sich durch künstliches Licht, vor allem dessen kurzwelligen Anteil, beeinflussen. Dieses helle Licht und vor allem dessen Blauanteil unterdrückt die Ausschüttung des Nachthormons Melatonin (Brainard 2001, Thapan 2001, Chellapa 2013). Ein gestörter Melatoninhaushalt kann schwerwiegende gesundheitliche Folgen haben, wie zum Beispiel Schlafstörungen, Konzentrationsprobleme oder ein erhöhtes Krebsrisiko (Blask et al. 1997, Stevens 2010). Jedoch wirkt helles Licht auch aktivierend und hält wach. Bei dynamischer Beleuchtung, also mit wechselnder Helligkeit, hat man erste Hinweise auf diese positiven Aspekte entdeckt (Stefani et al. 2012, Dehoff 2002). Eine Aktivierung der Probanden geschieht hierbei nicht durch zusätzliche Melatoninunterdrückung, sondern ist psychologischer Art.

Die vorliegende Studie wird durchgeführt, um herauszufinden, ob dynamische Beleuchtung eine Alternative zur Aktivierung durch Licht mit hohem Blauanteil sein könnte. Dazu werden zwei unterschiedlich dynamische und ein statisches Lichtszenario verwendet. Wie diese beiden Szenarien im Vergleich zu einer statischen Beleuchtung auf die Herzratenvariabilität wirken und welchen Einfluss sie auf das Wohlbefinden der Probanden haben, wird in dieser Arbeit untersucht.

Problemstellung und Forschungsfragen

Eine bisher noch nicht veröffentlichte Studie der Abteilung Visual Technologies des Fraunhofer IAO Stuttgart besteht aus Befragungen von Angestellten zur Lichtsituation am Arbeitsplatz (Scherer & Stefani 2015). Die Befragten gaben an, dass sie eine neutrale bis warme Beleuchtungssituation bevorzugen. Zusätzlich wünschten sie sich aber auch eine

aktivierende Wirkung des Lichts, um wacher und leistungsfähiger zu sein. Da warme Lichtfarben mit niedriger Farbtemperatur kaum blaues Licht enthalten ist eine Aktivierung durch den Blauanteil nicht so stark möglich wie bei hohen Farbtemperaturen und aufgrund der möglichen Nebenwirkungen in der Nacht nicht gewünscht. Ein Lösungsansatz dazu ist die dynamische Helligkeitsveränderung der Beleuchtung, um die Probanden zu beleben und deren Wachheit zu steigern. Mit den in dieser Studie verwendeten Tests werden die Wirkungen dynamischer Helligkeitsänderungen in Bezug auf Aktivierung, Leistungssteigerung, Herzratenvariabilität und Wohlbefinden untersucht.

Stand der Wissenschaft/Technik

In einer früheren Studie der Autoren bevorzugten die Probanden dynamische Beleuchtung gegenüber statischem Licht. Sie fühlten sich danach wacher und beschrieben das dynamische Licht als abwechslungsreich und weniger eintönig (Stefani et al. 2012). Ebenso gab es Hinweise von den Studienteilnehmern, dass sie bei kreativen Tätigkeiten die dynamisch wechselnde Beleuchtung und bei Arbeit, die Konzentration erforderte, die statische Beleuchtung bevorzugten.

Auch das Unternehmen Philips beschreibt die positiven Effekte des dynamischen Lichts: „Dynamisches Licht hilft, sich besser zu konzentrieren und leichter zu lernen“ (Philips 2015) sowie „dynamisches Licht erzeugt eine Atmosphäre, in der sich die Arbeiter besser konzentrieren und viele Aufgaben schneller und fehlerfreier ausführen können.“

Gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse zu dynamischen Lichtwechseln existieren vor allem zu circadianen, an den Tagesverlauf gekoppelte Dynamiken. Beispielsweise wurde in einer Langzeitstudie von Büroarbeitern dynamisches Licht im Vergleich zu statischem Licht untersucht. Die Beleuchtungsstärke wurde dabei zwischen 500 und 700 Lux, die Farbtemperatur zwischen 3000 und 4700 K verändert. Die Mitarbeiter waren mit dem dynamischen Licht subjektiv zufriedener als mit dem statischen (Kort & Smolders 2010).

Schnellere, sogenannte ultradiane, Lichtwechsel sind bisher wissenschaftlich kaum untersucht. Wenige Ausnahmen sind z.B. die Untersuchungen von Rimmer und Czeisler (Rimmer et al. 2000, Czeisler 2001) in welchen sehr stark wechselnde Beleuchtung zwischen Dunkelheit und hohen Beleuchtungsstärken von knapp 10.000 Lux im Vergleich zu kontinuierlicher Beleuchtung bei Nacht untersucht wurden. Das dynamische Licht hatte stärkere Effekte auf die Verschiebung der circadianen Rhythmik, obwohl die integrierten Lux-Stunden bei kontinuierlicher Beleuchtung deutlich höher waren. Die psychologische Wirkung von schnellen dynamischen Lichtwechseln am Tage wurde von Smolders et al. (Smolders et al. 2012) untersucht. Die Fragestellung lautete, ob bei gleicher mittlerer Lichtdosis dynamisches Licht im Vergleich zu statischem Licht unterschiedliche Auswirkungen auf die subjektive Müdigkeit, das Wohlbefinden und die Aufmerksamkeit haben. Sie konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede feststellen.

Forschungshypothesen

Wenn die Probanden dynamischem Licht ausgesetzt sind, wird erwartet, dass sie sich wacher fühlen und eine höhere kreative Leistung erbringen können. Bei dem schnell heller werdenden Szenario wird ein stärker aktivierender Effekt vermutet als bei dem schnell dunkel werdenden Lichtszenario. Wenn die Probanden aktiver und weniger müde sind, ist die Herzratenvariabilität (HRV) geringer. Außerdem wird ein gesteigertes Wohlbefinden

der Probanden durch die wechselnde Beleuchtung erwartet, da diese die Umgebung weniger eintönig erscheinen lässt. Bei der statischen Beleuchtung wird erwartet, dass die Probanden sich besser konzentrieren können und damit eine höhere Leistung im Konzentrationstest erbringen.

Versuchsaufbau

Für die Studie wurde eine RGBW-LED-Lichtwand aufgebaut, an der drei verschiedene Lichtszenarien mit einer Dauer von jeweils 9 Minuten abgespielt werden konnten. Die Probanden saßen an einem Schreibtisch neben der 2,25 m hohen und 2,85 m breiten Lichtwand wie neben einem Fenster. Zusätzlich zu den verwendeten Lichtszenarien war ein Teil des Oberlichts des fensterlosen Raums konstant eingeschaltet (Kaltkathodenröhren).

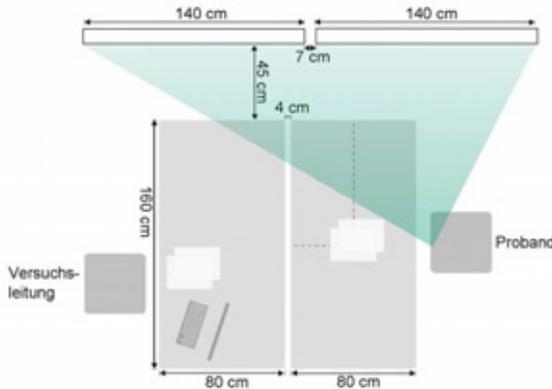


Abbildung 1: Versuchsaufbau der Lichtwand mit Tischen und Stühlen in Aufsicht

Es wurden zwei dynamische Lichtszenarien und ein statisches Lichtszenario getestet. Bei den zeitlich dynamischen Szenarien variierte die Beleuchtungsstärke auf dem Tisch des Probanden zwischen 690 und 880 Lux. Die mittlere Beleuchtungsstärke lag bei jedem Lichtszenario bei 770 Lux. Die Farbtemperatur des am Probandenauge ankommenden Lichts betrug im Mittel 5250 K bei den beiden dynamischen Szenarien und konstant 5300 K bei dem statischen Szenario. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Verlauf der Beleuchtungsstärke über die Dauer des Versuchs.

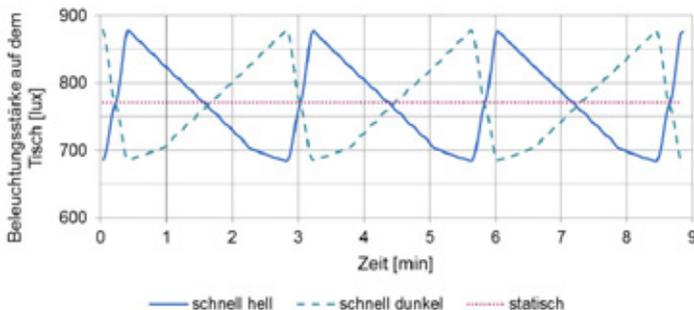


Abbildung 2: Veränderung der Beleuchtungsstärke der drei Lichtszenarien

Die dynamischen Lichtszenarien sind so konzipiert, dass der langsame Wechsel von hell nach dunkel, beziehungsweise umgekehrt nicht merkbar ist. Die schnelle Änderung der Helligkeit in die umgekehrte Richtung ist bei Blick auf die Lichtwand gut wahrnehmbar. Während den in randomisierter Reihenfolge angebotenen Lichtszenarien bearbeiteten die Probanden verschiedene Aufgaben und Fragebögen. Als Konzentrationstest wurde der Test d2, ein Durchstreichtest, durchgeführt und als Kreativitätstest der zeichnerische Test zum Schöpferischen Denken (TSD-Z). Parallel dazu wurde über die komplette Dauer des Versuchs die Herzrate mit einem handelsüblichen Pulsgurt (Polar H7) aufgezeichnet. Das Wohlbefinden wurde mit dem Mehrdimensionalen Befindlichkeitsfragebogen (MDBF) evaluiert, den die Probanden im Anschluss nach jedem Lichtszenario selbst ausfüllten. Die aufgeführten Tests wurden während jedem Lichtszenario 3 min 30 sec lang bearbeitet, so dass es Ergebnisse von jeder Tätigkeit, beziehungsweise von jedem Fragebogen für jedes Lichtszenario gibt.

Ergebnisse und Diskussion

Insgesamt haben 36 Probanden an der Studie teilgenommen. Die Herzratenvariabilität konnte aufgrund von lückenhaften Messungen oder chronischen Krankheiten nur bei 33 Versuchspersonen ausgewertet werden. Der durchschnittliche Puls der Probanden war während dem statischen Lichtszenario tendenziell geringer als während den beiden dynamischen Lichtszenarien. Die Werte des meanRR (durchschnittlicher Abstand der RR-Zacken) zeigen, dass während dem *statischen* Szenario der Puls signifikant niedriger ist als während *schnell dunkel* ($p = 0,01$) und tendenziell niedriger als während dem *schnell hellen* Szenario ($p = 0,06$). Dieser Unterschied konnte jedoch nur während der kreativen Tätigkeit (TSD-Z) nachgewiesen werden, während der die Probanden eher entspannter waren. Ebenfalls während des Kreativitätstests konnte, wie erwartet, ein tendenziell höherer Wert des pNN50 während des statischen Szenarios gegenüber den Werten während *schnell hell* ($p = 0,12$) und *schnell dunkel* ($p = 0,06$) aufgezeigt werden. Ein hoher pNN50 (hohe HRV) deutet auf einen hohen Parasympathikuseinfluss hin, also waren die Probanden während der statischen Beleuchtung entspannter und weniger aktiviert. Die weiteren Parameter der Herzratenvariabilität unterscheiden sich zwischen den einzelnen Lichtszenarien nicht signifikant.

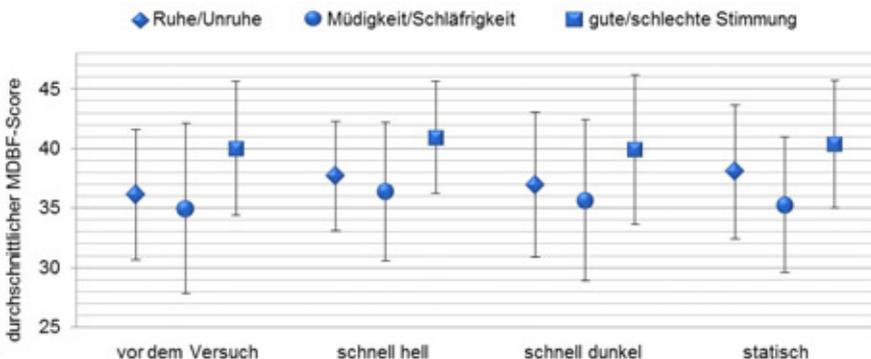


Abbildung 3: Durchschnittswerte des MDBF-Scores mit Standardabweichung für alle drei Kategorien und Lichtszenarien sowie vor dem Versuch

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse des MDBF. Es ist zu erkennen, dass sich die Mittelwerte der einzelnen Szenarien kaum von denen vor dem Versuch unterscheiden. Wie bereits oben beschrieben sind die geringen Unterschiede nicht signifikant, jedoch ist der MDBF-Score in keiner Kategorie durch kein Szenario niedriger geworden als vor dem Versuch, sondern tendenziell etwas höher. Somit wurde die subjektive Befindlichkeit der Probanden durch die Lichtszenarien nicht negativ beeinflusst.

Die Auswertung des Befindlichkeitsfragebogens hat zwischen den drei Szenarien in den drei Befindlichkeitskategorien Ruhe/Unruhe, Wachheit/Schläfrigkeit und gute/schlechte Stimmung keine Unterschiede ergeben. Die Ergebnisse der ANOVA in den einzelnen Kategorien sehen wie folgt aus: Ruhe/Unruhe ($p = 0,47$), Wachheit/Schläfrigkeit ($p = 0,47$), Gute/schlechte Stimmung ($p = 0,91$). Das heißt, durch keines der drei Lichtszenarien hat sich die Befindlichkeit der Probanden nachweisbar geändert. Möglicherweise war die Dynamik zu „rhythmisch“ um Unterschiede in der Wirkung der Lichtszenarien auf die Befindlichkeit zu messen. Deshalb werden zurzeit in einer nachfolgenden Studie Experimente zu zufälligen Lichtveränderungen auf die Leistungsfähigkeit, Befindlichkeit und HRV durchgeführt. Insgesamt war das Wohlbefinden der Probanden bei diesem Versuch jedoch sehr hoch, da ein hoher Wert in jeder Kategorie für eine gute Befindlichkeit steht und alle drei Kategorien immer mit Werten zwischen ca. 35 und 40 von maximal 48 erreichbaren Punkten bewertet wurden.

Die vorliegende Veröffentlichung ist Teil einer größeren Studie. Weitere Ergebnisse zur Wirkung der Lichtszenarien auf Konzentration, Kreativität und Müdigkeit der Probanden können in den Proceedings der CIE 2016 (Stefani et al. 2016) nachgelesen werden.

Quellen

Aschoff, J., King, F. A., Adler, N. T.: Biological Rhythms. New York, London: Plenum Press. (Handbook of behavioral neurobiology; 4)(1981)

Blask, D. E., Wilson, S. T., Zalatan, F.: Physiological Melatonin Inhibition of Human Breast Cancer Cell Growth in Vitro: Evidence for a Glutathione-mediated Pathway. *Cancer Research* (1997), S. 1909–1914.

Brainard, G. C. et al.: Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 21(16), (2016) S. 6405–6412.

Czeisler, C. A.: Evaluation of Intermittent Bright Light Exposure. FINAL REPORT. NASA (2001).

Chellappa, S. L., Steiner, R., Oelhafen, P., Lang, D., Götz, T., Krebs, J., Cajochen, C.: Acute exposure to evening blue-enriched light impacts on human sleep. *Journal of Sleep Research*, 22(5), (2013) S. 573–580.

Dehoff, P.: The impact of changing light on the well-being of people at work. Dornbirn, Austria (2002).

Kort, Y. de, Smolders, K: Effects of dynamic lighting on office workers: First results of a field study with monthly alternating settings. *Lighting Research and Technology*, 42(3), (2010) S. 345–360

PHILIPS: Dynamisches Licht in der Industrie.

http://www.lighting.philips.de/lightcommunity/trends/dynamic_lighting/dl_for_industry.wpd,
zuletzt geprüft am: 03.11.2015.

Rimmer, D. W. et al.: Dynamic resetting of the human circadian pacemaker by intermittent bright light. *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology*, 279(5), (2000) S. 9.

Scherer, M.; Stefani, O.: Umfrage bei Arbeitnehmern zur Zufriedenheit mit der Beleuchtung am Arbeitsplatz (unveröffentlicht). Stuttgart, Deutschland (2015).

Smolders, K., Antal, A., Corona, A., Heijboer, M., Keyes, E., Pollmann, K., Kort, Y. de: Fact or fiction? Testing effects of suggested illuminance changes: Eindhoven University of Technology (2012).

Stefani, O., Kroetz, S., Pross, A.: Effects of Discernible Illuminance Changes on Performance and Condition. *CIE Lighting Quality & Energy Efficiency* (2016)

Stefani, O., Pross, A., Mebben, S., Westner, P., Dudel, H., Rudolph, H.: Moving clouds on a virtual sky affect well-being and subjective tiredness positively (2012).

Stevens, R. G.: Artificial lighting in the industrialized world: circadian disruption and breast cancer. *Cancer causes & control* 17 (2006), S. 501–507.

Thapan, K., Arendt, J., and Skene, D. J.: An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *The Journal of Physiology*, 535(1) (2001) S. 261–267.

Die potentielle Bedeutung von Nahinfrarot-Strahlung für die Gesundheit von Auge und Haut

Alexander Wunsch, MLC

Problemstellung und Forschungsfragen

Die aktuelle Fokussierung auf energieeffiziente Beleuchtung hat zur Entwicklung nicht-thermischer Lichtquellen geführt, wobei der LED mittlerweile die größte Bedeutung zukommt. Im Gegensatz zu allen relevanten natürlichen Lichtquellen emittieren LEDs für die Allgemeinbeleuchtung praktisch keine Nahinfrarot-Strahlung. Im Vergleich dazu gibt die Sonne mehr als 40% ihrer gesamten Strahlungsenergie im Bereich zwischen 700 nm und 1400 nm ab. Obwohl Nahinfrarot-Strahlung definitionsgemäß nicht sichtbar ist, kann sie Wundheilung und zelluläre Regenerationsprozesse in menschlichem Gewebe fördern. Da sie praktisch ungehindert bis zur Netzhaut des menschlichen Auges vordringt, ist ein förderlicher Einfluss auf retinale Regenerationsprozesse möglich.

Stand der Wissenschaft/Technik

Zahlreiche mikrobiologische Studien belegen, dass optische Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 600 nm und 1400 nm einen signifikanten Einfluss auf zellulären Energiehaushalt, Proliferation, Differenzierung und Beweglichkeit haben. In klinischen Studien sowohl bei Tieren als auch Menschen konnte ein positiver Einfluss dieses Strahlungsbereiches auf Wundheilung, Geweberegeneration und sogar Heilung von Netzhautschäden demonstriert werden. Trotz dieser positiven Effekte von Nahinfrarot für die Augengesundheit finden diese Ergebnisse bislang keine nennenswerte Berücksichtigung bei CIE, ICNIRP und der Lichtindustrie.

Forschungshypothesen

Ultraviolette sowie kurzwellige und damit hochenergetische sichtbare Strahlung erzeugt zellulären Stress und induziert Sauerstoffradikalbildung in menschlichem Gewebe. Das ist insbesondere für Haut und Augen von Bedeutung, da diese kontinuierlich dem Umgebungslicht ausgesetzt sind. Die Rolle von Nahinfrarot-Strahlung für Photoprävention und Reduktion Gewebeschädigung und lichtinduziertem Zellstress wird diskutiert.

Versuchsaufbau

Es wurde eine umfassende Literatursuche in medizinischen Datenbanken durchgeführt und die Resultate in Hinblick auf ihre Relevanz bewertet.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Die zunehmende Anzahl von medizinischen Publikationen unterstützt die Hypothese, dass langwellige Strahlung im Spektralbereich zwischen 600 nm und 1000 nm einen bedeutenden Beitrag für Gewebe-Regeneration und -Reparaturvorgänge leisten kann. Die unterstützende Rolle dieses Strahlungsabschnittes verlangt nach weiteren Forschungen insbesondere in Hinblick auf ihre langfristige Bedeutung für Auge und Haut.

Potential relevance of near infrared radiation for ocular and dermal health

Alexander Wunsch, MLC

Research issue

The current focussing on energy efficient lighting led to the development of non-thermal light sources, with the LED leading the way. In contrast to all relevant natural light sources, LEDs for general lighting purposes provide almost zero emission in the spectral range longer than 700 nm. In contrast, sunlight emits more than 40 % in the near infrared region between 700 nm and 1400 nm. Although near infrared radiation (NIR) is invisible by definition, it contributes to wound healing and cellular regeneration processes in human tissue. Since near infrared radiation reaches the retina without significant attenuation by ocular tissue, it might foster retinal regeneration processes.

State of science/technology

Wavelengths between 600 nm and 1400 nm have significant impact on cellular energy levels, proliferation, differentiation and motility in microbiological trials. In clinical studies in animals and man, NIR promotes wound healing, tissue regeneration and even healing of retinal damage and an increasing role in regenerative photomedicine. In contrast, beneficial effects of NIR on ocular health are not sufficiently addressed and even ignored by CIE, ICNIRP and lighting industry.

Research hypothesis

Exposure to ultraviolet and high energy visible radiation induces cellular stress and free radical formation in human tissue, which is particularly important for continuously exposed organs like eyes and skin. The role of NIR for photoprevention and alleviation of light induced tissue stress and damage is discussed.

Experimental setup

A comprehensive literature search in medical databases was executed and the results were evaluated for relevance.

Results in comparison with previous findings

A growing body of publications in the medical field support the hypothesis that long wavelength radiation in the spectral range between 600 nm and 1000 nm can make a significant contribution to tissue regeneration and repair. The supportive role of this spectral range requires further investigation especially for eye and skin.

Wartungsfaktoren zur Planung von LED-Leuchten

Jörg Minnerup,
TRILUX GmbH & Co. KG
Heidestraße, 59759 Amsberg

Zusammenfassung

Für die Planung von Beleuchtungsanlagen mit LED-Leuchten gab es bisher im Gegensatz zu bisher eingesetzten Lampentechnologien keine allgemeinen Empfehlungen zur Ermittlung des Wartungsfaktors. Dieser Beitrag zeigt insbesondere für LED-Leuchten auf, welche Wartungsfaktoren aufgrund eines Konsens in der entsprechenden Normung verwendet werden können.

Tab. 1: Leuchtmittlichtstromwartungsfaktoren LLMF für unterschiedliche Betriebszeiten von LED-Leuchten verschiedener Lx-Einteilungen und unterschiedlichen mittleren Bemessungslebensdauern Lx.

LLMF-Fabelle mittlere Bemessungs- lebensdauer Lx	Betriebsdauer in 1000 h																					
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
L90	25.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88	0,86													
L90	30.000 h	1,00	0,98	0,97	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,87	0,85											
L90	40.000 h	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85								
L90	50.000 h	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85					
L90	60.000 h	1,00	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85		
L90	70.000 h	1,00	0,99	0,99	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87	0,86	0,86
L90	80.000 h	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88	0,88
L90	90.000 h	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89
L90	100.000 h	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90
L85	25.000 h	0,99	0,97	0,94	0,91	0,88	0,85	0,82	0,79													
L85	30.000 h	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,88	0,85	0,83	0,80	0,78											
L85	40.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	0,93	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,78								
L85	50.000 h	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,93	0,91	0,90	0,88	0,87	0,85	0,84	0,82	0,81	0,79	0,78					
L85	60.000 h	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79	0,78		
L85	70.000 h	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79
L85	80.000 h	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81
L85	90.000 h	1,00	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83
L85	100.000 h	1,00	0,99	0,99	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88	0,87	0,87	0,86	0,85
L80	25.000 h	0,99	0,96	0,92	0,88	0,84	0,80	0,76	0,72													
L80	30.000 h	0,99	0,97	0,93	0,90	0,87	0,83	0,80	0,77	0,73	0,70											
L80	40.000 h	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,88	0,85	0,83	0,80	0,78	0,75	0,73	0,70	0,68							
L80	50.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72	0,70					
L80	60.000 h	1,00	0,98	0,97	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,87	0,85	0,83	0,82	0,80	0,78	0,77	0,75	0,73	0,72	0,70		
L80	70.000 h	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,87	0,86	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79	0,77	0,76	0,74	0,73	0,71
L80	80.000 h	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79	0,78	0,76	0,75
L80	90.000 h	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,78
L80	100.000 h	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	
L75	25.000 h	0,99	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65													
L75	30.000 h	0,99	0,96	0,92	0,88	0,83	0,79	0,75	0,71	0,67	0,63											
L75	40.000 h	0,99	0,97	0,94	0,91	0,88	0,84	0,81	0,78	0,75	0,72	0,69	0,66	0,63								
L75	50.000 h	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,88	0,85	0,83	0,80	0,78	0,75	0,73	0,70	0,68	0,65	0,63					
L75	60.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88	0,85	0,83	0,81	0,79	0,77	0,75	0,73	0,71	0,69	0,67	0,65	0,63		
L75	70.000 h	1,00	0,98	0,96	0,95	0,93	0,91	0,89	0,88	0,86	0,84	0,82	0,80	0,79	0,77	0,75	0,73	0,71	0,70	0,68	0,66	0,64
L75	80.000 h	1,00	0,98	0,97	0,95	0,94	0,92	0,91	0,89	0,88	0,86	0,84	0,83	0,81	0,80	0,78	0,77	0,75	0,73	0,72	0,70	0,69
L75	90.000 h	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,93	0,92	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,83	0,82	0,81	0,79	0,78	0,76	0,75	0,74	0,72
L75	100.000 h	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79	0,78	0,76	0,75
L70	25.000 h	0,99	0,94	0,88	0,82	0,76	0,70	0,64	0,58													
L70	30.000 h	0,99	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55											
L70	40.000 h	0,99	0,96	0,93	0,89	0,85	0,81	0,78	0,74	0,70	0,66	0,63	0,59	0,55								
L70	50.000 h	0,99	0,97	0,94	0,91	0,88	0,85	0,82	0,79	0,76	0,73	0,70	0,67	0,64	0,61	0,58	0,55					
L70	60.000 h	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,88	0,85	0,83	0,80	0,78	0,75	0,73	0,70	0,68	0,65	0,63	0,60	0,58	0,55		
L70	70.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,61	0,59	0,57
L70	80.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	0,93	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,78	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,63
L70	90.000 h	1,00	0,98	0,97	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,87	0,85	0,83	0,82	0,80	0,78	0,77	0,75	0,73	0,72	0,70	0,68	0,67
L70	100.000 h	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,93	0,91	0,90	0,88	0,87	0,85	0,84	0,82	0,81	0,79	0,78	0,76	0,75	0,73	0,72	0,70

Maintenance factors for LED-Luminaires

Jörg Minnerup,
TRILUX GmbH & Co. KG
Heidestraße, 59759 Amsberg

Summary

For calculation of lighting systems with LED-Luminaires, there has been in counter-set to previously used lamp technologies no general recommendations for determining the maintenance factor. Based on a consensus in the relevant standardization this article shows in particular for LED lighting how maintenance factors can be used.

Tab. 1: LED lumen maintenance factor LLMF for different operating times of LED luminaires with different L_x graduations and different average rated lifetimes L_x

LLMF-Tabelle mittlere Bemessungs- lebensdauer L_x		Betriebsdauer in 1000 h																					
		1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
L90	25.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88	0,86														
L90	30.000 h	1,00	0,98	0,97	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,87	0,85												
L90	40.000 h	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85									
L90	50.000 h	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,87	0,86	0,85							
L90	60.000 h	1,00	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85				
L90	70.000 h	1,00	0,99	0,99	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	
L90	80.000 h	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87	0,86
L90	90.000 h	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89	
L90	100.000 h	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90		
L85	25.000 h	0,99	0,97	0,94	0,91	0,88	0,85	0,82	0,79														
L85	30.000 h	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,88	0,85	0,83	0,80	0,78												
L85	40.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	0,93	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,78									
L85	50.000 h	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,93	0,91	0,90	0,88	0,87	0,85	0,84	0,82	0,81	0,79	0,78						
L85	60.000 h	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,85	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79	0,78				
L85	70.000 h	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,78	
L85	80.000 h	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	
L85	90.000 h	1,00	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	
L85	100.000 h	1,00	0,99	0,99	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85		
L80	25.000 h	0,99	0,96	0,92	0,88	0,84	0,80	0,76	0,72														
L80	30.000 h	0,99	0,97	0,93	0,90	0,87	0,83	0,80	0,77	0,73	0,70												
L80	40.000 h	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,88	0,85	0,83	0,80	0,78	0,75	0,73	0,70	0,68								
L80	50.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72	0,70						
L80	60.000 h	1,00	0,98	0,97	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,87	0,85	0,83	0,82	0,80	0,78	0,77	0,75	0,73	0,72	0,70			
L80	70.000 h	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,87	0,86	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79	0,77	0,76	0,74	0,73	0,71	
L80	80.000 h	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79	0,78	0,76	0,75	
L80	90.000 h	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,78	
L80	100.000 h	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	
L75	25.000 h	0,99	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65														
L75	30.000 h	0,99	0,96	0,92	0,88	0,83	0,79	0,75	0,71	0,67	0,63												
L75	40.000 h	0,99	0,97	0,94	0,91	0,88	0,84	0,81	0,78	0,75	0,72	0,69	0,66	0,63									
L75	50.000 h	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,88	0,85	0,83	0,80	0,78	0,75	0,73	0,70	0,68	0,65	0,63						
L75	60.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88	0,85	0,83	0,81	0,79	0,77	0,75	0,73	0,71	0,69	0,67	0,65	0,63			
L75	70.000 h	1,00	0,98	0,96	0,95	0,93	0,91	0,89	0,88	0,86	0,84	0,82	0,80	0,79	0,77	0,75	0,73	0,71	0,70	0,68	0,66	0,64	
L75	80.000 h	1,00	0,98	0,97	0,95	0,94	0,92	0,91	0,89	0,88	0,86	0,84	0,83	0,81	0,80	0,78	0,77	0,75	0,73	0,72	0,70	0,69	
L75	90.000 h	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,93	0,92	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,83	0,82	0,81	0,79	0,78	0,76	0,75	0,74	0,72	
L75	100.000 h	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79	0,75	0,74	0,72	
L70	25.000 h	0,99	0,94	0,88	0,82	0,76	0,70	0,64	0,58														
L70	30.000 h	0,99	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55												
L70	40.000 h	0,99	0,96	0,93	0,89	0,85	0,81	0,78	0,74	0,70	0,66	0,63	0,59	0,55									
L70	50.000 h	0,99	0,97	0,94	0,91	0,88	0,85	0,82	0,79	0,76	0,73	0,70	0,67	0,64	0,61	0,58	0,55						
L70	60.000 h	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,88	0,85	0,83	0,80	0,78	0,75	0,73	0,70	0,68	0,65	0,63	0,60	0,58	0,55			
L70	70.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,61	0,59	0,57	
L70	80.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	0,93	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,63		
L70	90.000 h	1,00	0,98	0,97	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,87	0,85	0,83	0,82	0,80	0,78	0,77	0,75	0,73	0,72	0,70	0,68	0,67	
L70	100.000 h	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,93	0,91	0,90	0,88	0,87	0,85	0,84	0,82	0,81	0,79	0,78	0,76	0,75	0,73	0,72	0,70	

Wartungsfaktoren zur Planung von LED-Leuchten

Jörg Minnerup,
TRILUX GmbH & Co. KG
Heidestraße, 59759 Amsberg

Zusammenfassung

Für die Planung von Beleuchtungsanlagen mit LED-Leuchten gab es bisher im Gegensatz zu bisher eingesetzten Lampentechnologien keine allgemeinen Empfehlungen zur Ermittlung des Wartungsfaktors. Dieser Beitrag zeigt insbesondere für LED-Leuchten auf, welche Wartungsfaktoren aufgrund eines Konsens in der entsprechenden Normung verwendet werden können.

1 Einleitung

Die konkrete Aufstellung eines Wartungsplanes und die Ermittlung des Wartungsfaktors sind für Beleuchtungsanlagen von großer Bedeutung, da diese Maßnahmen unmittelbar einen erheblichen Einfluss auf den energetischen Bedarf von Beleuchtungsanlagen besitzen. Einige Jahre mussten Planer zur Bestimmung des Wartungsfaktors für Beleuchtungsanlagen mit LED-Leuchten auf individuelle Angaben der Hersteller insbesondere zum Verhalten von LED-Leuchtmitteln in ihren jeweiligen Leuchten zurückgreifen. Diese standen jedoch häufig für LED-Leuchten nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung. Hinzu kommt bis heute, dass eine große Zahl zum Teil neuer und beleuchtungstechnologiefremder Marktteilnehmer Produkte in den Markt geben, die ihren technischen Aussagen nicht entsprechen. Dies führte in den letzten Jahren zu einer Verunsicherung von Planern und Entscheidern, da im übertragenen Sinne „Äpfel und Birnen“ miteinander verglichen wurden. Um diese Unsicherheiten entgegenzuwirken, hat der Fachverband Licht im ZVEI e.V. eine entsprechende Schrift /1/ herausgegeben, die aktuell in der 2. überarbeiteten Auflage zur Verfügung steht. Diese beruht auf Inhalten aktueller IEC-Standards /2, 3/ und schafft durch so durch einheitliche Definition von Begriffen und Bewertungsverfahren eine Grundlage zur Vergleichbarkeit von LED-Leuchten. Leider konnten mit dem Dokument aus rechtlichen Gründen noch keine Wartungsfaktoren zur Planung von Beleuchtungsanlagen mit LED-Produkten publiziert werden. Aus diesem Grund bietet dieser Beitrag als Vorgriff auf eine anstehende LiTG-Publikation einen ersten Blick darauf, wie Wartungsfaktoren für eine Beleuchtungsanlage mit LED-Leuchten ermittelt werden können. Als Basis zur Ermittlung der dargestellten Wartungsfaktoren dient eine im Vorfeld durchgeführte umfangreiche Datenanalyse von LED-Produkten unterschiedlicher Art. Die hier dargestellten Daten können daher als typische Werte für LED-Produkte angesehen werden.

2 Anwendung von Wartungsfaktoren

Der Wartungsfaktor wird als das Verhältnis der mittleren Beleuchtungsstärke nach jeweils einer gewissen Benutzungsdauer einer Beleuchtungsanlage zu der mittleren Beleuchtungsstärke, die unter denselben Bedingungen der Anlage im Neuzustand vorhanden ist, definiert. Gleiches gilt für Betrachtungen der Leuchtdichte, wie sie häufig in der Straßenbeleuchtung vorgenommen wird.

Um den Wartungsfaktor zu ermitteln, werden Informationen über die Abnahme des Lichtstroms einer Beleuchtungsanlage bis zu einem gewählten Betrachtungszeitpunkt benötigt. Um diese zu ermitteln, sind Kenntnisse der entsprechenden Einflussgrößen auf den Wartungsfaktor notwendig. Die Definition des Wartungsfaktors und seiner bestimmenden Größen sind in Publikationen /4, 5/ der Internationalen Beleuchtungskommission CIE detailliert beschrieben. Folgende Wartungsfaktoren sind demnach aufgeführt:

- MF: Maintenance Factor (Wartungsfaktor)
- LLMF: Lamp Lumen Maintenance Factor (Lampenlichtstromwartungsfaktor)
(LED: Leuchtmittellichtstromwartungsfaktor)
- LSF: Lamp Survival Factor (Lampenüberlebensfaktor)
(LED: Leuchtmittelüberlebensfaktor)
- LMF: Luminaire Maintenance Factor (Leuchtenwartungsfaktor)
- RMF: Room Maintenance Factor (Raumwartungsfaktor)
- SMF: Surface Maintenance Factor (Oberflächenwartungsfaktor)

Innenbeleuchtung:

$$\mathbf{MF = (LLMF \times LSF) \times LMF \times RMF}$$

Außenbeleuchtung:

$$\mathbf{MF = (LLMF \times LSF) \times LMF (\times SMF)^*}$$

**Anmerkung: SMF wird dort verwendet, wo sachgemäß sinnvoll, zum Beispiel als Oberflächenwartungsfaktor einer angestrahlten Fläche oder zur Berücksichtigung der Verschmutzung der reflektierenden Oberflächen von Fußgängerunterführungen.*

Welche der einzelnen Wartungsfaktoren zur Ermittlung des Wartungsfaktors für die Beleuchtungsanlage zu berücksichtigen sind, hängt von der Art der Anlage und der Wartungsart (z. B. Gruppen- (inklusive LSF) oder Einzelwartung(exklusive LSF)) ab.

Nicht berücksichtigt wird in dieser Publikation der Ausfall von elektronischen Vorschaltgeräten zum Betrieb der LED-Komponenten. Im Juni 2016 wurden durch das ISO TC 274 „Licht und Beleuchtung“ jedoch erste formale Voraussetzungen geschaffen, eine neue Publikation für Wartungsfaktoren zu erarbeiten, in der dieser Punkt berücksichtigt werden könnte.

3 Ermittlung von Wartungsfaktoren

Für Leuchten mit konventionellen Leuchtmitteln (Lampen) können die Wartungsfaktoren einzeln ermittelt und dokumentiert werden. Bei derartigen Leuchten lassen sich der Lampenlichtstromwartungsfaktor (LLMF) und der Lampenüberlebensfaktor (LSF) auf die jeweils verwendeten Leuchtmittel beziehen. Für diese konventionellen Lampen sind einzelne Wartungsfaktoren von der CIE /4, 5/ veröffentlicht.

In LED-Leuchten werden LED-Module eingesetzt, die aus einzelnen oder mehreren LED-Chips bestehen können. Diese Module gelten als Lichtquellen einer LED-Leuchte. Zusammen mit deren thermischen und optischen Bauteilen (z. B. Kühlkörper bzw. Linsen oder Optiken) sind sie häufig fest mit dem Gehäuse der Leuchte verbunden, so dass sie

als eine Einheit gelten und die gesamte Leuchte als Lichtquelle anzusehen ist. Für diese Fälle kann für den LLMF nicht mehr der Begriff Lampenlichtstromwartungsfaktor sondern Leuchtmittellichtstromwartungsfaktor und für den LSF nicht mehr der Begriff Lampenüberlebensfaktor sondern Leuchtmittelüberlebensdauerfaktor gelten. LLMF und LSF beschreiben damit die unmittelbare Auswirkung des Lichtstroms aus der LED-Leuchte heraus, jedoch ohne Berücksichtigung deren Verschmutzung.

Durch die Verwendung von unterschiedlichen Anzahlen und Arten von LED-Modulen und LED-Chips werden diese leuchtenspezifisch individuell elektrisch verschaltet und mit einem elektronischen Vorschaltgerät (EVG) betrieben. Dieser eigentliche Betrieb der LED kann dabei hinsichtlich der Bestromung und der thermischen Auslegung für jeden LED-Leuchtentyp sehr unterschiedlich gestaltet sein. Hersteller von LED-Leuchten sollten daher neben dem Bemessungslichtstrom I_l und der Bemessungsleistung P_l auch eine mittlere Bemessungslebensdauer L_x $/1, 6/$ für ihre LED-Leuchtentypen angeben können, bei der der Lichtstrom zur angegebenen Lebensdauer auf einen Anteil x (in Prozent) des ursprünglichen Lichtstroms bezogen wird. Aus dieser Größe x wiederum kann direkt der Leuchtmittellichtstromwartungsfaktor LLMF zum Zeitpunkt der mittleren Bemessungslebensdauer L_x abgeleitet werden. Wird z. B. für die mittlere Bemessungslebensdauer einer LED-Leuchte der Kennwert L_{80} 50.000 h angegeben, ist daraus abzulesen, dass für lichttechnische Planungen mit diesem Leuchtentyp ein der LLMF von 0.80 nach 50.000 h verwendet werden kann. Dies bedeutet für Planungen mit kürzeren Betriebszeiten als die mittlere Bemessungslebensdauer, dass höhere Werte für den LLMF verwendet werden können. Die entsprechenden Kennwerte können aus Tabelle 1 entnommen werden. Dort sind für unterschiedliche Einstufungen von Leuchten L_{70} bis L_{90} mit unterschiedlichen mittleren Bemessungslebensdauern die entsprechenden Faktoren aufgeführt.

Die Hersteller können mit Hilfe der mittleren Bemessungslebensdauer sowie ihren Kenntnissen über eingesetzte Komponenten und des thermischen Verhaltens für ihr jeweiliges Produkt individuelle Verläufe des Lichtstroms und Ausfallwahrscheinlichkeiten (AFV) über die gewünschte Nutzungszeit bis zur mittleren Bemessungslebensdauer L_x angeben. Daher besteht grundsätzlich die Möglichkeit, individuelle Angaben zu den Wartungsfaktoren LLMF und LSF zu veröffentlichen. Oft ist es jedoch aufgrund nur geringster Abweichungen nicht notwendig, individuelle Werte für den Leuchtmittellichtstromwartungsfaktor (LLMF) und den Leuchtmittelüberlebensfaktor (LSF) anzugeben. Zudem gibt es Hersteller, die grundsätzlich keine Informationen zu Wartungsfaktoren ihrer Produkte anbieten. Häufig ist auch zum Zeitpunkt der Planung noch keine Produktauswahl getroffen, so dass auf allgemeine Faktoren zurückgegriffen werden kann. Vor diesen Hintergründen wird empfohlen, für lichttechnische Planungen die in Tabelle 1 und sofern Gruppenwechsel für Beleuchtungsanlagen vorgesehen sind auch die Kenndaten aus Tabelle 2 als Faktoren zur Bestimmung des Wartungsfaktors zu berücksichtigen.

Zur Bestimmung des Wartungsfaktors MF sind darüber hinaus die Faktoren LMF für die Verschmutzung der Leuchte sowie der RMF für die Verschmutzung des Raumes bzw. ggf. SMF für die Verschmutzung der Oberfläche zu berücksichtigen. Diese Werte sind jeweils der entsprechenden CIE Publikation $/4, 5/$ für die Innen- bzw. der Außenbeleuchtung zu entnehmen.

Die mittlere Bemessungslebensdauer L_{CLO} und damit die Ermittlung von Wartungsfaktoren für LED-Leuchten mit Konstantlichtstromtechnologie (CLO) ist gesondert zu betrachten. Die mittlere Bemessungslebensdauer L_{CLO} stellt die Lebensdauer dar, bis zu welcher der

Leuchtmittellichtstromwartungsfaktor LLMF derartiger LED-Leuchten konstant gehalten wird. Für die lichttechnische Planung bedeutet dies, dass der LLMF zur Bestimmung des Wartungsfaktors bis zur mittleren Bemessungslebensdauer L_{CLO} einen Wert von 1 besitzt. Dies wird dadurch erreicht, dass die LED-Leuchte zu Beginn nicht im Bereich ihrer maximal ausgelegten Kenndaten, sondern mit einer geringeren Leistung betrieben wird. Aus diesem Grund sind für Leuchten mit Konstantlichtstromtechnologie immer zwei Leistungskennwerte anzugeben, zum einen die direkt bei der Inbetriebnahme vorhandene Leistung der Leuchte und zum anderen die Leistung zum Zeitpunkt der mittleren Bemessungslebensdauer L_{CLO} .

Für LED-Lampen in Leuchten ist das Verhalten nach wie vor separat beschreibbar, jedoch ist darauf zu achten, dass sich das Verhalten von LED-Lampen durch den Einbau in Leuchten maßgeblich verändern wird. Ihr eigentliches Verhalten ist daher nicht auf die Leuchte übertragbar.

In diesem Beitrag werden in Tabelle 1 und 2 jedoch ausschließlich die Verhältnisse von LLMF und LSF für LED-Leuchten ohne Konstantlichtstromtechnologie betrachtet.

LLMF-Tabelle mittlere Bemessungs- lebensdauer L_x	Betriebsdauer in 1000 h																				
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
L90 25.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	C,92	0,90	0,88	0,86													
L90 30.000 h	1,00	0,98	0,97	0,95	C,93	0,92	0,90	0,88	0,87	0,85											
L90 40.000 h	1,00	0,99	0,98	0,96	C,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85								
L90 50.000 h	1,00	0,99	0,98	0,97	C,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85					
L90 60.000 h	1,00	0,99	0,98	0,98	C,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85		
L90 70.000 h	1,00	0,99	0,99	0,98	C,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	
L90 80.000 h	1,00	0,99	0,99	0,98	C,98	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88	0,88	0,88
L90 90.000 h	1,00	0,99	0,99	0,98	C,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89	
L90 100.000 h	1,00	1,00	0,99	0,99	C,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90
L85 25.000 h	0,99	0,97	0,94	0,91	C,88	0,85	0,82	0,79													
L85 30.000 h	1,00	0,98	0,95	0,93	C,90	0,88	0,85	0,83	0,80	0,78											
L85 40.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	C,93	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,78								
L85 50.000 h	1,00	0,99	0,97	0,96	C,94	0,93	0,91	0,90	0,88	0,87	0,85	0,84	0,82	0,81	0,79	0,78					
L85 60.000 h	1,00	0,99	0,98	0,96	C,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,85	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79	0,78			
L85 70.000 h	1,00	0,99	0,98	0,97	C,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	
L85 80.000 h	1,00	0,99	0,98	0,97	C,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79
L85 90.000 h	1,00	0,99	0,98	0,98	C,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,87	0,85	0,84	0,83	
L85 100.000 h	1,00	0,99	0,99	0,98	C,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,87	0,85	0,84	0,83
L80 25.000 h	0,99	0,96	0,92	0,88	C,84	0,80	0,76	0,72													
L80 30.000 h	0,99	0,97	0,93	0,90	C,87	0,83	0,80	0,77	0,73	0,70											
L80 40.000 h	1,00	0,98	0,95	0,93	C,90	0,88	0,85	0,83	0,80	0,78	0,75	0,73	0,79	0,68							
L80 50.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	C,92	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82	0,80	0,78	0,74	0,74	0,72	0,70					
L80 60.000 h	1,00	0,98	0,97	0,95	C,93	0,92	0,90	0,88	0,87	0,85	0,83	0,82	0,80	0,78	0,77	0,75	0,73	0,72	0,70		
L80 70.000 h	1,00	0,99	0,97	0,96	C,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,87	0,86	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79	0,77	0,76	0,74	0,73	0,71
L80 80.000 h	1,00	0,99	0,98	0,96	C,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79	0,78	0,76	0,75
L80 90.000 h	1,00	0,99	0,98	0,97	C,96	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,78
L80 100.000 h	1,00	0,99	0,98	0,97	C,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80
L75 25.000 h	0,99	0,95	0,90	0,85	C,80	0,75	0,70	0,65													
L75 30.000 h	0,99	0,96	0,92	0,88	C,83	0,79	0,75	0,71	0,67	0,63											
L75 40.000 h	0,99	0,97	0,94	0,91	C,88	0,84	0,81	0,78	0,75	0,72	0,69	0,66	0,62								
L75 50.000 h	1,00	0,98	0,95	0,93	C,90	0,88	0,85	0,83	0,80	0,78	0,75	0,73	0,70	0,68	0,65	0,63					
L75 60.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	C,92	0,90	0,88	0,85	0,83	0,81	0,79	0,77	0,73	0,71	0,71	0,69	0,67	0,65	0,63		
L75 70.000 h	1,00	0,98	0,96	0,95	C,93	0,91	0,89	0,88	0,86	0,84	0,82	0,80	0,78	0,77	0,75	0,73	0,71	0,70	0,68	0,66	0,64
L75 80.000 h	1,00	0,98	0,97	0,95	C,94	0,92	0,91	0,89	0,88	0,86	0,84	0,83	0,81	0,80	0,78	0,77	0,75	0,73	0,72	0,70	0,69
L75 90.000 h	1,00	0,99	0,97	0,96	C,94	0,93	0,92	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,83	0,82	0,81	0,79	0,78	0,76	0,75	0,74	0,72
L75 100.000 h	1,00	0,99	0,98	0,96	C,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79	0,78	0,76	0,75
L70 25.000 h	0,99	0,94	0,88	0,82	C,76	0,70	0,64	0,58													
L70 30.000 h	0,99	0,95	0,90	0,85	C,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55											
L70 40.000 h	0,99	0,96	0,93	0,89	C,85	0,81	0,78	0,74	0,70	0,66	0,63	0,59	0,57								
L70 50.000 h	0,99	0,97	0,94	0,91	C,88	0,85	0,82	0,79	0,75	0,71	0,67	0,64	0,61	0,58	0,55						
L70 60.000 h	1,00	0,98	0,95	0,93	C,90	0,88	0,85	0,83	0,80	0,78	0,75	0,73	0,70	0,68	0,65	0,63	0,60	0,58	0,55		
L70 70.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	C,91	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,76	0,74	0,70	0,68	0,66	0,64	0,61	0,59	0,57	
L70 80.000 h	1,00	0,98	0,96	0,94	C,93	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,75	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,63	0,61
L70 90.000 h	1,00	0,98	0,97	0,95	C,93	0,92	0,90	0,88	0,87	0,85	0,83	0,82	0,80	0,78	0,77	0,75	0,73	0,72	0,70	0,68	0,67
L70 100.000 h	1,00	0,99	0,97	0,96	C,94	0,93	0,91	0,90	0,88	0,87	0,85	0,84	0,82	0,81	0,79	0,78	0,76	0,75	0,73	0,72	0,70

Tabelle 1: Leuchtmittellichtstromwartungsfaktoren LLMF für unterschiedliche Betriebszeiten von LED-Leuchten verschiedener L_x -Einteilungen und unterschiedlichen mittleren Bemessungslebensdauern L_{CLO} .

LSF-Tabelle		Betriebsdauer in 1000 h																						
mittlere Bemessungslebensdauer L _x		1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100		
190	25.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97															
190	30.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,95														
190	40.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,95	0,91										
190	50.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,96	0,94	0,92								
190	60.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,96	0,94	0,92	C,89						
190	70.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,96	0,94	0,92	C,89	0,92	0,89	
190	80.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	C,98	0,96	0,94	0,91	
190	90.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,96	
190	100.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
185	25.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96															
185	30.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,94														
185	40.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,94	0,91										
185	50.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,95	0,93	0,91								
185	60.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,95	0,93	0,91	C,88	0,91	0,88	
185	70.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,95	C,93	0,91	0,88
185	80.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	C,97	0,95	0,91
185	90.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,96
185	100.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
180	25.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96															
180	30.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,96	0,93														
180	40.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,96	0,94	0,90										
180	50.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90							
180	60.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	C,87			
180	70.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,96	0,94	C,92	0,90	0,87
180	80.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	C,96	0,94	0,92
180	90.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,96	0,94
180	100.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
175	25.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96	0,93	0,90															
175	30.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,95	0,92													
175	40.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,95	0,92	0,87										
175	50.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,95	0,92	0,87	0,89	0,86						
175	60.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,95	0,92	0,89	0,86	C,82					
175	70.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,95	0,92	C,89	0,86	0,82	
175	80.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	C,95	0,92	0,89	0,86	
175	90.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,95	0,91	
175	100.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,95
170	25.000 h	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96	0,93	0,90	0,87															
170	30.000 h	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,90													
170	40.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,90	0,87										
170	50.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,91	0,90	0,87	0,84							
170	60.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,90	0,87	0,84	C,81				
170	70.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,90	0,87	0,84	C,81	0,84	0,81	
170	80.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	C,93	0,90	0,87	0,84	
170	90.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,90	0,87	
170	100.000 h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96

Tabelle 2: Leuchtmittelüberlebensfaktoren LSF für unterschiedliche Betriebszeiten von LED-Leuchten verschiedener L_x-Einteilungen und unterschiedlichen mittleren Bemessungslebensdauern L_x.

4 Konklusion

Erstmalig stehen umfassende allgemeingültige Kenndaten zur Ermittlung des Leuchtmittellichtstromwartungsfaktors LLMF und des Leuchtmittelüberlebensfaktors LSF zur Verfügung. Mit Hilfe dieser Kenndaten können für lichttechnische Planungen entsprechende Wartungsfaktoren ermittelt und angewendet werden. Dies hilft nicht nur den energetischen Bedarf von Beleuchtungsanlagen zu bestimmen, sondern auch, um entsprechende Wartungspläne zu erstellen, um die Qualität der geplanten Beleuchtungsanlage auch für den Betrieb und die Zukunft sicher zu stellen.

Weitere Ausführungen und Hinweise zum Thema „Wartungsfaktoren zur Planung von LED-Leuchten“ werden in einer Publikation der LiTG veröffentlicht. Das genaue Erscheinungsdatum ist noch nicht bekannt.

Literaturverzeichnis

- [1] ZVEI Leitfaden „Planungssicherheit in der LED Beleuchtung“, 2. überarbeitete Auflage 03/2016
- [2] IEC 62722-1:2014-09-01; Arbeitsweise von Leuchten – Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- [3] IEC 62722-2-1:2014-11-01; Arbeitsweise von Leuchten – Teil 2-1: Besondere Anforderungen an LED-Leuchten
- [4] CIE97 Guide on the Maintenance of Indoor Electric Lighting Systems (2005)
- [5] CIE 154 The maintenance factor of outdoor lighting systems (2003)
- [6] TRILUX LED-Guide 2016

Licht für industrielle Prozesse und Produktion

*Dipl.-Ing. Sebastian Hesse, Dipl.-Ing. Frank Hofmann,
NARVA Lichtquellen GmbH + Co. KG*

Spektrale Herausforderungen an halbleiterbasierte Strahlung

Industrielle Verfahren erfordern gezielt auf den jeweiligen Prozess abgestimmte spektrale Strahlungsquellen, sowohl im ultravioletten als auch im sichtbaren Spektralbereich. Die Industrie befindet sich momentan in der Phase des Überganges von der Anwendung konventioneller hin zu modernen, halbleiterbasierten Licht- bzw. Strahlungsquellen. Dabei müssen diese neuen Quellen spezifische Anforderungen erfüllen.

Effizientere Gestaltung industrieller Abläufe dank individuell gestalteter Strahlungsquellen

Moderne halbleiterbasierte Quellen erlauben auf Grund ihrer kompakten Bauformen eine große gestalterische Freiheit bei der Gestaltung der Bestrahlungseinheiten. Damit fallen bauliche Zwänge, die auf der Bauform der konventionellen Quellen beruhen, weg. Für die Anwendung in industriellen Prozessen bedeutet dies, dass Anlagen wie z.B. Reaktoren, nun präziser auf ihre relevanten Parameter eingestellt werden können. Durch die gute Schalt- und Steuerbarkeit der halbleiterbasierten Quellen stellen sie digitale Strahlungsquellen dar und erhöhen somit den Automatisierungsgrad der Anlagen und senken auf Grund gesteigerter Effizienz die anfallenden Kosten für den Betrieb der industriellen Anlagen. Das soll an Hand der ausgewählten Beispiele exemplarisch aufgezeigt werden.

Ausgewählte Applikationen

Für Farbabmusterungen in z.B. der Druck-, Automobil- und Textilindustrie werden spezielle Kabinen verwendet, in denen den Normlichtarten D50 resp. D65 nahe kommende Lichtquellen verwendet werden. Unter Einhaltung normativer lichttechnischer, insbesondere metamerer Vorgaben, sucht die Industrie hierfür nach Lösungen mit LED. Vorgestellt wird ein LED – Modul auf Basis der Remote – Phosphor – Technologie.

Für die Erzeugung von Biomasse für Nahrungsmittel, Nahrungsergänzungsmittel, Pharmazeutika oder Energiegewinnung werden Lichtquellen für spezielle Bioreaktoren benötigt, die auf die jeweiligen Pflanzen abgestimmt sind.

In der Werkstoffprüfung finden diverse fluoreszierende Hilfsstoffe Verwendung, um nicht sichtbare, jedoch relevante Merkmale zu visualisieren. Dazu werden Strahlungsquellen benötigt, die definiert vor allem im UV-A emittieren.

Die energieeffiziente Beleuchtung strukturierter industrieller Produktionsanlagen erfordert, bei Einhaltung vorgegebener lichttechnischer Gütemerkmale, eine möglichst verlustarme Lenkung des Lichtes. Dazu werden in die Lichtquelle Leuchteigenschaften integriert.

Fallbeispiele

An Hand der ausgewählten Beispiele wird eine Übersicht der Umsetzungsmöglichkeiten gegeben.

Light for industrial processes and production

Dipl.-Ing. Sebastian Hesse, Dipl.-Ing. Frank Hofmann, NARVA Lichtquellen GmbH + Co. KG

Spectral challenges for semiconductor based emission

Industrial processes require spectral emitters in the ultraviolet as well as in the visible spectral range tuned for the specific application. Currently, industry is in a transition phase from application of traditional sources of electromagnetic radiation towards modern, semiconductor based emitters. These new emitters have to fulfill specific conditions.

Higher efficiency of industrial processes due to individually designed radiation sources

Due to their compact shape, modern semiconductor based emitters allow a large degree of freedom in the design of radiation units. Restrictions due to the shape of conventional sources do not longer occur. Therefore, relevant parameters in plants, e.g. reactors, can now be more precisely adjusted. Because of their good switchability and controllability, semiconductor based emitters are digital and therefore increase the level of automation of plants. Due to the increased efficiency, costs arising from running industrial plants are reduced. This will be demonstrated using selected examples.

Selected Applications

For colour matching e.g. in the printing, automotive and textile industries, special cabins with light sources approximating the standard illuminants D50 or D65, respectively, are used. The industry is working on solutions involving LEDs, which satisfy photometric and in particular metameric requirements. A LED module based on the remote-phosphor technology is presented.

For biomass production for food, food supplements, pharmaceuticals or energy generation, light sources for specific bio-reactors adjusted for the respective plants are required.

In material testing, a variety of fluorescent auxiliary materials are applied in order to visualise relevant invisible characteristics. For this purpose electromagnetic radiation sources emitting UV-A are required.

The energy-efficient illumination of structured industrial manufacturing facilities requires low-loss light guiding complying with photometric quality criteria. For this purpose, luminaire characteristics are integrated into the light source.

Example cases

Using selected examples, an overview of implementation possibilities will be given.

Licht für industrielle Prozesse und Produktion

Sebastian Hesse, Frank Hofmann,
NARVA Lichtquellen GmbH + Co. KG
sebastian.hesse@narva-bel.de, frank.hofmann@narva-bel.de

Zusammenfassung

Industrielle Verfahren erfordern gezielt auf den jeweiligen Prozess abgestimmte spektrale Strahlungsquellen, sowohl im ultravioletten als auch im sichtbaren Spektralbereich. Die Industrie befindet sich momentan in der Phase des Überganges von der Anwendung konventioneller hin zu modernen, halbleiterbasierten Licht- bzw. Strahlungsquellen. Dabei müssen diese neuen Quellen spezifische Anforderungen erfüllen. An Hand ausgewählter Beispiele wird eine Übersicht der Umsetzungsmöglichkeiten gegeben. Dabei steht nicht die Energieeffizienz der Beleuchtungslösung im Vordergrund, sondern der industrielle Prozess.

1 Beispielhafte Applikationen

1.1 Fotolithografie

Im industriellen Einsatz bei der Verarbeitung photosensitiver Materialien stören UV- und Blaulichtanteile den Fertigungsprozess. Emissionen für Wellenlängen kleiner 500 nm müssen sicher vermieden werden. Dies gilt nicht nur für die Herstellung von Mikrochips sondern auch in bestimmten Fertigungsbereichen der Druckindustrie, wo die Belichtung von Druckerplatten und Tinten verhindert werden soll.

Die Lichtquellen für diese Anwendungen wurden in den letzten Jahren evolutioniert. Auch die ersten LED-Produktgenerationen nutzten wie die Leuchtstofflampen Filter, um die störenden Wellenlängen aus der Emission zu entfernen. Die Halbleiterlichtquellen der aktuellen Generation hingegen emittieren nur noch in dem Bereich von Wellenlängen größer 500 nm. Damit konnte die Effizienz der Gelblichtquellen in den letzten Jahren verdreifacht werden und liegt heute für diese Spezialanwendung bei 150 lm / W.

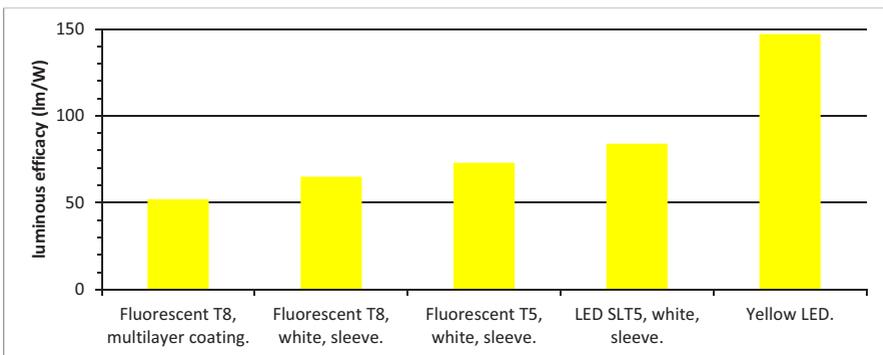


Abb. 1: Evolution von Lichtquellen für die Fotolithografie: Steigerung der Energieeffizienz

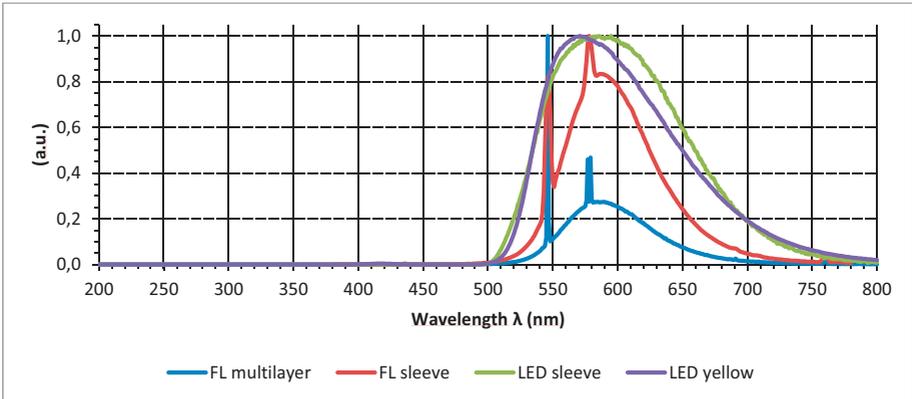


Abb. 2: Evolution von Lichtquellen für die Fotolithografie: spektraler Vergleich von Leuchtstofflampe und LED

1.2 Normlicht / Farbabmusterung

Die Applikation Farbabmusterung mit Normlichtquellen, die den Anforderungen nach CIE 015:2004 entsprechen, stellt besonders hohe Anforderungen sowohl an die Qualität des Emissionsspektrums als auch an die Konstanz der farbmimetrischen Eigenschaften der Lichtquelle. Bei der Entwicklung von Alternativen zu den in diesem Bereich etablierten Spezialleuchtstofflampen werden verschiedene Wege gegangen. Bekannt ist die Zusammensetzung der Normlichtfarbe aus der Emission verschiedener LED und UVED nach dem Prinzip des tunable white bei Nutzung einer elektronischen Steuerung. Hier soll die Generierung der Normlichtfarbe aus blauen LED und UVED über einen Konverter vorgestellt werden.



Abb. 3: RPM-Modul für Normlichtanwendungen

1.3 Technisches UV

Der Bereich technischer UV-Anwendungen z. B: in den Bereichen Materialprüfung, Oberflächenbehandlung und Desinfektion galt lange Zeit als Domäne für Entladungslampen. Zumindest für den Bereich der UVA-Anwendungen hat sich dieses Bild verändert. Halbleiterbasierte Strahlungsquellen mit sehr guter Effizienz und Maintenance lösen im Bereich des technischen UVA die Niederdruckentladungslampen ab.

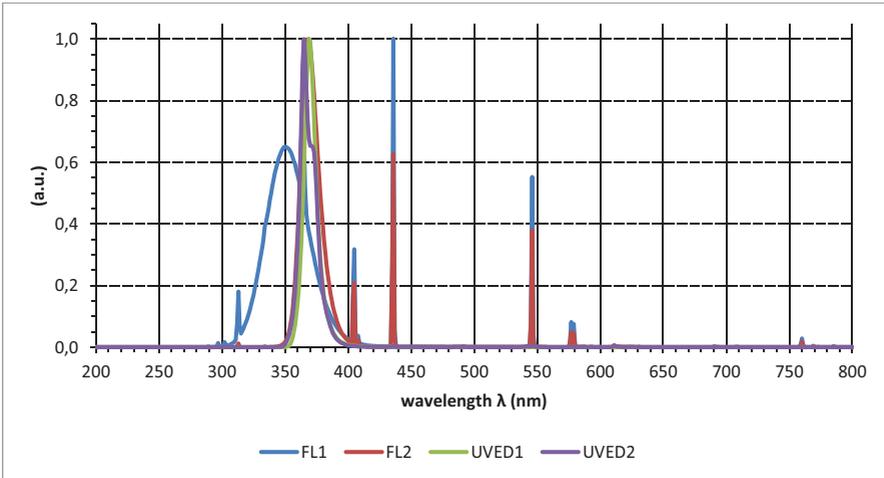


Abb. 4: spektraler Vergleich von UVA-Quellen: Leuchtstofflampe und UVED

Tab. 1: Vergleich von UVA-Strahlern: Bestrahlungsstärke

$W \cdot m^{-2}$	Fluorescent 1	Fluorescent 2	UVED 1	UVED 2
315-380nm	5,0102	4,2943	20,6670	0,8201
350-380nm	2,6553	4,3008	20,6559	0,8189

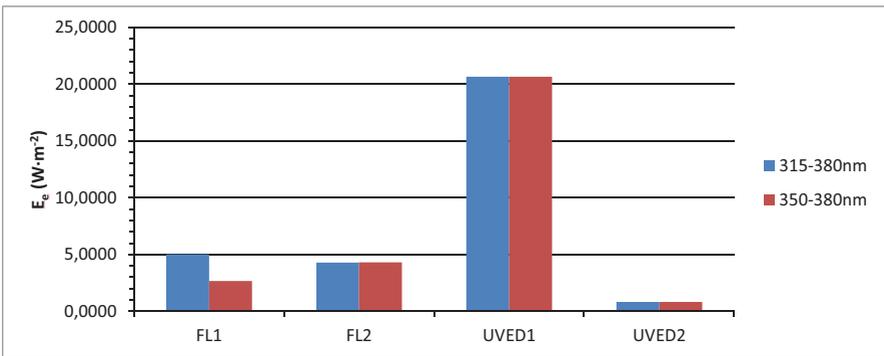


Abb. 5: Vergleich von UVA-Strahlern: Bestrahlungsstärke

1.4 Pflanzenkonditionierung / Pflanzenproduktion

Für die Produktion von Pflanzen und Biomasse werden Lichtquellen hinsichtlich ihrer Effizienz für die Photosynthese bewertet. Je nach Bewertungsmodell werden für verschiedene Lichtquellen sehr unterschiedliche Bewertungsergebnisse erzielt. Neue halbleiterbasierte Lichtquellen können hier sehr genau angepasst werden.

Tab. 2: Vergleich der photosynthetischen Wirksamkeit verschiedener Lichtquellen

(a.u.)	Fluorescent	Sodium	RGB LED	LED RPM
Dodillet	13	30	45	77
McCree	12	35	42	83
Chlorophyll	7	11	28	36
PAR	77	212	247	507

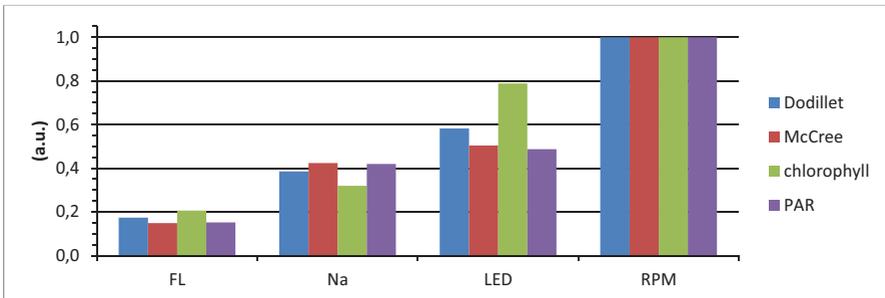


Abb. 6: Vergleich der photosynthetischen Wirksamkeit verschiedener Lichtquellen

Weiter werden Lichtquellen hinsichtlich ihrer Eignung für die Konditionierung von Pflanzen betrachtet. In Räumen, in denen landwirtschaftliche Produkte gelagert werden, muss eine ausreichende Beleuchtung einerseits die Arbeitssicherheit gewährleisten, andererseits soll keine Aktivierung von Wachstumsfunktionen der landwirtschaftlichen Produkte erfolgen.

Weiterhin werden Lichtquellen zur Beeinflussung der Photomorphogenese landwirtschaftlich verwerteter Pflanzen optimiert. Mit bestimmten Wellenlängen kann über die Ansteuerungen phytochromer Molekularschalter das Wuchsbild von Nutzpflanzen entscheidend beeinflusst werden.

Lichtsteuerung beyond lighting

Lighting controls beyond lighting

Peter Dehoff, Zumtobel Lighting, Dornbirn, Österreich

Problemstellung

Die Frage ist weniger, ob eine Lichtsteuerung eingesetzt werden soll, sondern was die Lichtsteuerung für den Anwender macht

Ziel

Die Entscheidungskriterien für Lichtsteuerung werden in das Umfeld verschiedener „smarten“ Anwendungen eingebettet.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Eine Reihe technologischer Lösungen erlaubt die Steuerung oder Regelung der Beleuchtung im Außen- und Innenraum. Weshalb werden Lichtsteuerungen eingesetzt? Hier sollen nochmals die Kriterien aufgeführt werden, die im CIE TC 3.49 erarbeitet wurden. Der technische Report „Decision schemes on lighting controls“ liegt bei der Division 3 der CIE und durchläuft die letzten formellen Phasen vor seiner Veröffentlichung. Die Bewertung einer Lichtsteuerung erfolgt dabei nach ihrer Auswirkung auf die Energieeffizienz, die Lichtqualität und die Nutzerakzeptanz.

Zwischenzeitlich machen Begriffe wie „Smart Lighting“ und „Internet of Things“ die Runde. Speziell die Vernetzung der Beleuchtung mit anderen Gewerken bietet neue Möglichkeiten, die hier gedanklich angerissen werden sollen.

Realisierungsgrad

Anhand einiger ausgeführter Anlagen und Beispiele sollen die Möglichkeiten von Lichtsteuerungen erkannt werden.

Lichtsteuerung beyond lighting

Lighting controls beyond lighting

Peter Dehoff, Zumtobel Lighting, Dornbirn, Österreich

Problem

“The question is not whether a lighting control system is to be used, but what does it do for the user”

Target

Decision schemes for lighting controls will be shown together with smart appliances.

Innovation and »best practice«

Some technological solutions allow to control lighting indoors and outdoors. Why is lighting controls used? The criteria were elaborated in CIE TC 3.49. The draft technical report “Decision schemes on lighting controls” was send to the CIE board and will be finalized in due time. The evaluation of lighting controls takes into account energy efficiency, lighting quality and user acceptance.

Meanwhile other topics like “smart lighting” or “internet of things” became popular. Especially connectivity as well as interoperability show new possibilities and advantages.

Realization

In some installations experiences were made with the new technology. The cooperation with Bosch in the Life Cycle Tower 1 in Dornbirn is an opportunity to find out the strengths and the weaknesses in an research project.

Lichtsteuerung beyond lighting

Lighting controls beyond lighting

Peter Dehoff, Zumtobel Lighting, Dornbirn, Österreich

Zusammenfassung/Summary

„ Die Frage ist weniger, ob eine Lichtsteuerung eingesetzt werden soll, sondern was die Lichtsteuerung für den Anwender macht“

Eine Reihe technologischer Lösungen erlaubt die Steuerung oder Regelung der Beleuchtung im Außen- und Innenraum. Weshalb werden Lichtsteuerungen eingesetzt? Hier sollen nochmals die Kriterien aufgeführt werden, die im CIE TC 3.49 erarbeitet wurden. Der technische Report „Decision schemes on lighting controls“ liegt bei der Division 3 der CIE und durchläuft die letzten formellen Phasen vor seiner Veröffentlichung. Die Bewertung einer Lichtsteuerung erfolgt dabei nach ihrer Auswirkung auf die Energieeffizienz, die Lichtqualität und die Nutzerakzeptanz.

Zwischenzeitlich machen Begriffe wie „Smart Lighting“ und „Internet of Things“ die Runde. Speziell die Vernetzung der Beleuchtung mit anderen Gewerken bietet neue Möglichkeiten, die hier gedanklich angerissen werden sollen.

1 Gründe für den Einsatz einer Lichtsteuerung

Noch immer sind Lichtsteuerungen kein Standard bei der technischen Gebäudeausrüstung. Vielfach werden sie aus Sicht der Automatisierungstechnik entschieden, wenn sie denn entschieden werden, und orientieren sich nicht an den Bedürfnissen des späteren Nutzers. Das „Verlangen“ nach Lichtsteuerung ist beim Nutzer auch wenig ausgeprägt, da ihm schlicht die Vorstellungskraft fehlt, welche Möglichkeiten sich ihm bieten. Im TC 3.49 der CIE wurden daher die Entscheidungskriterien für ein Lichtmanagementsystem systematisch erarbeitet sowie ein Schema entwickelt, welches den Nutzen für die Energieeffizienz, die Lichtqualität und nicht zuletzt die Nutzerakzeptanz bewertet. Der Technische Report steht kurz vor seiner Veröffentlichung, was allerdings bedeutet, dass er erst 2017 zur Verfügung stehen kann.

1.1 Entscheidungskriterien nach CIE

Hauptgründe für den Einsatz von Lichtmanagement sind:

Energieeffizienz steigern: durch das Dimmen und Schalten reduziert sich der Energieverbrauch für die künstliche Beleuchtung. Wenn genügend Tageslicht vorhanden ist, kann es ganz oder teilweise die künstliche Beleuchtung ersetzen. Wenn Menschen kein oder weniger Licht benötigen, kann die künstliche Beleuchtung gedimmt oder ausgeschaltet werden.

Lichtqualität steigern: durch der Tätigkeit oder eigenen Wünschen entsprechende Beleuchtung kann die Lichtqualität individuell angepasst und optimiert werden. Durch Licht können Räume im Innen- und Außenbereich inszeniert werden.

Sicherheit erhöhen: Sicherheitsbeleuchtung kann integriert werden

Flexibilität gewähren: durch Umadressieren von Leuchten kann schnell und flexibel sowohl auf arbeitsorganisatorische Veränderungen reagiert als auch einzelne Licht-Szenen programmiert und verändert werden.

Welche Strategien können eingesetzt werden, um mit einem Lichtmanagement sinnvolle Ziele zu erreichen? Zum einen sollten die Ziele definiert, zum anderen die Akzeptanz der Nutzen überprüft werden

Ein Ziel ist die Steigerung der Energieeffizienz:

- 1 Individuell ein- und ausschalten: diese einfachste Form setzt einen Schalter voraus, der sich in der Nähe der Person befindet. Die Personen schätzen diese Möglichkeit, nutzen sie allerdings häufig nicht
- 2 Tageslichtsteuerung – Schaltfunktion: Automatisch ein- und ausschalten: das Stellsignal liefert das über einen Sensor gemessene Tageslicht
- 3 Tageslichtsteuerung – Schaltfunktion: Automatisch aus- und manuell bzw individuell einschalten: dies setzt einen Tageslichtsensor und einen Schalter voraus
- 4 Tageslichtsteuerung - Dimmen: automatisch auf Konstantwert, das Stellsignal liefert das über einen Sensor gemessene Tageslicht
- 5 Tageslichtsteuerung - Dimmen: automatisch aus, individuell einschalten: dies setzt einen Tageslichtsensor und einen Schalter voraus
- 6 Anwesenheitssteuerung – Schaltfunktion: Automatisch ein- und ausschalten: das Stellsignal liefert ein Sensor, der die Anwesenheit von Personen erfasst
- 7 Anwesenheitssteuerung – Schaltfunktion: Automatisch aus- und individuell einschalten: dies setzt einen Anwesenheitssensor und einen Schalter voraus
- 8 Konstantlicht (ohne Tageslicht): Konstanthalten eines Lichtstromes zum Ausgleich des Rückgangs, der sich bei der Alterung ergibt. Stellsignal liefert eine vorgegebene Steuerkurve oder ein Sensor für den abgegebenen Lichtstrom
- 9 Zeitsteuerung: zu vorgegeben Zeiten werden vorgegebene Szenen abgerufen bzw die Anlage aus- oder eingeschaltet
- 10 Lastbegrenzung: automatische Begrenzung des Energiebedarfs

Ein weiteres Ziel ist die Verbesserung der Lichtqualität:

- 11 Tätigkeitsbezogene Steuerung: individuelle Einstellung der Lichtszene entsprechend einer Tätigkeit. Dies schließt das Schalten und Dimmen von einzelnen Jalousien, Leuchten und Leuchtengruppen im Umfeld ein.
- 12 Individuelle Tageslichtkontrolle: individuelle Bedienung von Jalousien, um Störungen wie Blendung und Wärme zu vermeiden

- 13 Automatische Tageslichtkontrolle: automatische Steuerung von Jalousien zur Reduktion von Wärmeeintrag und Blendung bei Sonneneinstrahlung und zu hoher Außenhelligkeit. Dies setzt einen Tageslichtsensor voraus.
- 14 Dynamische Beleuchtung: automatischer Ablauf der Lichtveränderung anhand vorgegebener Regeln
- 15 Raumrelevante Szeneneinstellung: Auswahl voreingestellter statischer oder dynamischer Lichtszenen

Die Bewertung der Strategien sieht wie folgt aus:

Strategie:		Bedienung	Energieeffizienz	Lichtqualität	Akzeptanz
1	Individuell	Ein, aus, dimmen	gering	hoch	hoch
2	Tageslichtsteuerung - Schalten	Auto aus, auto ein	mittel	mittel	gering
3	Tageslichtsteuerung - Schalten	Auto aus Manuell ein	hoch	mittel	mittel
4	Tageslichtsteuerung - Dimmen	Auto aus, auto ein	Hoch	mittel	Mittel
5	Tageslichtsteuerung - Dimmen	Auto aus Manuell ein	Sehr hoch	mittel	Hoch
6	Anwesenheitsteuerung - Schalten	Auto aus, auto ein	Hoch	mittel	Mittel
7	Anwesenheitsteuerung - Schalten	Auto aus Manuell ein	Sehr hoch	mittel	Hoch
8	Konstantlicht	auto	Hoch	mittel	Mittel
9	Zeitsteuerung	auto	Sehr hoch	mittel	Hoch
10	Lastbegrenzung	auto	Hoch	mittel	Mittel
11	Tätigkeitsbezogene Steuerung	manuell	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch
12	Individuelle Tageslichtkontrolle	manuell	Mittel	hoch	Sehr hoch
13	Automatische Tageslichtkontrolle	auto	Hoch	hoch	Hoch
14	Dynamische Beleuchtung	auto	Hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
15	Szeneneinstellung	manuell	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch

Auto = automatisch

Tab. 1: Die Tabelle zeigt eine Auswirkung der einzelnen Strategien auf Energieeffizienz und Lichtqualität und bewertet die Nutzerakzeptanz

2 Lichtsteuerung und Internet der Dinge

Bisher ist eine Lichtsteuerung hauptsächlich Bestandteil einer komplexen Gebäudeleittechnik oder ein autarkes, teilweise proprietäres System innerhalb der Gebäudeelektrifizierung. Die Vernetzung der verschiedenen Geräte wird jedoch zunehmend einfacher, da sich die Dinge mit einer eigenen Adresse im Internet anmelden. Der leistungsfähige IPv6 Standard bietet dafür die Voraussetzung.

2.1 Der Weg zum Internet of Lights

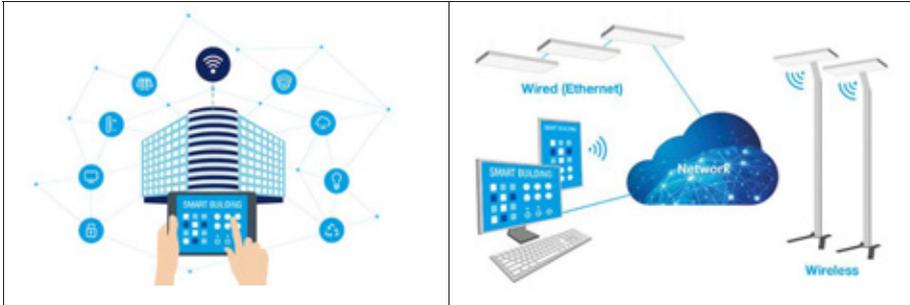


Abb. 1: Im Gebäude werden die Dinge über das Internet miteinander verbunden. Die z.T. drahtlose Kommunikation ermöglicht es, Daten von Sensoren in einer Cloud zu sammeln sowie Befehl anhand von Steuerprogrammen, die sich der vielen Daten bedienen, an die Leuchten zu schicken

Seit 2016 sind mit etwa 8 Mrd. mehr Dinge miteinander vernetzt als es Menschen auf der Erde gibt. Aber nicht jedes Ding hat für jedes andere Ding die richtige Sprache oder die richtige Information. Ein Sensor mag Infrarotstrahlung im Raum messen, er weiß aber noch lange nicht, ob diese Information wichtig dafür ist, das Licht einzuschalten. Und vor allem ist nicht immer klar, wo ein Sensor platziert ist.

Eine der besten Infrastrukturen bietet das Netz der Beleuchtung. Leuchten stehen entlang von Straßen, auf Plätzen und sie befinden sich in nahezu jedem Gebäude. Dort bilden sie oft ein dichtes Netz mit Auslasspunkten für Leuchten, so dass Licht überall eingeschaltet werden kann. In diesem dichten Netz können leicht Sensoren untergebracht werden, die verschiedene Messwerte erfassen: Anwesenheit, Luftfeuchtigkeit, Temperatur und mehr. Sender können in diesem Netzwerk auch Signale senden. Strom ist vorhanden, so dass Sender und Sensoren dauerhaft mit Energie versorgt werden können. Das Internet of Lights ist sozusagen bereits installiert, es ist eine Frage der Zeit, bis wann es komplett intelligent sein wird.

Die Daten, die die Sensoren aufnehmen, können in einer Cloud gespeichert werden. Sie stehen jedem anderen Ding zur Verfügung, das es braucht. Die Anwesenheit eines Menschen ist nicht nur für die Beleuchtung, sondern auch für die Heizung, ein Sicherheitssystem oder eine Pflegeüberwachung nutzbar.

Die Informationen, die ein Tageslichtsensor auf dem Dach liefert, kann die gesamte Gebäudeautomation nutzen.

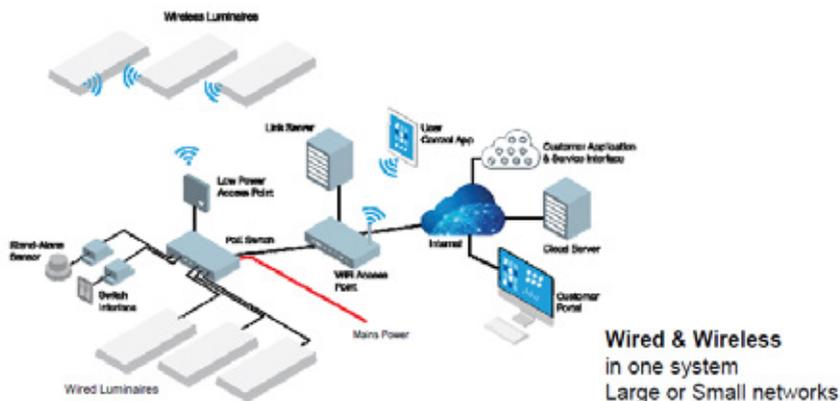


Abb. 2: Vernetzte Geräte ermöglichen ein intelligentes Zusammenspiel in der Anwendung (net4more von Tridonic)

Zu entwickeln sind noch die Kommunikationsstandards.

2.2 Die Software

Können die Dinge sich verstehen, ist also die Sprache definiert, ist es relativ einfach für Anwender, „Romane“ und „Geschichten“ zu schreiben, also Software, die den Menschen nutzt.

2.3 Pilotprojekt Life Cycle Tower

Gebäude machen fast die Hälfte des weltweiten Energieverbrauchs aus. Daher wird der Beleuchtungsinfrastruktur künftige eine wesentliche Rolle zukommen, wenn es darum geht, Energie- und Kosteneinsparungen zu ermöglichen. Es wird prognostiziert, dass der Großteil der gebäudebasierten IoT-Geräteinstallationen bis 2020 auf Basis der Beleuchtungsinfrastruktur erfolgen. Denn Beleuchtung ist sowohl in geschlossenen Räumen als auch im Freien vorhanden, vernetzt und darüber hinaus mit einer Energiequelle verbunden. Davon abgesehen werden bereits Daten durch Leuchten erfasst, beispielsweise die Anwesenheit von Menschen in einem Raum. Bisher werden diese Daten nur für die Lichtsteuerung genutzt. In einem nächsten Schritt könnten sie aber auch außerhalb der Welt der Beleuchtung von sehr viel größerem Nutzen sein, z. B. wenn sie Raummanagement ermöglichen.

Der Life Cycle Tower ONE bietet ein ideales Umfeld für Innovationen bei vernetzten Gebäuden, da er auf höchste Standards bei Nachhaltigkeit und Nutzerkomfort abzielt. Das Gesamtsystem bietet in Echtzeit Einblicke in den Zustand und die technische Gesundheit des Gebäudes. Abgedeckt werden dabei beispielsweise die Bereiche Energieverbrauch und die Energieeinsparung pro Leuchte, pro Etage und für das gesamte Gebäude, sowie Visualisierungen der Anwesenheitsdaten und der Flächennutzung. Eine Heat Map (dt. Wärmekarte) zeigt die Belegung eines Raums, um die Verbrauchseffizienz zu optimieren. Für die Wartung liefert das System Benachrichtigungen bei fehlerhaften Leuchten und gibt Einblicke in die Betriebsstunden und die Nutzungshistorie des Beleuchtungssystems. Das

Wissen über bevorzugte Lichteinstellungen hilft bei der Optimierung von Lichtszenen und erhöht in der Folge die Zufriedenheit des Gebäudenutzers.

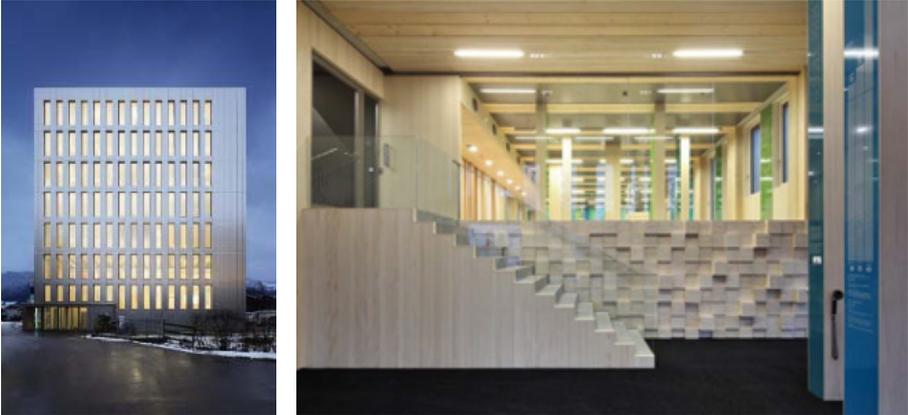


Abb. 3: Der Life Cycle Tower 1 (LCT1) ist nicht nur das erste Holzhochhaus der Welt, sondern auch ein Pilotprojekt mit intelligenter vernetzter Gebäudetechnologie für das Internet of things

2.4 Die Sinnhaftigkeit der Lichtsteuerung

Die technologischen Möglichkeiten des Internet der Dinge oder des Internet of Lights machen selbst noch nicht die Sinnhaftigkeit einer Lichtsteuerung aus. Natürlich werden viele Bedienfunktionen „die Wand verlassen“ und auf die Oberfläche des Smartphones wandern. Dies wird nicht den Lichtschalter abschaffen, den der Mensch seit der Erfindung der künstlichen Beleuchtung kennt und der üblicherweise beim Betreten eines Raumes mit der rechten Hand direkt neben der Tür zu finden ist.

Aber individuelle Programme können für die Beleuchtung abgerufen werden wie Musik aus der Musikbox. Und Licht kann über Sensoren reagieren und sich automatisch auf den Menschen einstellen. Die Programme dafür müssen natürlich entwickelt werden. Die „Entscheidungskriterien für Lichtsteuerungen“ sind der erste Schritt dahin.

3 Literatur

Dehoff, Peter; Entscheidungskriterien für Lichtmanagement - ein Bericht zum Sachstand, Licht 2012, Tagungsband

CIE CD/TR 3.49 Decision Scheme for Lighting Controls for Tertiary Non-Residential Lighting in Buildings, to be published

Licht.wissen 12, Lichtmanagement, Heft des ZVEI FV Licht, unter www.licht.de

Berührungslose Interaktion mit Licht am Arbeitsplatz

*Christian Riedel, Dr. Matthias Bues, Prof. Dr. Raimund Dachsel
Visual Technologies Lab, Fraunhofer IAQ; Interactive Media Lab, TU Dresden*

Problemstellung

Seit elektrische Leuchten mit einem Lichtschalter versehen wurden, ist der Mensch es gewohnt eine Lampe im Vorbeigehen zu steuern ohne seine volle Konzentration auf diesen Steuerungsvorgang legen zu müssen. Aktuelle Entwicklungen in der Beleuchtungstechnik ermöglichen jedoch inzwischen einen Grad an individueller Anpassung, der über das klassische Ein- und Ausschalten einer Leuchte hinausgeht. Im Bereich der Gestenbasierten User Interfaces haben sich neue Möglichkeiten aufgetan, welche berührungslose Interaktionen ermöglichen. Bekannte berührungslose Controller wie die Microsoft Kinect und Leap Motion stehen dabei in der Kritik zu komplex und zu unpräzise für eine schnelle und unkomplizierte Leuchten Steuerung zu sein.

Ziel

Ziel der Arbeit war es eine berührungslose Interaktion mit Licht unter dem Aspekt einer Rückfallinteraktion per Touch zu konzipieren, prototypisch zu implementieren und mit einer Nutzerstudie zu evaluieren. Die Evaluation sollte über die Verteilung der Interaktionsformen durch den Nutzer, über die Präferenzen der Nutzer und die Robustheit des Prototyps Aufschluss geben.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Ein neuartiger Ansatz sollte angegangen werden dem berührungslosen Steuergerät durch eine Rückfall Option auf ein Touchpad unter die Arme zu greifen und den Nutzer entscheiden zu lassen, welche Interaktion er bevorzugt. Die Kombination aus der Erfahrung des Durchschnittsnutzers mit Touch-Geräten wie dem Smartphone und der Schnelligkeit der im Vorbeigehen ausgeführten Freihand-Gesten sollen die User Experience positiv beeinflussen.

Realisierungsgrad

Mit Hilfe des 3D-Touchpads von Microchip Inc. wurde eine Leuchten-Steuerung prototypisch umgesetzt. Diese beherrschte die Steuerung durch Freihand-Gesten in bis zu 10cm Abstand und Touch Gesten. Neben dem Ein- und Ausschalten der Leuchte war auch ein stufenloses Dimmen und ein Umschalten zwischen einem Warmweißen und Kaltweißen Modus der Leuchte möglich.

Die Nutzerstudie hat ergeben, dass in der Zuverlässigkeit und Intuitivität der beiden Interaktionsformen mit 3-12% Differenz nur kleine Unterschiede zu Gunsten der Touch Bedienung messbar waren. Grobe Interaktionen wie das Ein- und Ausschalten und der Wechsel zwischen warmer und kalter Farbtemperatur lagen dabei sowohl per Freihand als auch Touch auf einem gleichen hohen Niveau bei einer Erfolgsrate von 73-80%. Das Dimmen der Leuchte war eine präzise Interaktion, die auf dem Touchpad bevorzugt ausgeführt wurde, bei der Freihandbedienung fehlte den Probanden ein gewisser Grad an Sicherheit.

Intelligentes Leuchten-System mittels Visible Light Communication

Tobias Hofer, HSI-Elektronik AG Schweiz

Problemstellung und Forschungsfragen

Die Entwicklung im Bereich der Beleuchtung ist eindeutig. Das Licht wird digital. LED-Beleuchtungen werden vernetzt. Die einzelnen Leuchten können Daten austauschen. Damit die einzelnen Leuchten einfach miteinander vernetzt werden können ist eine Datenverbindung zwischen den einzelnen Leuchten und Steuerungen notwendig. Diese Verbindung kann drahtgebunden (z.B. DALI, KNX) geschehen oder auf Basis einer Funkverbindung. Beide Lösungen haben ihre Vor- und Nachteile. Nicht immer kann ein Draht- oder eine Funkverbindung eingesetzt werden. Wir haben uns die Frage gestellt können Leuchten Daten auch z.B. über das Licht austauschen?

Die Frage wird in einem national geförderten Forschungsprojekt (KTI) aktuell bearbeitet und eine Lösung die in der Praxis eingesetzt werden kann wird entwickelt.

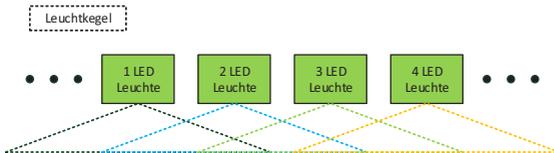
Stand der Wissenschaft/Technik

Aktuell wird vermehrt im Bereich von „Visible Light Communication“ (VLC) geforscht. So gibt es Projekte bei denen Informationen im Licht zur Orientierung in einem Gebäude genutzt werden können. Weitere Ansätze nutzen das Licht um Daten in eine Richtung, z.B. auf ein Smartphone, übertragen zu können.

Forschungshypothesen

Die Idee ist nun auf Basis der „Visible Light Communication“ (VLC) mit der ohnehin vorhandenen LED, Informationen zu übertragen. Die LED als Lichtquelle und dessen Treiber, die sowieso für die Beleuchtung vorhanden sind, erlauben es mit wenig zusätzlicher Elektronik analoge und digitale Information ins sichtbare Licht aufzumodulieren.

Versuchsaufbau



Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Aktuell wurde Prototypenleuchten entwickelt die in einem Raum mit Fremdlicht in der Lage sind, Daten auszutauschen. Der Ansatz ist neu und einfach. Das System ist nicht auf eine hohe Datenrate ausgelegt, sondern ist einfach gehalten um mit möglichst wenig Aufwand relevante Daten von einer Leuchte zur anderen übertragen zu können.

Intelligent Light-System by Visible Light Communication

Tobias Hofer, HSI-Elektronik AG Switzerland

Problems and research issue

The development in the field of lightening is clearly. The light will be digital. LED lights will be networked. The individual lights can exchange data. So that the individual lights can be networked simply a data link between the individual luminaires and controls are necessary. This connection can be DALI, KNX or based on a radio link. Both solutions have their advantages and disadvantages. Not always can a wired or a wireless connection be used. We have asked ourselves: Are luminaires able to exchange data e.g.by the light?

The issue is currently being processed in a nationally funded research project (KTI) and a solution that can be used in practice is developed.

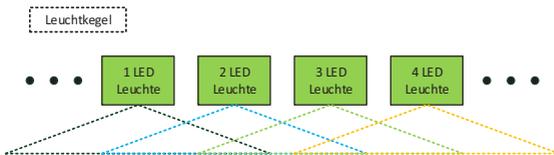
State of science / technology

Actually the research is taking place mostly in the field of „Visible Light Communication“(VLC). There are projects in which information in light can be used for orientation in buildings. Other approaches use the light to transfer data in one direction, e.g. on a smartphone.

Research hypotheses

The idea is now to transmit information based on „Visible Light Communication“(VLC) with the already pre-existing LED. The LED as the light source and the drivers that are available for lightning anyway, allow with little additional electronics to modulate analogous and digital information into visible light.

Test building



Results in comparison to previous results

Currently prototypes which are able to exchange data in a room with ambient light were developed. The approach is new and simple. The system is not designed for high data rate; it is kept simple in order to transmit with as little effort as possible relevant data from one luminaire to another.

Intelligentes Leuchten-System mittels Visible Light *Communication*

*Tobias Hofer,
HSi-Elektronik AG / Astra-LED GmbH
Wilerstrasse 73 9200 Gossau (SG) Schweiz*

Zusammenfassung

Die Entwicklung im Bereich der LED Beleuchtung ist eindeutig. Licht wird digital. Intelligente LED- Leuchten sind vernetzt und können untereinander Daten austauschen. Es werden ganz neue Anwendungen und Konzepte möglich. In die LED Leuchten können z.B. einfache Sensoren integriert werden. Damit die Vernetzung einfach und ohne aufwändige Programmierung realisiert werden kann, hat die HSi-Elektronik eine dezentrale Lichtsteuerung entwickelt. Was jedoch bleibt, ist eine Funkverbindung oder eine Drahtverbindung zum Austausch der Daten. Ist eine Vernetzung auf dieser Basis notwendig? Wir glauben nicht und haben erste LED Leuchten entwickelt, die Daten mittels LED Licht austauschen.

1 Steuerungskonzept

Viele heutige Lösungen im Bereich Lichtmanagement und Steuerungen von Leuchten basieren im Grunde immer noch auf dem DALI Standard. Es existieren viele Vorschaltgeräte, Bewegungsmelder und Komponenten mit der DALI Schnittstelle. Die meisten dieser Lösungen verlangen eine zentrale Steuerung. Dies kann eine programmierbare Steuerung sein oder auch ein Gateway, der den Zugriff über das Internet oder ein Smartphone erlaubt. Über diese zentrale Steuerung werden die LED Leuchten adressiert, Gruppen zugeordnet und programmiert. Aufwändigere Systeme werden dann z.B. über KNX in das Gebäude-Management integriert. Bei steigender Anzahl an Leuchten und Sensoren werden diese Systeme immer komplizierter und schwieriger zu handhaben. Es werden Spezialisten benötigt um diese zu programmieren. Geht einmal ein DALI Gerät defekt, muss dieses neu adressiert werden. Vielfach ist ein einfacher Austausch durch einen Haustechniker, der über keine spezielle Programmierungkenntnisse verfügt, schwierig.

Zwar führen neue innovative Systeme immer mehr zur Vereinfachung, das Konzept der zentralen Steuerung mit ihren Nachteilen bleibt aber vielfach bestehen.

Mit der Firma Swisflux AG hat die HSi-Elektronik ein dezentrales Lichtmanagementsystem entwickelt, welches die oben genannten Schwierigkeiten beseitigt. Dezentral bedeutet in diesem Fall: Jede Leuchte verfügt über dieselbe intelligente Steuerung. Eine Zuordnung zu einzelnen Gruppen erfolgt über einen einfachen Drehschalter. Die Steuerungen verfügen alle über einen PIR Sensor, einen Helligkeitssensor und eine Konfigurationsschnittstelle. Alle Steuerungen sind untereinander über einen Datenbus verbunden. Bei diesem System spielt es somit keine Rolle, ob 10 Leuchten oder 200 Leuchten vorhanden sind.



Abb. 1: Intelligente Lichtsteuerung in einer Leuchte

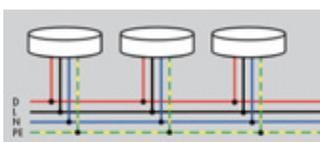


Abb. 2: Vernetzung der dezentralen Lichtsteuerungen über einen Datendraht

Die Lichtsteuerung hat einen DALI Master Ausgang, über den mittels Broadcast-Befehlen ein Standard DALI LED Treiber angesteuert werden kann. Die Probleme bei einem Ersatz oder Ausfall der Steuerung entfallen, da ausser der Gruppeneinstellung keine Adressierung notwendig ist.

Durch den Datenaustausch der Leuchten kennen alle Leuchten die Helligkeit an allen Punkten im Raum. Die Wahl wo ein Helligkeitssensor zu platzieren ist entfällt. Es kann z.B. einfach auf den dunkelsten Ort im Raum geregelt werden. Jede Leuchte verfügt über einen Bewegungsmelder und kann die Bewegung den anderen Leuchten sofort mitteilen. Heute immer wichtiger werdende Lichtszenarien wie die Schwarmfunktionalität zur Vermeidung von hell-dunkel Übergängen sind damit ohne weitere Programmierung realisierbar. Die Steuerprogramme sind vorkonfiguriert und können einfach gewählt werden. Eine zusätzliche Programmierung ist in den meisten Fällen nicht mehr notwendig.

Was aber bleibt ist die manuelle Adressierung / Zuordnung zu einer Gruppe mittels Dreh- schalter, sowie die Vernetzung mit Funk oder einem Datendraht.

1.1 Problemstellung

Beide Möglichkeiten - Draht oder Funk - Leuchten zu vernetzen haben ihre Vor- und Nachteile. Die manuelle Adressierung ist umständlich. Wir haben uns die Frage gestellt, wie man auf Draht, Funk und auf die Adressierung verzichten könnte.

2 Forschungshypothesen

Wir haben die Vision entwickelt, dass die Leuchten durch das LED Licht Daten austauschen könnten und diese sich automatisch adressieren sollten.

Die LED ist ja sowieso vorhanden. Dies kann ja bekanntermassen mit einem passenden – für das Auge unsichtbaren - Modulationsverfahren ein- und ausgeschaltet werden. Ein Helligkeitssensor ist in unseren intelligenten Leuchten ebenfalls vorhanden. Könnte dieser als Empfänger für die Daten dienen?

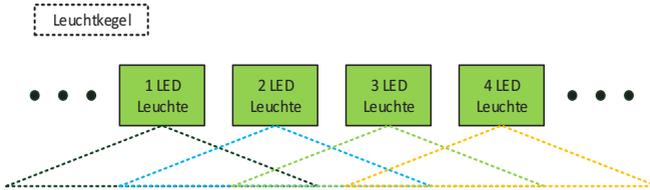


Abb. 3: Datenaustausch zwischen den Leuchten

Auf dieser Vision haben wir im letzten Jahr ein KTI (*Kommission für Technologie und Innovation*) Projekt realisiert. In Zusammenarbeit mit der Technischen Hochschule in Buchs entwickeln wir aktuell die ersten Prototypen und Funktionsmuster, die Daten mittels Licht austauschen. Die Ergebnisse waren so konkret, dass wir diese im Juni 2016 patentieren konnten.

3 Stand der Technik

Die Möglichkeit mittels LED Licht Daten auszutauschen wird aktuell in der Lichtindustrie immer populärer. So hat Philips erst kürzlich erste Leuchten im Supermarkt eingesetzt, die eine Adresse, moduliert im Licht, zusammen mit einem APP und der Smartphone Kamera nutzen, um die Position zu bestimmen. Dadurch werden sich viele neue Anwendungen eröffnen. Das Lichtspektrum kann man auch dazu nutzen, um Daten mit sehr hohen Datenraten zu übermitteln. Dies ist auch vielfach bekannt als Lifi und könnte WiFi ergänzen.

4 Entwicklung

4.1 Anforderung

Unsere intelligenten Leuchten basieren auf dem Konzept der dezentralen Intelligenz. Jede Leuchte hat dieselbe intelligente Lichtsteuerung integriert. Somit ist es irrelevant ob man 10 oder 100 Leuchten montiert. Der Aufwand für die Programmierung ist immer gleich niedrig. Die Kommunikation unter den Steuerungen ist auf eine sehr tiefe Datenrate ausgelegt. So haben wir bei einer Datenrate von 9600Bit auch bei 100 Leuchten eine Busauslastung von <10%. Die Steuerung ist einfach ausgelegt. Alle Bemühung gehen in die Richtung ein Lichtmanagementsystem zu entwickeln, das sich von alleine konfiguriert und einstellt. Jede Leuchte kann zu jeder Zeit Daten senden. Und jede Leuchte empfängt diese. Eine Multi-Master Anwendung. Diese Anforderung des einfachen Datenaustauschs durch Licht war ein Ziel.

Ein weiteres Ziel ist die optimale Schwarmlösung für Durchgangszonen oder Büros! Diese würde ohne Adressierung auskommen. Wenn z.B. eine Stehleuchte durch eine neue Anordnung manuell verschoben wird, fügt sich diese automatisch neu in die entsprechenden Schwarmkreise ein. Lösen könnte man das Problem durch eine automatische und kontinuierliche Abstandsmessung.

4.2 Entwicklung

Der erste Teil der Grundlagenforschung befasste sich mit der Entwicklung des optimalen Modulationsverfahrens. So müssen die Daten auch bei natürlichem Umgebungslicht ausgetauscht werden können. Auch muss die Datenübertragung robust gegenüber umliegenden Fremdleuchten sein. So ist es gut möglich, das weitere LED Leuchten, welche über PWM gedimmt werden, die Übertragung stören könnten.

Die LED werden bei der aktuellen Lösung durch eine Konstant-Stromquelle (Buck-Konverter) angesteuert. Dieser Buck-Konverter wird durch das Modulationssignal angesteuert. Die Modulation erfolgt in einem für das Auge nicht sichtbaren Frequenzbereich. Da wir nicht viele Daten übermitteln müssen, sind die Modulationszeiten sehr gering. Die so mit dem LED Nutzlicht übertragenen Daten, werden von den Leuchten in „sichtnähe“ empfangen und mittels eines Demodulators aus dem Nutzlichtanteil rückgewonnen.

Auf die manuelle Adressierung verzichten zu können war uns von Anfang sehr wichtig. Denn nur so können wir innovative Schwarmlösungen realisieren. Wenn die Leuchten automatisch voneinander wissen, welche Distanz zwischen ihnen liegt, können sich diese automatisch in die entsprechenden Schwarmkreise einfügen. Eine Leuchte mit einem Abstand von 5m leuchtet dann z.B. nur mit 50%, 7m wären dann z.B. noch 20%. Somit kann der Nutzer die Leuchte auch ganz einfach verschieben ohne neu zu adressieren. Auch könnte einmal eine Trennwand aufgestellt werden, die Leuchten dahinter wären nicht mehr im sichtbaren Bereich und automatisch nicht mehr Bestandteil des Schwarms.

Wir konnten eine Lösung entwickeln die sehr gut funktioniert. Die Lösung ist ziemlich robust gegenüber Fremdlicht und kann Daten über 10-20m sicher übermitteln. Grösser Distanzen sind nicht notwendig, ist der minimale Leuchten Abstand in der Praxis vielfach geringer.

4.3 Implementation

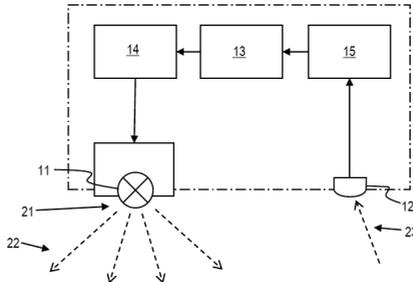


Abb. 4: Blockschaltbild Leuchte

Das Blockschaltbild oben zeigt das Prinzip. Der Konstant-Stromregler 14, als Bestandteil einer jeden LED Leuchte, steuert die LED 11 an. Der Konstant-Stromregler wird zur Übertragung der Daten mittels des Modulators 13 angesteuert. Der Helligkeitssensor 12 wird im Normalfall zur Tageslichtregelung genutzt. Im Fall der intelligenten Leuchte kann dieser auch zusätzlich als Empfänger für die im Licht aufmodulierten Daten dienen. Damit lassen sich sehr kompakte Steuerungen aufbauen.

Eine Herausforderung in der Entwicklung war die Kompensation des Empfängers gegen das Licht der eigenen Leuchte. So durfte der Demodulator nicht auf die Daten im eigenen Licht reagieren oder auf Rippelströme erzeugt im Konstant-Stromregler.

4.4 Versuchsaufbau

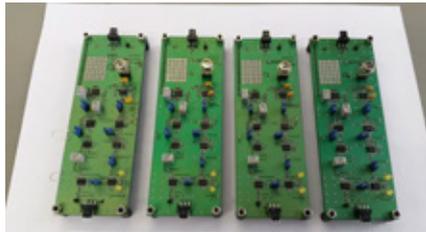


Abb. 5: Demodulator Prototypen

Die Abbildung 5 zeigt die Prototypen der Demodulatoren, die in die Testleuchten eingebaut werden. Die Demodulatoren und Stromregler werden durch den ohnehin vorhandenen Mikroprozessor angesteuert.

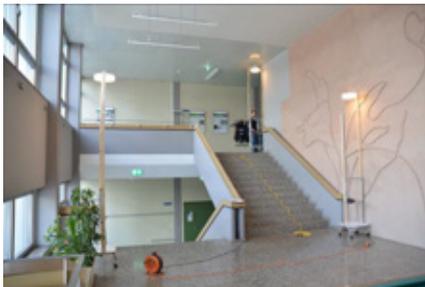


Abb. 6: Testaufbau an der Hochschule

Die beiden Bilder oben zeigen einen Testaufbau mit unseren intelligenten Leuchten. Es hat sich herausgestellt, dass die Kommunikation und der einfache Datenaustausch sehr robust funktionieren.

5 Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Aktuell wurde Prototypenleuchten entwickelt die in einem Raum mit Fremdlicht in der Lage sind, Daten auszutauschen. Die Leuchten können über Informationen, die aus dem Datensignal rückgewonnen werden, Rückschlüsse auf die Distanz zu den anderen Leuchten machen. Dies ermöglicht optimale Schwarmlösungen ohne manuelle Adressierung.

Der Ansatz ist neu und einfach. Das System ist nicht auf eine hohe Datenrate ausgelegt, sondern ist einfach gehalten um mit möglichst wenig Aufwand, relevante Daten von einer Leuchte zur anderen übertragen zu können.

6 Ausblick

Die gesamte Lösung konnte im Rahmen vom KTI Projekt als Prototyp wie beschrieben realisiert und getestet werden. Nun geht es darum in einem zweiten Teil den „Prototypen“ in ein marktaugliches Modul zu überführen und zu industrialisieren.

Im zweiten Teil werden wir ein einfaches kompaktes VLC-Modul für Stehleuchten und Leuchten in Durchgangszonen entwickeln. Das VLC-Modul beinhaltet einen PIR Sensor (Präsenzmelder), einen Sensor zur Tageslichtregelung und einen Visible-Light-Communication Sender und Empfänger, sowie den Stromregler zur Ansteuerung der LED. Dieses kompakte Modul kann dann ohne grossen Aufwand in beliebige Leuchten eingebaut werden. Ohne Konfiguration, Adressierung oder dergleichen sind einfach Lichtregelungen und Schwarmlösungen realisierbar. Die Leuchten werden in der Lage sein, einfache Broadcast Befehle auszuführen um z.B. alle Leuchten einzuschalten wenn z.B. einmal das Büro gereinigt werden sollte.



Abb. 4: Bürobeleuchtung ohne Schwarmfunktionalität



Abb. 5: Bürobeleuchtung mit Schwarmfunktionalität

Beurteilung von Alterungsdaten von Farbsensoren für den Einsatz in Multikanal LED-Leuchten

*Matthias Szarafanowicz, Sebastian Beck, Tran Quoc Khanh,
TU Darmstadt Fachgebiet Lichttechnik*

Problemstellung und Forschungsfragen

Farbsensor basierte Farbortregelung in Multikanal LED-Leuchten setzen voraus, dass die spektralen Empfindlichkeiten sowohl der emittierten Strahlung der LED-Leuchte sowie der Tristimuluswerte des Menschen genügen. Hierzu werden die Schwierigkeiten untersucht, welche aufgrund von Alterungserscheinungen der Farbsensoren bei der Farbortbestimmung und der damit zusammenhängenden Farbortregelung entstehen.

Stand der Wissenschaft/Technik

Eine intelligente Farbortregelung mit Hilfe von Farbsensoren, welche es erlaubt eine konstante Lichtsituation über einen langen Zeitraum zu halten ist noch immer eine schwere Aufgabe. Die Alterung der LEDs und die damit verbundene Intensitätsdegradation und Wellenlängenverschiebung ist bereits gut bekannt und vielfach untersucht. Dieses erschwert die Anwendung von Farbortregelungen. Zur Zeit existieren zwei unterschiedliche Ansätze für die Empfindlichkeiten der Farbsensoren, die eine arbeitet mit RGB Filtern während die andere versucht die Empfindlichkeitskurven des CIE-2°-Normalbeobachters zu simulieren. Man erhält keine Information über Alterungserscheinungen dieser Sensoren und die damit verbundenen Schwierigkeiten für die Farbortregelung.

Forschungshypothesen

In diesem Paper wird das Konzept des Vortests zur Farbsensoralterung mit Hilfe von 16 unterschiedlichen Umgebungsbedingungen erläutert. Anhand von ersten Charakterisierungen zur Nullten Stunde $t = 0h$ für Farbsensoren werden erste Ergebnisse diskutiert und Auswirkungen auf die Farbortregelung erläutert.

Versuchsaufbau

Für unsere Forschung verwenden wir fünf representative Farbsensoren, welche frei auf dem Markt zu erwerben sind. Es werden alle Farbsensoren absolut spektral vermessen. Hierzu verwenden wir eine 300W Xe-Lichtquelle. Die Strahlung wird mit Hilfe eines Linsensystems in einen Czerny-Turner-Monochromator (LOT) eingekoppelt. Anschließend wird das monochromatische Licht in eine Ulbricht Kugel geleitet um eine homogene Leuchtdichte zu erzeugen. Die Sensoren werden vor der Alterung bei $t = 0h$ spektral vermessen und anschließend alle 100 h. Für jeden Sensortyp wird ein Referenzsensor selektiert, welcher nicht gealtert wird. Die Alterung wird unter vier Temperaturen 30°C, 50°C, 70°C und 120°C und vier unterschiedlichen Lichtsituationen durchgeführt. Die Sensoren werden während der Alterung alle 10 min. ausgelesen um eine möglichst anwendungsnahe Situation zu erreichen.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Mit dem besten Wissen existieren keine signifikanten Daten in diesem Bereich.

Estimation and First Ageing Results of Colour Sensors for a Feedback Control in Multichannel LED-Luminaires

*Matthias Szarafanowicz, Sebastian Beck, Tran Quoc Khanh,
TU Darmstadt Fachgebiet Lichttechnik*

Research issue

Sensor based Feedback control, for LED multi channel luminaires, requires sensors with colour sensitivities which match the spectrum of the excited light on the one hand and on the other the tristimulus values as good as possible. We examine the possible difficulties for the colour feedback control by aging the colour sensor as well as the emitting LEDs.

State of science/technology

Feedback control for stable light applications is a challenging task and is still not fully established. The behaviour of LED aging with its luminous flux degradation and colour shift is well known and still topic of science. The main issue for stable colour control is to persist in time. There are at least two different kinds of Sensors which are used for such a feedback control. One technique uses RGB absorption filters and the other one tries to mimic the tristimulus values via interference filters. There are no further researches on the topic of aging of colour sensors and the effects on feedback control to the best knowledge of the authors.

Research hypothesis

The aim of this paper is an estimation on the effects of different conditions for colour sensor for a later on established aging setup. Therefore a Pretest is explained with 16 different conditions and the first characterisations of colour sensors are evaluated.

Experimental setup

For our research we use 5 different colour sensors available on the market. We measure all the sensor sensitivities absolute, with a high reflective integrating sphere (lampsphere) and a spectral radiometer (CAS 320). The light source for this measurement is a 300 W Xe-lamp following by a Czerny-Turner monochromator (LOT). The sensitivities are measured once at $t = 0h$, before starting the aging and then every 100 hours. For every type of sensor we keep one reference which is not aged. The aging happens at different conditions i.e. four different Temperatures 30°C, 50°C, 70°C and 120°C and different lighting conditions. The Sensors are read out every 10 min. to get significant results in time. With these measurements our goal is to develop a colour feedback control that is independent from led and sensor aging.

Results in comparison with previous findings

There are no results yet concerning sensor aging in colour feedback control to the best knowledge of the authors.

Estimation and First Ageing Results of Colour Sensors for a Feedback Control in Multichannel LED-Luminaires

*Matthias Szarafanowicz, Sebastian Beck, Tran Quoc Khanh
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik,
Technische Universität Darmstadt, Hochschulstraße 4a 64289*

Abstract

In this work we describe why we can use colour sensors for a colour feedback control in LED-luminaires. We describe the state of the art sensors for that purpose and why we need to take ageing effects of colour sensors in account. We show how the sensors are characterized and how our approach for dor colour sensor ageing will look like. First characterisation results of a thermal behaviour of a colour sensor is evaluated and discussed.

1 Introduction

With the development of LEDs in 1962 a new era of lighting started. Back then it was difficult to imagine where this technology would lead us. Now we can find LEDs in almost every domain in our live. They are used in street lighting [1] in automotive lighting in headlamps and tail lights [2,3] and they are used more and more in office and home lighting application [4]. First the argumentation for LEDs were the high efficiency but as LEDs evolved more emission spectra became possible, so that discussions about changeable lighting conditions and new standards for quality of light started [5]. But still there are problems with binning and aging effects and the resulting colour shift of LEDs [6,7]. The changeability results in multi LED-channel luminaire by mixing different kinds of spectra. For the above mentioned problems together with the conditions to get a well accepted and changeable light, it is important to have a very well working feedback control. That control should detect differences of the desired and configured light and if a threshold is exceeded to control the different LED channels and attune the light condition. For this purpose colour sensors are one possibility as they can detect the colour of the emitted light. As we are talking about colour feedback control we are interested in long-time stability of light output. So it is essential to know if the sensitivity of the used detector changes with time, named if it ages.

2 Colour Sensors

In this work we used five different colour sensors available on the market. The sensors consist of a detector which enables to detect the colour of the incident light and electronic components to convert the detection signals into data, which can be used for evaluation and further to calculate colour coordinates.

These detectors consist like every other colour sensor of two fundamental components i.e. photodiodes and colour Filters. Photodiodes are semiconductor devices with a p-n-junction. The spectral sensitivity of the photodiode depends on the energy bandgap

between the valence and the conduction (electron) band, which defines the upper bound for long wavelength and on the photodiode layout i.e. the used material and the thickness between the surface and the depletion region.

The size of this bandgap depends on the used material and varies with temperature [8]. For silicon at a temperature of 300 K it is 1.12 eV [8,9]. This physical quantity defines the energy threshold for the incident photons to break the covalent bond and produce a free electron in the semiconductor lattice, which leads to a current. This current is proportional to the incident light on the photodiode.

Photodetectors tend to be linear, which means that the produced current is directly proportional to the incident photons. This linear behaviour is crucial for a good and easy calibration and evaluation [10,11]. The Photodiodes are necessary to detect light, often Si PN or Si PiN Diodes are used. While the Si PN diodes are semiconductors with a P- and an N-layer, PiN semiconductors have an additional intrinsic layer, which increases the depletion region. They have to be reverse biased for operation, this generates a high dynamic range application with the cost of an introduced noise (dark and noise current).

As the photodiodes get smaller it is possible to build integrated colour detectors with implemented current to voltage converter. This shrinking could lead to problems during lifetime for example with humidity [12].

Second component of a colour Sensor is the optical filter, which allows to filter only desired light. Not until three different colour filter are used it is possible to quantise colour [14].

These are in general red, green and blue (RGB) filter, for simulating the human eye perception. To get even better results in comparison to the RGB-Filter the filters are optimized to fit the human tristimulus values, these colour sensors are called True Colour Sensors (XYZ).

There are two types of colour filter technologies. One is based on absorption, that means that light which is incident on the glass with it intrinsic compounds is partly absorbed and partly transmitted with respect to the law of Beer-Lambert-Bouguer Law eq.: (1) [15].

$$E_{\lambda} = \lg \left(\frac{I_0}{I_1} \right) = \epsilon_{\lambda} \cdot c \cdot d \quad (1)$$

With E_{λ} the wavelength dependent extinction, I_0 the intensity of the incoming light, I_1 the intensity of the transmitted light, ϵ_{λ} the molar attenuation coefficient, c the molar concentration and d the layer thickness [13].

The added compounds to the glass or plastic are chosen to transmit blue, red and green light. The problem of the absorption is the deposit of energy or aging of the material which could lead to colour fading and consequently to a sensitivity change of the colour detector.

In comparison the other technique uses dichroic filter, which are based on the interference principles. The filter are normally build by adding different layers of different thickness and refraction index n_i on a glass substrate, thus they build a thin film layer where light with different wavelength λ interfere differently with respect to eq.: (2).

$$m \cdot \lambda = 2d \cdot \sqrt{n_{layer}^2 - \sin^2(\epsilon)} \quad (2)$$

for integer multiples m of the wavelength λ for constructive interference, d the thickness of the layer, n_{layer} the refractive index of the layer and ϵ the angle of incidence of light.

The interference or dichroic filter as one can see in eq.: (2) are dependent on the thickness d and the angle of incidence ϵ .

Therefore for getting good and constant results from the colour detector it is important to limit the angle of incidence and build the filters upon a material which does not expand too much with change of temperature. As the absorption of dichroic filter is vanishing small there are no fading and only vanishing aging effects for that type of filter [16]. Due to these physical and technical issues it is worth to take some considerations about ageing aspects of colour sensors and their consequences for measuring into account.

3 Experimental Setup

Colour sensors consist of a colour detector, which is build with photodiodes and at least three colour filters and the electronics for data acquisition. As photodiodes consist of semi-conductors and the used filter, dependent on their build technique, underlie physical laws of ageing it is convenient to determine ageing effects of colour sensors to determine if these could be used for a long time colour feedback control for (Light Emitting Diode) LED-luminaires.

3.1 Characterisation Setup

For characterising colour sensors it is crucial to have a known light source and fully variable control of constraints. Our setup seen in Figure 1 consists of a Xenon 300 W high

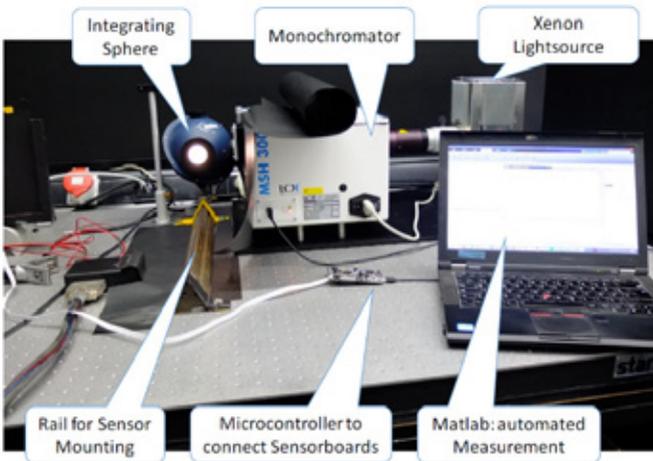


Figure 1 Characterisation Setup with Integrating sphere, Xe Lightsource, Monochromator Microcontroller and PC for evaluation.

pressure lamp. The light is coupled into a Czerny-Turner monochromator via a condenser lense and an adjustable slit for determining the maximum resolution of the monochromator.

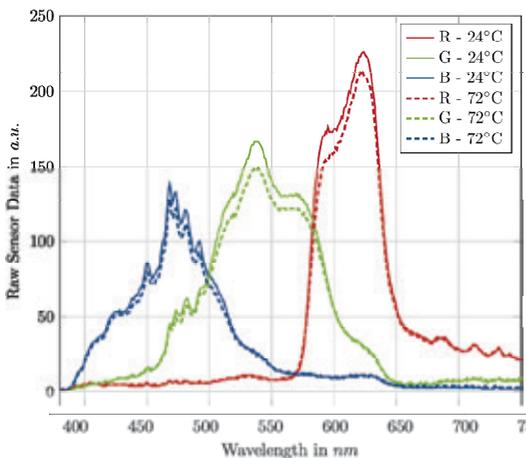
The monochromator is tunable via a matlab software in one nanometer (nm) steps with a tunable fullwidth at half maximum (FWHM) of minimal 1.8 nm to 4 nm. At the

monochromator output slit an integrating sphere is flange-mounted to couple as much light as possible into the sphere. The integrating sphere consist three ports, the entrance port and to output ports one for the colour sensors and one to measure the spectral radiance. Inside the inte-

grating sphere are three baffles in front of every port to shield the direct light, so that only the scattered light falls on the detectors and colour sensors respectively. The output port has normally an 3" diameter but is reduced by a port reducer to 2" to get rid of the inhomogeneity of luminance produced due to the baffles. Because of the multiple reflexions inside the integrating sphere we get an undirected monochromatic light output for the sensor characterisation. In front of the sensor output port we installed a scaled rail to be able to define a reproducible distance between the light output and the colour sensor. Between these two we place a mount for different pinhole apertures to be able to change the angle of incidence in a wide range. The colour sensor boards are installed to a mount, which fits on the rail. The mount can be rotated in two axes, while the sensor stays in the origin, so that it is possible to change the angle of incidence without changing the distance to the light source. The direct mount area is made of copper for the thermal coupling. The temperature is measured at the height of the colour sensor inside the copperplate with a PT-100 temperature sensor. The temperature is controlled via a temperature controller (Thorlabs) and a Peltier element. The colour sensors are soldered to an aluminium core board to get a good thermal coupling. The surface is coated black matt to prevent most of scattered light. The whole setup is automated and can be controlled by a matlab script.

3.2 Ageing Setup for Pretest

To get good results in an ageing experiment it is crucial to define parameters, which could be measured independently from each other. Therefore a pretest is designed to have the possibility to get some first results and possible boundaries without too much Data and statistics. Nine boxes were built in which different conditions could be implemented. One box could be splitted into two sections that makes a maximum of 18 different conditions which could be investigated. We decided to examine four different temperature and four different illumination conditions. The illumination of the sensors is done by a four channel LED-board to generate a broad spectrum and to be close to the application. The LEDs will



also be measured at $t = 0$ h and at the end of every period to exclude the aging of the LEDs. It is also crucial to isolate every sensor batch and its measured condition to get unambiguous results of the tested and analysed parameter, only. The boxes are designed so that most of the mixed 4 LED-channel light falls with the same quantity on every sensor in the batch. The sensor will be read out every hour to simulate a colour feedback control application. With this we expect to get good first results and defined boundaries for the long-term ageing setup for different colour sensors.

Figure 2 Temperature dependency of S11059. Measured with 10 observer. Raw ADC sensor data displayed in a.u. .

4 First Results

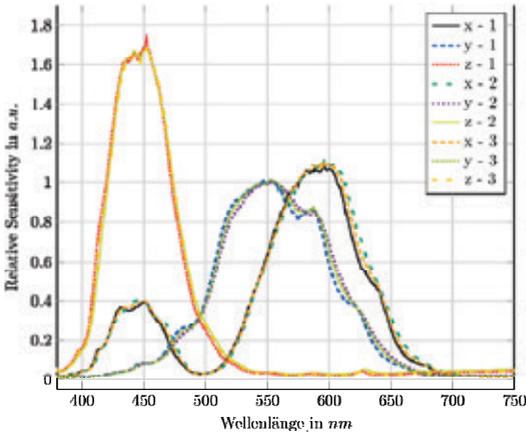


Figure 3 Comparison of three different true colour sensors. Sensor curves are normalized to 550nm.

The change occurs with a maximal drift of 7 nm due to an increase in temperature. The maximal drift occurs in the red region, which shows that this area is more sensitive than the blue. These drifts show the changeability of spectral sensitivity based on changing environmental conditions like the temperature. Which leads to a cause to investigate the ageing behaviour. In a second measurement different sensors of the same type are compared to investigate the constancy of manufacturing of the used colour sensors shown in Figure 3. The measured spectral sensitivity curves are normalized at 550nm to 1. The qualitative spectral response does not change much, the intensities vary only slightly at maximum about 0.05, but the wavelength differs up to 6 nm. This result illustrates that with these variations it is crucial to know the spectral response of a sensor to be able to recalibrate it, if absolute values of measurements are required.

5 Conclusion

In order to use colour sensors for a longtime stability colour feedback control a good estimation of ageing effects for colour sensors is crucial. In this work we designed a pretest to define boundaries for future ageing setups. Therefore 16 different chambers are built in which different lighting and temperature conditions could be set. These are chosen to be application-related plus one extreme condition to get an accelerated ageing. Temperatures from 25°C to 150°C and four different lighting conditions from 0 lm to 5000 lm will be implemented. The first characterization measurements show a variety of the spectral sensitivities of the same type of sensor and a spectral shift while varying the temperature. These discrepancies must be eliminated and ageing effects must be excluded to yield a reliable sensor for colour feedback control of multichannel LED-luminaires.

Before the colour sensor will be aged a characterisation of every single sensor is necessary. These measurements are done with the characterisation setup explained above. For the measurement compare Figure 2. The response functions were plotted over the wavelength with the variation of temperature. Shown are only two different temperatures i.e. 24°C and 77°C for clarity. Evaluations of the first measurements at $t = 0 h$ show a shift in intensity with a maximum variation of 11.7 % for the sensor, this shift occurs because of an increase of the photodiode's dark current. The spectral

6 References

- [1] D. Senff, *Kommunen in neuem Licht und die LED Leitmarktinitiative*, Berlin, 2014.
- [2] T.Q. Khanh (Ed.), *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Herbert Utz Verlag GmbH, München, 2015.
- [3] M. Sivak, B. Schoettle, T. Minoda, M.J. Flannagan, *Blue content of LED headlamps and discomfort glare*, Ann Arbor, 2005.
- [4] M. Islam, R. Dangol, M. Hyvarinen, P. Bhusal, M. Puolakka, L. Halonen, *User acceptance studies for LED office lighting: Lamp spectrum, spatial brightness and illuminance*, LRT 47 (2015) 54–79.
- [5] V. Viliunas, H. Vaitkevicius, R. Stanikunas, A. Svegza, Z. Bliznikas, *LED-based metameric light sources: Rendering the colours of objects and other colour quality criteria*, LRT 43 (2011) 321–330.
- [6] T.Q. Khanh, P. Bodrogi, *Farbbinning für weiße LEDs: Notwendigkeit, Entwicklung eines wahrnehmungskorrekten Skalierungssystems: 66. Erg.-Lfg. 12/14 - Kap. I - 6.13.15*, in: H. Lange (Ed.), *Handbuch für Beleuchtung*, 5th ed., ecomed Sicherheit, Landsberg, 1992, pp. 1–6.
- [7] M. Wagner, A. Herzog, H. Ganey, T.Q. Khanh, *LED aging acceleration – an analysis from measuring and aging data of 14,000 hours LED degradation*, in: CSA (Ed.), *Proceedings of the 12th China International Forum on Solid State Lighting*, 2015.
- [8] W. Bludau, A. Onton, W. Heinke, *Temperature dependence of the band gap of silicon*, J. Appl. Phys. 45 (1974) 1846.
- [9] J. Gryko, P.F. McMillan, R.F. Marzke, G.K. Ramachandran, D. Patton, S.K. Deb, O.F. Sankey, *Low-density framework form of crystalline silicon with a wide optical band gap*, Phys. Rev. B 62 (2000) R7707-R7710.
- [10] Atte Haapalinnna, Toomas Kõrbarsepp, Petri Kõrre and, *Measurement of the absolute linearity of photodetectors with a diode laser*, Meas. Sci. Technol. 10 (1999) 1075–1078.
- [11] L. P. Boivin, *Automated Absolute and Relative Spectral Linearity Measurements on Photovoltaic Detectors*, Institute for National Measurements Standards, 355–360.
- [12] S.T. Patton, K.C. Eapen, J.S. Zabinski, *Effects of adsorbed water and sample aging in air on the μN level adhesion force between Si(100) and silicon nitride*, Tribology International 34 (2001) 481–491.
- [13] P.(C. Spindler, *Annalen der Physik (Leipzig)*.
- [14] G. Wyszecki, W.S. Stiles, *Color science: Concepts and methods, quantitative data, and formulae*, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc, New York, 2000.
- [15] D. F. Swinehart, *The Beer Lambert Law*, Journal of Chemical Education (1962) 333–335.
- [16] S. W. WARREN, *Properties and performance of basic designs of infrared interference filters: S.T.C., Rectifier Division, Edinburgh Way, Harlow, Essex, Infrared Physics*, 1968, Vol. 8 Pergamon Press. Printed in Great Britain pp. 65–78.

Adaptive tageslichtabhängige Lichtsteuerung für nicht-visuell wirksame Beleuchtung

Nils Weber, Martine Knoop, Stephan Völker, Technische Universität Berlin

Problemstellung

Beleuchtungslösungen zur Realisierung nicht-visueller Wirkungen, wie z. B. zur Verbesserung von Konzentration, Gesundheit und Wohlbefinden (Human Centric Lighting), erfordern höhere Lichtniveaus, vorzugsweise in kühlerer Lichtfarbe. Um eine ausreichende Lichtdosis (hier: Lichtniveau und spektrale Zusammensetzung mal Zeit) zu erzielen, verbrauchen sie mehr Energie als Lichtlösungen, die nur die Mindestanforderungen aus der Norm erfüllen. Wo heutige Human Centric Lighting Lösungen das Kunstlicht für die benötigte Beleuchtung nutzen, kann eine Herangehensweise die das Tageslichtangebot als Ausgangsgröße nimmt, und die künstliche Beleuchtung vor allem als Ergänzung versteht, zu einer erheblichen Energieeinsparung führen. Tageslichtabhängige Lichtmanagementsysteme und nicht-visuell wirksame Beleuchtung sind seit einigen Jahren auf dem Markt erhältlich. Derzeit werden beide Systeme jedoch meist unabhängig voneinander betrachtet. Insbesondere werden die spektralen Eigenschaften des Tageslichts nicht als ein Anteil der benötigten Lichtdosis berücksichtigt.

Ziel

Das Konzept basiert auf der Idee, Informationen über Niveau und spektrale Zusammensetzung des Tageslichtes zu nutzen um nicht-visuelle Wirkungen zu realisieren, während der Energieverbrauch für die gesamte Beleuchtungslösung reduziert wird. Der Aufbau wird hier in drei Phasen gegliedert:

1. Bestimmung der Tageslichtsituation
2. Festlegung der Nutzeranforderung
3. Technische Realisierung, Aufbau eines Prototyps

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Da eine tageslichtabhängige Lichtsteuerung für nicht-visuell wirksame Beleuchtung eine Analyse der Tageslichtsituation voraussetzt, muss diese genau bestimmt werden. Hier sollen spektrale Himmelsmodelle die Grundlage bilden, welche eine Erweiterung der CIE Standard General Skies darstellen und derzeit an der Technischen Universität Berlin entwickelt werden. Bisher ist ein erheblicher Messaufwand zur Bestimmung der Himmelsmodelle notwendig. Um den Messaufwand und somit die Kosten zu senken, soll untersucht werden, ob mit einer geringen Sensoranzahl eine Aussage über den (spektralen) Himmelstyp getroffen werden kann.

Realisierungsgrad

Die Arbeiten an diesem Projekt befinden sich in der Anfangsphase und derzeit werden für den Projektteil ‚Bestimmung der Tageslichtsituation‘ Messdaten ausgewertet. Mehr und aktuelle Informationen: http://www.li.tu-berlin.de/menue/ueber_uns/mitarbeiter/nils_weber/

Adaptive daylight responsive control for non-visual effective lighting

Nils Weber, Martine Knoop, Stephan Völker, Technische Universität Berlin

Issue

Lighting solutions to realise non-visual effects usually need higher lighting levels, preferably with a higher colour temperature, in order to improve concentration, health and wellbeing. Thus, the amount of electrical power to achieve an appropriate light dose (light level and colour temperature multiplied with time) is much higher than for a lighting solutions that fulfils standard requirements. At the moment these so called, 'Human Centric Lighting' solutions use artificial light only. Using daylight as the primary source and artificial light as a supplementary source offers large energy savings potential.

Daylight responsive lighting controls and non-visual effective lighting have been available for some years. However, currently these two solutions are treated independently. Additionally to that, the spectral characteristics of the daylight are not considered as a part of the needed light dose for non-visual effects.

Aim

The aim of the project is to develop a new lighting control strategy. This strategy is based on the idea to use information about the level and spectral composition of the available daylight to realize non-visual effects, while consequently reducing energy consumption for the overall lighting solution. The structure of this project can be divided into three phases:

1. Analysis of the daylight situation
2. Definition of user requirements
3. Technical implementation, construction of a prototype

Description of the innovation/»best practice«

To create a daylight responsive lighting control for non-visual effective lighting, the daylight conditions need to be analysed precisely. For this purpose, spectral sky models, an extension of the 'CIE Standard General Skies' for standardised luminance distribution, are being developed at the technical university of Berlin at present. In order to determine the prevailing (spectral) sky model, a high measurement effort is currently necessary. To reduce this effort and simultaneously the costs, the research will look into the simplification of the measurement process, using a small number of sensors for the assessment of the prevailing daylighting conditions.

Level of realization

The work is in an initial phase. For more and up-to-date information please visit my website: http://www.li.tu-berlin.de/menue/ueber_uns/mitarbeiter/nils_weber/

Adaptive tageslichtabhängige Lichtsteuerung für nicht-visuell wirksame Beleuchtung

*Nils Weber, Martine Knoop, Stephan Völker, Technische Universität Berlin
Einsteinufer 19, 10587 Berlin*

Inhalt

Beleuchtungslösungen zur Realisierung nicht-visueller Wirkungen und tageslichtabhängige Lichtmanagementsysteme sind seit einigen Jahren erhältlich, werden derzeit jedoch leider unabhängig voneinander betrachtet. Mit dem hier vorgestellten Projekt soll eine nicht-visuell wirksame Beleuchtungsstrategie vorrangig durch das zur Verfügung stehende Tageslicht realisiert werden und die künstliche Beleuchtung nur als Ergänzung verstanden werden. Hierzu muss jedoch bekannt sein, an welcher Stelle wie viel Tageslicht und mit welchen spektralen Anteilen verfügbar ist. In dem hier beschriebenen, ersten Teilprojekt wird auf eine vereinfachte Bestimmung des Tageslichtangebots eingegangen, bei der Leuchtdichte und Farbtemperatur örtlich aufgelöst erfasst werden.

1 Problemstellung

Lichtlösungen zur Verbesserung von z. B. Konzentration, Gesundheit und Wohlbefinden (Human Centric Lighting) erfordern höhere Lichtniveaus, vorzugsweise in kühlerer Lichtfarbe. Sie verbrauchen mehr Energie als Lichtlösungen, die nur die Mindestanforderungen aus der Norm erfüllen (z. B. 25-50 kWh/m²Jahr statt 15-25 kWh/m²Jahr in Bürogebäuden). Wo heutige Human Centric Lighting Lösungen das Kunstlicht für die benötigte Beleuchtung nutzen, kann eine Herangehensweise die das Tageslichtangebot als Ausgangsgröße nimmt, und die künstliche Beleuchtung vor allem als Ergänzung versteht, zu einer erheblichen Energieeinsparung führen.

Tageslichtabhängige Lichtmanagementsysteme und nicht-visuell wirksame Beleuchtungskonzepte sind seit einigen Jahren auf dem Markt erhältlich. Derzeit werden beide Systeme jedoch meist unabhängig voneinander betrachtet. Insbesondere werden die spektralen Eigenschaften des Tageslichts nicht als ein Anteil der benötigten Lichtdosis (hier: Lichtniveau und spektrale Zusammensetzung mal Zeit, vgl. /1/) berücksichtigt. Dabei erzielen unterschiedliche Spektren bei gleicher Beleuchtungsstärke am Auge eine unterschiedliche nicht-visuelle Wirkung. Dies macht eine integrale Analyse des Tageslichts erforderlich. Die vorhandene Dosis durch Tageslicht sollte mit Hilfe des Lichtniveaus und der spektralen Verteilung des momentanen Tageslichtangebotes bestimmt und für die Lichtsteuerung der künstlichen Beleuchtung genutzt werden. Eine Energieeinsparung ist zu erwarten, da ein hohes Tageslichtangebot und/oder kühlerer Lichtfarbe gezielt genutzt werden können, um diese Lichtdosis zu erreichen.

Ziel des hier vorgestellten Projektes ist es, ein Konzept für eine Lichtsteuerung für die künstliche Beleuchtung von Bürogebäuden zu erstellen, mit dem durch Tageslichtnutzung der Energieverbrauch minimiert und gleichzeitig die Beleuchtungsqualität gesteigert wird. Der Aufbau einer solchen Steuerung wird hier in drei Phasen gegliedert.

1. Bestimmung der Tageslichtsituation: In der ersten Phase muss das im Außenraum zur Verfügung stehende Tageslicht erfasst und analysiert werden, um die Tageslichtbedingungen im Innenraum zu bestimmen.
2. Festlegung der Nutzeranforderung: In der zweiten Phase gilt es die gewünschte/geforderte Beleuchtung für nicht visuelle Wirkungen fest zu legen, beziehungsweise verschiedenen Nutzerprofile zu entwerfen, die definieren in welcher Anwendung welche spektralen Anteile mit welcher Bestrahlungsstärke bereitgestellt werden sollen.
3. Technische Realisierung: Wenn Phase 1 und 2 abgeschlossen sind, wird eine Steuerung entworfen und ein Prototyp aufgebaut.

Die Arbeiten an diesem Projekt befinden sich in der Angangsphase. Derzeit werden im Projektteil ‚Bestimmung der Tageslichtsituation‘ Messplätze aufgebaut und erste Messdaten ausgewertet.

2 Bestimmung der Tageslichtsituation im Innenraum

Für die Realisierung der hier beschriebenen Lichtsteuerung muss die Tageslichtsituation genau erfasst werden. Neben der horizontalen Beleuchtungsstärke sind hier auch die vertikale Beleuchtungsstärke sowie die Farbtemperatur des einfallenden Lichtes von Bedeutung.

Die Bestimmung der Lichtsituation wird in zwei Arbeitsbereiche unterteilt und im Folgenden beschrieben.

2.1 Vereinfachte Messung spektraler Himmelstypen

Um das für jeden Raum zur Verfügung stehende Tageslicht beurteilen zu können, soll die Lichtsituation mit Hilfe von Himmelsmodellen beschrieben werden. Im Gegensatz zu den klassischen Himmelsmodellen, wie die CIE Standard General Skies /2/ oder das All-Weather Model /3/, die nur die Leuchtdichteverteilung beschreiben, sollen spektrale Himmelsmodelle zum Einsatz kommen. Neben der räumlich aufgelösten Leuchtdichte sollen hier auch Informationen über die Farbtemperatur verschiedener Himmelsbereiche pro Himmelsmodell integriert werden. Derzeit werden diese spektralen Himmelsmodelle an der Technischen Universität Berlin entwickelt (/4/, /5/). Hauptziel dabei ist es, pro Himmelsmodell, eine Rekonstruktion der ähnlichsten Farbtemperatur aus der Himmelsleuchtdichte zu ermöglichen. Diese Methodik wurden von Chain /6/ vorgeschlagen, und nutzt einen ‚Leuchtdichte im Bezug zur ähnlichsten Farbtemperatur‘-Faktor, die Sonnenhöhe, den Himmelstyp, sowie Indizes für Klarheit und Helligkeit des Himmels um die spektralen Daten des Tageslichtes direkt aus der Himmelsleuchtdichte abzuleiten. Diese Herangehensweise wird an der TU Berlin mit Messungen eines spektralen Sky Scanners /7/ überprüft. Alternativ werden analog zu der Ableitung des Himmelsmodells mit Hilfe der Leuchtdichteverteilung, die spektralen Himmelsmodelle nach Farbort- oder ähnlichste Farbtemperaturverteilung festgelegt.

Die Charakterisierung einer Tageslichtsituation mit Hilfe der Himmelsmodelle ist jedoch nur möglich, wenn entsprechende Messwerte vorliegen. Das All-Weather Model von Perez basiert auf Messungen der diffusen und direkten Bestrahlungsstärke. Wird ein CIE Standard General Sky nach Tregenza /8/, Kittler /9/ oder Kobav /10/ bestimmt, muss die

Leuchtdichte der Himmelskuppel in 145 festgelegten Bereichen, so genannte ‚sky patches‘, abgetastet werden. Anschließend werden, zum Beispiel im Falle der Tregenza-Methode, die Leuchtdichteverteilung der Himmelssituation mit der Verteilung jeder der 15 CIE Standard General Skies verglichen. Die vorhandene Himmelssituation wird daraufhin durch den CIE Standard General Sky mit der geringsten Abweichung definiert. Voraussichtlich können die spektralen Daten der Himmelssituation direkt abgeleitet werden, oder diese müssen mit Hilfe zusätzlicher Messungen in 145 sky patches bestimmt werden.

Ziel des hier beschriebenen Teilprojektes ist es diesen Messaufwand zu reduzieren, zu vereinfachen und kostengünstiger zu gestalten. Durch Berücksichtigung von Daten wie den Bewölkungsgrad soll auch mit einer geringen Sensoranzahl eine Aussage über den (spektralen) Himmelstyp getroffen werden können. In einem ersten Schritt erfolgt dies durch Analyse der Messungen des spektralen Sky Scanners, in einem zweiten Schritt sollen Messdaten mit einem Prototyp erhoben werden.

2.2 Spektral von Exterieur zu Interieur

Durch den Einsatz von tageslichtabhängigen Steuerungen kann der Energiebedarf der künstlichen Beleuchtung bekanntermaßen gesenkt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, werden verschiedene Systeme verwendet. Im Wesentlichen gibt es Steuerungs- und Regelungssysteme mit einem komplexeren Außen-Sensor oder lokale Sensoren zur Bestimmung der horizontalen Beleuchtungsstärke im Innenraum. Mit Außen-Sensoren können neben der horizontalen Beleuchtungsstärke jedoch auch Fragestellungen wie Blendung, solarer Energieeintrag oder vertikale Beleuchtungsstärke berücksichtigt werden. Bei allen bekannten Systemen bleibt eine spektrale Analyse oder der Farbort des einfallenden Lichtes bisher jedoch unberücksichtigt.

Bei dem hier vorgestellten Forschungsprojekt werden mehr Zielparameter als die horizontale Beleuchtungsstärke benötigt und später möglicherweise weitere hinzugefügt werden. Während gebräuchliche Lichtsteuerungen das Lichtniveau auf einer festgelegten horizontalen Referenzfläche nutzen, muss für die nicht-visuelle Wirkung das Tageslichtangebot sowohl in Niveau als auch in Lichtfarbe auf vertikalen Flächen überprüft werden. Eine Bestimmung dieser Werte ist über Sensoren, die in Leuchten oder an Decken montiert sind, problematisch. Aus diesem Grund wird der Ansatz mit einer außenliegenden Messstation verfolgt.

Am Ende dieses Forschungsabschnittes soll die Tageslicht-Beleuchtungssituation im Gebäude lichttechnisch sowie spektral aus den Messdaten aus 2.1 berechnet werden können, um eine Steuerung der künstlichen Beleuchtung zu ermöglichen. Hierfür soll die mit bestehender Software (z.B. FENER /11/) berechnete Beleuchtungsstärke um die spektrale Zusammensetzung des einfallenden Tageslichtes ergänzt werden. Außerdem wird untersucht, ob zusätzliche Sensoren notwendig sind, um situationsspezifische Parameter (z. B. Fenstergröße und Position des Arbeitsplatzes) in der Lichtsteuerung zu berücksichtigen.

Zusammenfassung und Ausblick

Im hier vorgestellten Forschungsprojekt soll eine tageslichtabhängige Lichtsteuerung für nicht-visuell wirksame Beleuchtung entworfen werden. Für die nicht-visuelle Wirkung gelten vertikale Beleuchtungsstärke am Auge sowie spektrale Zusammensetzung der dort auftretenden Strahlung als wichtigste Parameter. Derzeit ist ein erheblicher Messaufwand

zur Bestimmung der Himmelsbedingungen notwendig. Um eine praxistaugliche Lösung zu realisieren, wird untersucht ob mit einer geringen Sensoranzahl auch eine Aussage über den (spektralen) Himmelstyp getroffen werden kann.

Mehr und aktuelle Informationen können Sie auf der Website des Fachgebiets Lichttechnik finden: http://www.li.tu-berlin.de/menue/ueber_uns/mitarbeiter/nils_weber/

Literatur

- /1/ CIE (2016). CIE 218:2016 Research Roadmap for Healthful Interior Lighting Applications. ISBN 978-3-902842-58-9. CIE, Vienna.
- /2/ CIE (2003). CIE Publication S 011.1/E:2003 (ISO 15469:2004). Spatial Distribution of Daylight – CIE Standard General Sky. CIE, Vienna.
- /3/ PEREZ, R., SEALS, R., MICHALSKY, J. (1993). Modeling skylight angular luminance distribution from routine irradiance measurements. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, **22**(1):10-17.
- /4/ KNOOP, M., DIAKITE, A., RUDAWSKI, F. (2015). Methodology to create spectral sky models to enable the inclusion of colorimetric characteristics of daylight in research and design. In: Proceedings of the 28th session of the CIE, Manchester, United Kingdom, Juni 28 - Juli 4, 2015, S. 564-573.
- /5/ DIAKITE, A., KNOOP, M., BREMER, S., VÖLKER, S. (2016) Praktische Anwendbarkeit der spektralen Himmelsmodelle im städtischen Planungsprozess. In: Tagungsband Licht2016, Karlsruhe, Germany, September 25 – September 28. 2016
- /6/ CHAIN, C. (2004). Caractérisation spectrale et directionnelle de la Lumière naturelle : Application à l'Éclairage des Bâtiments. Thesis of ENTPE, Laboratoire des Sciences de l'Habitat, Département Génie Civil et Bâtiment.
- /7/ KNOOP (2014) Analysis of spatially resolved measurements approaches to assess spectral characteristics of sky patches. In: CIE x039:2014 Proceedings of CIE 2014 Lighting Quality & Energy Efficiency, Kuala Lumpur, Malaysia, April 23 - April 26, 2014, S. 130-139.
- /8/ TREGENZA, P. R. (2004). Analysing sky luminance scans to obtain frequency distributions of CIE Standard General Skies. *Lighting Research and Technology*, **36**(4):271-279.
- /9/ KITTLER, R. (1993). Relative scattering indicatrix: derivation from regular radiance/luminance distribution sky scans. *Lighting Research and Technology*, **25**(3):125-127.
- /10/ KOBAV, M.B., BIZJAK, G., DUMORTIER, D. (2013). Characterization of sky scanner measurements based on CIE and ISO standard CIE S 011/2003. *Lighting Research and Technology* **45**(4):504-512.
- /11/ BUENO, B., WIENOLD, J., KATSIFARAKI, A., & KUHN, T. E. (2015). Fener: A radiance-based modelling approach to assess the thermal and daylighting performance of complex fenestration systems in office spaces. *Energy and Buildings*, **94**:10-20.

Und – was neues ... ? Was *wirklich* neues ... ?

Herbert Cybulska

Cybulska und Partners Lighting Solutions

Was bewirkt der Einsatz digitaler Leuchten in der klassischen Bühnenbeleuchtung?

Die Entwicklung der heutigen Bühnenbeleuchtung im Sinne einer differenzierten Lichtregie entwickelte sich erst, nach dem mit elektrischen Glühbirnen ausgerüstete Scheinwerfer Licht lenken, formen und bündeln konnten. Das ermöglichte Front-, Seiten-, Ober- und Gegenlicht, gleichsam als Grammatik einer differenzierten Lichtsprache. Das Lehrbuch von Stanley MacCandless für die Bühne und Richard Kellys Grundsätze eine guten Lichtgestaltung in der Architektur basieren auf den Lichttechniken, die vor allem in der 1920er Jahren für die Bühne entwickelt wurden.

Die Entwicklung der HMI Scheinwerfer zur Einführung des Farbfernsehns ermöglichten neue kühne Licht-Raum-Installationen, die vor allem im deutschsprachigen Raum eine eigene Lichtästhetik hervorbrachten. Neue Lichtsprachen wurden möglich.

Kopfbewegte Scheinwerfer sind zwar praktisch, ein fundamentaler Einfluss auf die Bühnenlichtgestaltung im Bereich der darstellenden Kunst – also Schauspiel, Tanz und Oper – blieb aus, während sich die Ästhetik von Show, Konzert und Musical völlig wandelte.

Im Zuge der Digitalisierung des Lichts entstehen auf Konzertbühnen und in Shows Videoinstallationen, die von Scheinwerfern ergänzt werden. Auf der Theaterbühne werden Scheinwerfer eingesetzt, deren COB Leuchtmittel und Lightengines Halogen- und Entladungslampen ersetzen. Die Lichttechnik wurde komplett umgekrempelt – welche neuen Lichtsprachen entstehen? Entstehen Sie überhaupt?

Der Autor beleuchtet in Beispielen aus der Praxis, was passiert / passieren kann.

Anything new ... ?

Herbert Cybulska

Cybulska und Partners Lighting Solutions

What is happening, when LED lighting is used for the stage?

When the bulb was invented stage lighting took a big step forward. We got light sources that could be focused, light could be shaped for the first time. We got the front light, the side light, the top light and the backlight. So a “language” of light could be developed. Stanley Mc.Candless started to describe methods for stage lighting and Richard Kelly for lighting architecture in a new way.

At the beginning of colour TV the right light source needed to be developed for the new generation of TV cameras. The result is called the HMI. Fresnel spotlights with an HMI light source were the base of a new method of stage lighting – a special German way - with big cool spaces and very clear shadows. Later we got the HMI Profile Spots that are used in the European opera houses.

Later on moving heads changed the way of lighting musicals, shows and concerts a lot, but the influence of lighting ballet, drama and opera is not this big.

Now we got the LED lights. The light fixtures are reinvented, got something new. Concerts and shows are more or less video installations with a few spots. Not only the timing, the whole aesthetics of concert and show lighting changed.

But what is going on at traditional stages ...? Is there a new language of light coming up ... ? Do we get something really new?

The lecture follows some examples – and tries to find an answer.

Und – was Neues ... ? Was *wirklich* Neues ... ?

Herbert Cybulska

Cybulska und Partners Lighting Solutions

Was bewirkt der Einsatz digitaler Leuchten in der klassischen Bühnenbeleuchtung - eine neue Ästhetik?

Was gewinnen – was verlieren wir. Eine Betrachtung in Beispielen.

Die Entwicklung der heutigen Bühnenbeleuchtung im Sinne einer differenzierten Lichtregie entwickelte sich erst, nach dem mit elektrischen Glühlampen ausgerüstete Scheinwerfer Licht lenken, formen und bündeln konnten. Das ermöglichte Front-, Seiten-, Ober- und Gegenlicht, gleichsam als Grammatik einer differenzierten Lichtsprache. Das Lehrbuch von Stanley MacCandless für die Bühne und Richard Kellys Grundsätze eine guten Lichtgestaltung in der Architektur basieren auf den Lichttechniken, die vor allem in der 1920er Jahren für die Bühne entwickelt wurden.

Die Entwicklung der HMI-Scheinwerfer zur Einführung des Farbfernsehens ermöglichten neue kühne Licht-Raum-Installationen, die vor allem im deutschsprachigen Raum eine eigene Lichtästhetik hervorbrachten. Neue Lichtsprachen wurden möglich.

Kopfbewegte Scheinwerfer sind zwar praktisch, ein fundamentaler Einfluss auf die Bühnenlichtgestaltung im Bereich der darstellenden Kunst – also Schauspiel, Tanz und Oper – blieb aus, während sich die Ästhetik von Show, Konzert und Musical völlig wandelte.

Im Zuge der Digitalisierung des Lichts entstehen auf Konzertbühnen und in Shows Videoinstallationen, die von Scheinwerfern ergänzt werden. Auf der Theaterbühne werden Scheinwerfer eingesetzt, deren COB-Leuchtmittel und light engines die traditionellen Halogen- und Entladungslampen ersetzen. Die Lichttechnik wird umgekrepelt – welche neuen Lichtsprachen entstehen? Entstehen sie überhaupt?

Der Umgang mit neuer LED-Technik auf der Bühne wird in mehreren Beispielen erläutert.

Beispiel 1:

Der erste Theaterraum, der ausschließlich mit digitalen Lichtquellen ausgestattet war, begegnete mir 2013 in einer Deutschen Hochschule. Für die Regiestudenten wurde ein Saal eingerichtet, in dem praktisch an Inszenierungen gearbeitet werden kann – mit Licht. Das Geld war knapp, was sonst. Mit der Aufgabe wurde der Hausmeister vom leitenden Professor beauftragt. Dieser ging beherzt ans Werk. Modernes Licht hieß für ihn LED, was sonst – spart ja auch Energie – und lässt sich gut dimmen. Was kann daran schlecht sein? Die Leuchten sind direkt von Lichtpult aus ansteuerbar, es gibt keine brummenden Dimmer, die Anschlussleistung ist überschaubar. Bei seiner Suche entdeckte er preiswerte LED-Scheinwerfer, die als einfache RGB-Modelle in der Theorie neben farbigem Licht auch weißes Licht per Farbaddition erzeugen können. Der leitende Professor – ein erfahrener Theaterregisseur mit gutem Händchen für konventionelles Bühnenlicht – zeichnete

die Investition ab. Er freute sich über die günstige Möglichkeit, mit Farbe und weißem Licht arbeiten zu können, folgte ohne Argwohn den technischen Erklärungen des Hausmeisters. freute sich, die lästigen Ausgaben für Lampen und Filter ein für alles mal los zu sein – und landete harsch in der Realität, als die Anlage installiert war. Das Weiß war schlicht unerträglich, alles sah grau und fahl aus, die Farben schrien und differenzierte Zwischentöne, ein warmes oder kühles Weiß ließen sich partout nicht ermischen. Das Ende vom Lied: Der Raum verwaist, er ist schier nicht zu gebrauchen, die Aufenthaltsqualität ist unerträglich, zumal es keinen Zugang zum Tageslicht gibt.

Beispiel 2:

Ein Staatstheater investiert in RGB-Scheinwerfer, um monochrome blaue Räume einfacher herstellen zu können. Ein dunkelblauer Filter, der über 80% des Lichts absorbiert, ist schnell durchgebrannt, treibt Kosten und Arbeitszeiten in die Höhe. Im Rahmen einer Inszenierung des Intendanten steht ein Etat für die Anschaffung zur Verfügung, die Wahl fällt auf ein deutsches Qualitätsprodukt und mit der Anschaffung wird das Erstellen monochromer Räume – über die Inszenierung des Intendanten hinaus zum – Kinderspiel.

Rund ein halbes Jahr später ergibt sich die Möglichkeit, vier weitere der „Farbkünstler“ anzuschaffen. Gesagt, getan, geliefert. Die neuen Geschwistermodelle erzeugen zwar fast die gleichen Farben – aber nur fast. Beim Ausleuchten vom Bühnenhorizont tritt der Unterschied eklatant zu Tage. Frust. Beschwerde. Tausch von Geräten. Die Lösung: Die ersten Apparate werden eingetauscht gegen eine ältere Version. Viel Zeit, viel Geld und obendrein kaufmännische Verluste.

Beispiel 3:

Eine Staatsoper ersetzt rund 60 Geräte, die in „Gassen“ eingesetzt werden, durch die LED-Version aus gleichem Hause:

„Die Scheinwerfer setzen das x7 Farbmischsystem™ ein und ermöglichen so eine unglaublich breite Farbbandbreite. Von hochintensiven Weißnuancen über zarte Töne bis hin zu strahlend satten Farben. Sie erzeugen Licht, das den Anforderungen im Theater spielend gewachsen ist. Sie können nahtlos von einer Farbe auf die nächste überblenden, die Stimmung einer Szene verändern oder knallige Effekte erzeugen. Selbst die Beleuchtung von Menschen mit LEDs ist nun kein Problem mehr, denn die Hautfarben werden natürlich wiedergegeben – egal ob live auf der Bühne oder auf dem Bildschirm. Und viele neue Möglichkeiten ergeben sich, wenn der LED-Scheinwerfer mit der konventionellen Baureihe gemeinsam eingesetzt wird und sich so ein vielschichtiges Lichtbild erzeugen lässt.

Sie sind wirklich grün. Sie sind unglaublich effizient, produzieren mehr Lumen pro Watt als andere LED-Profilescheinwerfer oder sogar als die konventionelle Baureihe. Mit einer Leuchtmittel-Lebensdauer von 50.000 Stunden reduzieren sich die Unterhaltskosten natürlich drastisch.

Bedieneroberfläche und Software erprobt und vertraut. Dank der benutzerspezifischen Einstellungen, Quick Setups und verschiedenen Bedienmodi können Sie die LED-Scheinwerfer ganz Ihren Bedürfnissen anpassen.

Produktmerkmale:

- 60 Luxeon® Rebel LED-Emitter
- 50.000 Stunden LED-Lebensdauer
- x7 Farbmischsystem
- Einschübe für Glas- und Metallgobos sowie Soft-Diffuser
- Zubehöreinschub für motorisierte Effektgeräte oder optionale Drop-in Iris
- Strom und DMX In/Thru Stecker zum einfachen Aufbau
- Bis zu 9 Scheinwerfer in einer Linie über Power In/Thru Stecker möglich
- DMX512 In/Thru über 5-Pin XLR-Stecker
- Zahlreiche Ansteuerungs-Optionen, z.B. RGB, Strobe sowie Master-Slave-Steuerung ohne Konsole
- 15-bit interne Steuerung für sanftes Dimmen, weiche Überblendungen und Farbtreue während des Dimmens“

Diese Beschreibung des Herstellers übertreibt nicht. Der Beleuchtungschef ist glücklich. Die Geräte lassen sich besten einsetzen, lassen sich gut mischen mit konventionellem und HMI-Licht – die Welt scheint in Ordnung zu sein.

Allerdings nimmt die Oper auch alte Produktionen wieder auf. In diesen sind bis zu 60 der Vorgängergeräte eingesetzt, immer mit Filterfarben, oft wird zwischen den Akten umgefiltert oder sogar ein Farbwechsler eingesetzt. Farbwechsler heißt: Farben werden so zu einem „String“ geklebt, dass ein Rollmechanismus die jeweilig gewünschte Farbe vor die Lichtaustrittslinse „scrollt“. So wurde konventionell Farbvielfalt hergestellt: Aufwendig im herstellen der Rollen – und mechanisch anfällig. Je größer die Strings und je gesättigter die Farben (Filter wölben sich dann), desto größer die Anfälligkeit.

Beim Übersetzen der alten Filterfarben auf die neuen LED-Geräte per Farbprofil im Pult stellt sich heraus, dass ein bestimmtes Blau zwar ziemlich gut getroffen wird, aber nicht ganz. Blautöne werden heller, unbestimmte „Zwischenfarben“, die im Pastellbereich eine bestimmte Nuance treffen, verlieren ihre Atmosphäre, sie wirken klarer heller. Farbenaddition bringt andere Nuancierungen hervor als subtraktive Mischsysteme - in denen genommen wird.

Die Anpassung ist machbar. Ein Kollege schreibt die Profile. Er hat einen neuen Apparat und einen Alten nebeneinander auf eine weiße Wand gerichtet und probt Filter durch. Er braucht bis zu zwei Stunden für ein Profil. Es entstehen erhebliche Arbeitszeiten. Die Investition ist groß, aber die Mannschaft ist zufrieden, weil sich die Arbeit lohnt. Es entsteht ein leistungsfähiges System, das für neue Inszenierungen frische und sehr nuancierte Farben liefert. Für alte Produktionen ist die Adaption aufwendig – aber sie funktioniert dann doch gut.

Die Versprechen der Industrie werden eingelöst: Die Lampenkosten entfallen, die Filterkosten entfallen, in den Gassen ist weniger Hitzestress: Statt 60 x 750W leuchten und heizen je nach Farbe zwischen 60W und 150W pro Gerät. Das ist spürbar weniger und keiner kann sich mehr verbrennen.

Teuer war die nötige Erweiterung der DMX-Kreise: 60 x 15 Kanäle sind 900 Kreise statt der vorigen maximal 120 – das heißt Kabel, Splitter, Eingriff in die Architektur der Steuerung.

Für den Einsatz in den Gassen ist der Lichtaustritt gut – für das Frontlicht reicht es noch nicht, aus den großen Entfernungen der Vorderlichtpositionen kommt zu wenig auf der Bühne an, um Personen präsent auskeuchten zu können. Dort werden nach wie vor die 2000W-Versionen konventioneller Scheinwerfer eingesetzt.

Dann kommt von den digitalen Gassenapparaten ein update raus: die Version II. Die ist heller, wie gewünscht, die Farben sind leicht modifiziert, die Angaben über die maximalen Betriebsstunden werden auf 15.000 heruntergestuft.

Sollten diese angeschafft werden, ist die nächste „Übersetzung“ der Farben fällig, um die Geräte parallel einsetzen zu können.

War der Zeitpunkt der ersten Anschaffung zu früh ... ? Soll man noch die letzten Geräte der ersten Generation kaufen ... ? Soll man die erste Anschaffung wieder verkaufen und einheitliche neue Geräte kaufen ...? Reicht der Etat... ? Wie erklär ich's dem Verwaltungsdirektor ... ?

Beispiel 4:

Eine kleine Bühne in Frankfurt rechnet: Wenn wir unsere Scheinwerfer auf LED umstellen, investieren wir X ..., an Strom- Filter und Lampenkosten sparen wir Y. In diesem Haus gibt es nur Gastspiele, sprich: man arbeitet mit dem, was da ist.

Der Wechsel wird gemacht, eine große PR-Trommel wird gerührt. Ein Haus mit künstlerischen recht durchschnittlichem Output wirbt über die grüne Schiene und gewinnt neben Geld auch Renommee.

Beispiel 5:

Gastperformance in Schweden – ein Sponsor stellt neue Hightech-LED-Projektoren - genau die, die wir für sehr geeignet halten. Wir wollen harte, präzise Schnitte programmieren, im Wechsel zu einer Live-Malerei.

Schnittartige Überblendungen auf der Bühne – in Nullzeit. Wo wir früher Diaprojektoren bemüht haben, um rasche Wechsel fahren zu können, weil deren Shutter programmierbar war, oder mechanisch verdunkelbare Scheinwerfer, nehmen wir jetzt diese Spots mit LED Engines. „Schnell“ geht jetzt besser – vor allem mit größeren Leistungen.

Das vorhandene Pult kann die Apparate gut ansteuern, aber ein neutrales Weiss bekommen wir kaum hin – das wird eine abendfüllende Programmiererei. Die Helligkeit von 100% gibt Magenta, zum Weiss hin korrigiert wird es ein „schmutziges“ Weiss. Die Fluter aus gleichem Hause machen brillante Farben. so wie wir das wollen. Alles bestens. Fast –

denn die baugleichen Geräte interpretieren die Farbe nur ähnlich – nicht gleich. Nächtlicher Umbau von Scheinwerfern, damit diese Unterschiede nicht so ins Auge fallen.

Mit einigen Rollen Lichtfiltern und konventionellen Flutern wäre dieser Teil schneller zu erledigen gewesen. Halogenlampen sind gleich in der Farbe gleich – und im Dimmverhalten. Aber wer wünscht sich die Zeiten mit den hohen Leistungen und der großen Hitze zurück und den Tricks mit Lichtfiltern 2 KW und 5KW Fluter zu färben – das war auch kein Spaß.

Beispiel 6:

Ein Ausblick. Sollte ich eine neue Bühne konzipieren, wäre der Fall klar: Kein Dimmerraum mehr. Oder maximal ein ganz kleiner. Für Sonderfälle. Alle Scheinwerfer in LED-Technik. Beim Wegfall der Investition in Dimmer ist eine solche Lösung nicht einmal in der Anschaffung teurer als eine konventionelle Lösung. Der auf professionellen Theater- und Opernbühnen übliche Mix aus Profilscheinwerfern – die Mehrzahl mit Halogenlampe, einige starke Gräte mit HMI-Lampe – vielen Stufenlinsen – und Plankonvexlinsenscheinwerfern mit Halogenlampen, starke Fluter für Horizontausleuchtungen und einige Multifunktionscheinwerfer können ohne Schwierigkeiten durch reine LED-Geräte ersetzt werden. Selbst für die großen HMI-Stufenlinsen mit 2,5KW- und 4KW-Lampen gibt es Alternativen mit LED Engines.

Für besondere Inszenierungen würde ich einige klassischen Stufenlinsen und Profiler vorhalten, einige 5KWler und Stufenlinsen, ein paar 2KW-Profiler. Für die hätten wir noch Dimmer.

Für mit Aufwand zum Dimmen umgebaute Leuchtstofflampen, es funktioniert nur die aufwändige Version mit den VIP90 - Vorschaltgeräten so präzise, wie es die Bühne braucht, gäbe es noch einen Platz im Museumsregal. Grünstichige FL's haben eine ganz besonderen Reiz. Für eine trüb-frische Grundausleuchtung, das für Zitat funktionalen Lichts im Übergang vom 20. ins 21. Jahrhundert sind sie nach wie vor bestens geeignet. Diskontinuierliche Lichtspektren sind schwer zu imitieren.

Beispiel 7 – eine Art Fazit:

Im Gespräch mit dem Beleuchtungschef der Frankfurter Oper, Olaf Winter, sind wir uns einig, wohin die Reise beim Licht im Theater geht. Ein neues Haus würde auch er mit LED-Apparaten ausführen – so wie unter 5 (Beispiel 5 ?) beschrieben. Auch mit dem „Halogen-Museum“ sind wir uns schnell einig – auf ein paar alte Schätzchen will auch er nicht verzichten. Mechanisch geschlossene HMI-Scheinwerfer, die stundenlang auf Proben oder in Inszenierungen auf ihren Einsatz „warten“ – darauf wollen wir gern verzichten.

Eine Umstellung der Beleuchtung der Städtischen Bühnen auf rein digitales Licht halten wir für unrealistisch: Woher sollen die Millionen für den Ersatz von über 2000 Scheinwerfern kommen? Aber wir sind uns auch sicher: Die Umstellung wird kommen, die Tage der Halogenbeleuchtung sind gezählt.

Was werden wir gewinnen ...? Schön kühl und präsent ausgeleuchtete Bühnen, die nicht unter verschmorenden Korrekturfiltern allmählich in einen grauen, stumpfen Raum übergehen, lebendigere Farben, schnellere Wechsel, weniger Strom- und Filterverbrauch, geringere Betriebskosten also, und weniger Hitzestress

Was wird uns fehlen ... ? Der „Rotshif“ beim Dimmen, die superweichen Fades, die mit träge reagierenden glühenden Wendeln eine Sanftheit in langsamen Wechsel ermöglichen, die selbst mit hochauflösenden DMX-Steuerungen beim digitalen Licht irgendwann doch stufig wirken:

„Die Langsamkeit ist eine Qualität von Oper und Schauspiel, im Gegensatz zum Event. Wir Theaterlichtdesigner sind aufgefordert, die Langsamkeit zu erhalten, die Qualität der Langsamkeit zu erhalten. Und wenn wir Halogen nicht halten können – dann eben mit LED.“ sagt Olaf Winter zum Schluss.

Dem kann ich mich nur anschließen.

Das Licht in der gotischen Kathedrale – Herkunft und Bedeutung

Sarah Christiane Ruppert, Steinbergstrasse 42, 31139 Hildesheim

Problemstellung und Forschungsfragen

Die gotischen Kathedralen zählen zwar längst nicht mehr zu den höchsten, aber dennoch zu den faszinierendsten Bauwerken Europas. Welche Bedeutung das Licht in der gotischen Kathedrale hat und wie es sich architektonisch, historisch sowie philosophisch entwickeln konnte ist Thema des Vortrags. Aufgrund der theoretischen Erkenntnisse wird ein Beleuchtungskonzept für die Elisabethkirche in Marburg an der Lahn erstellt, das versucht die Vorstellung der christlichen Lichtmystik aufzunehmen.

Stand der Wissenschaft/Technik

Die zentrale Rolle des Lichts, dem „gleichsam vornehmsten Baumaterial“ [1] der gotischen Kathedrale, liegt in theologisch-philosophischen Gründen, die sich aus dem Neuplatonismus und dem Christentum speisen. Die Innenraumbelichtung gotischer Kirchen berücksichtigt zwar meist architektonische Gegebenheiten, aber selten den - mit der gotischen Architektur in engstem Zusammenhang stehenden - Aspekt der Lichtmystik.

Forschungshypothesen

Neben den Vorgaben für Innenraumbelichtung, den Nutzungsanforderungen der jeweiligen Kirche und Beachtung der Vorgaben bezüglich Beleuchtungsstärken für Kunstgegenstände, gibt es Ableitungen aus der gotischen Architektur, sowie ihrer theologisch-mystischen Bedeutung, aus denen sich ein Beleuchtungskonzept entwickeln lässt.

Versuchsaufbau

Es wird untersucht, wie und weshalb sich die Architektur seit der Epoche der Vorromanik verändert hat, um schließlich in der Gotik das Licht als gleichberechtigtes Architekturelement zu entdecken. Dabei werden sowohl bauliche, als auch politische, philosophische und wirtschaftliche Umstände berücksichtigt.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

In der gotischen Kathedrale wird das Licht gleichberechtigter Teil der Architektur. Standen in der Romanik noch künstliche Lichtquellen im Mittelpunkt, ist es in der Gotik das Licht selbst- Tageslicht, das durch die Transmission der farbigen Fenster ein mystisches, entrücktes Licht schafft. Dieser Umstand, sowie die ihm zugrunde liegende Lichtmystik, könnten in der künstlichen Beleuchtung gotischer Kirchen stärker berücksichtigt werden, und so zu einer die Architektur stärker unterstützenden Lichtwirkung beitragen.

[1] Nussbaum, Norbert „Deutsche Kirchenbaukunst der Gotik: Entwicklung und Bauformen“, Köln 1985

Metaphysics, origin and meaning of light in the gothic cathedral

Sarah Christiane Ruppert, Steinbergstrasse 42, 31139 Hildesheim

Summary

The lecture "The light in the Gothic cathedral - Origin and Meaning of" deals with the most famous monument of the Middle Ages and its impressive lighting situation. Research issue. Although the Gothic cathedrals are no longer among the highest, but the most fascinating buildings in Europe. How important is the light in the gothic cathedral and how it could be architecturally, historically and philosophically develop is subject of the lecture. Based on the theoretical findings a lighting concept for the Elisabeth Church in Marburg an der Lahn is created which attempts to take the concept of Christian mysticism of light.

State of science/technology

The central role of light, the "quasi principal building material" [1] theGothic cathedral, is theological and philosophical reasons, which feed on the Neo-Platonism and Christianity.

Research hypothesis

In addition to the requirements for interior lighting as well as the use requirements of the particular Church, it could be possible to develop a lighting concept which is based on the gothic ideas of light, architecture an mysticism.

Experimental setup

It examines how and why the architecture has changed since the time of the Pre-Romanesque to Gothic finally discovering the light as an equal architectural element. Both structural, and political, philosophical and economic circumstances into account. Particular attention is paid to the explanation of the Christian mysticism of light and the change in the light impression since the pre-Romanesque.

Results in comparison with previous findings

The light in the gothic cathedral is, in contrast to the Romanesque, an equal part of the architecture. During the Romanesque artificial light sources were important, but in the gothic it is the daylight it selves: Through the transmission of the colored window a mystical atmosphere is created in the cathedral. This circumstance, as well as the aspect of the light mysticism could be used in todays lighting design concepts for more supporting the gothic architecture.

[1] Nussbaum, Norbert „Deutsche Kirchenbaukunst der Gotik: Entwicklung und Bauformen“, Köln 1985

Das Licht in der gotischen Kathedrale – Herkunft und Bedeutung

*Sarah Christiane Ruppert,
Studio DL Hildesheim*

Zusammenfassung

Der Vortrag beschäftigt sich mit dem bekanntestem Bauwerk des Mittelalters und seiner eindrücklichen Lichtsituation. Es wird die Fragestellung behandelt, welche Bedeutung das Licht in der gotischen Kathedrale hat und wie es sich architektonisch, historisch und philosophisch seit der Vorromanik entwickelt hat. Berücksichtigt werden hierbei kulturelle, geografische, sowie philosophische Gegebenheiten, die dazu führten, daß das Licht in der Gotik als gleichberechtigtes Architekturelement entdeckt wurde.

1 Gotik – ein Begriff und seine Geschichte

Der Vortrag beginnt mit der Definition der gotischen Epoche, ihrer Vorläufer und ihrer in den nachfolgenden Jahrhunderten unterschiedlichen Bewertung. Des weiteren wird die Frage nach der sinnvollen Verwendung von Epoche- und Stilbegriffen gefragt.

2 Auf dem Weg zur gotischen Kathedrale

Untersucht wird die architektonische Entwicklung seit der Vorromanik unter Berücksichtigung von kulturellen, politischen, sowie philosophischen Gegebenheiten

2.1 Das Licht in der Romanik

Ebenfalls beginnend in der Vorromanik wird der bewusste Einsatz von Licht zu liturgischen Zwecken untersucht. Es werden Unterschiede und Gemeinsamkeiten zu den nachfolgenden Epochen genannt. Besondere Berücksichtigung erfährt in diesem Abschnitt das biblische Symbol des „Himmlischen Jerusalems“.

3 Voraussetzungen der gotischen Kathedrale

Die gotische Kathedrale lässt sich nicht nur über die Summe ihrer einzelnen Bauteile erfahren. In ihr zeigt sich die wirtschaftliche, philosophische sowie ökonomische Realität einer gesamten Epoche.

3.1 Die Entwicklung der Stadt

Die Entwicklung der Stadt und die Einigung Franciens, des heutigen Frankreichs, unter zentraler Herrschaft steht in engem Zusammenhang mit der Ausbildung des gotischen Stils. Es werden politische und territoriale Veränderungen untersucht, die zur Herausbil-

derung der baulichen Fähigkeiten steht, die die Errichtung gotischer Kathedralen erst möglich machte.

3.2 Scholastik

Neben den wirtschaftlichen und politischen Veränderungen unterliegen auch die philosophisch-christlichen Umstände in der Zeit vor der Gotik einem Wandel. Der Konflikt zwischen Glaube und aufkeimender Wissenschaft lässt erste Fragen nach einer Vereinbarkeit der beiden Pole aufkeimen. Dargelegt wird, wie die Scholastik Auswirkungen auf Geometrie, Proportionen und Gestaltung der Kathedrale haben.

3.3 Christliche Mystik

Das Hauptmotiv der Mystik, die „unio mystica“, also die Einswerdung mit Gott, wird erläutert und ihr unmittelbarer Zusammenhang mit Licht verdeutlicht. Besondere Berücksichtigung finden hier die Parallelen zwischen dem biblischen Begriff des Lichts und der architektonischen bzw. gestalterischen Erscheinung in der Kathedrale.

3.4 Reformbewegung der Orden

Die Klöster der mittelalterlichen Welt sind nicht nur Orte der Theologie, sondern auch der Wissenschaft und haben enormen Einfluss auf die Lebenswelt ihrer Zeit. Die Entstehung der Reformorden und ihr Wirkungskreis in der Stadt hat unmittelbare Auswirkungen auf den Bau, die Gestaltung und die Bedeutung der Kathedrale.

4 Die gotische Kathedrale

In diesem Abschnitt werden die konstruktiven Merkmale der Kathedrale beschrieben und der Zusammenhang zu den wirtschaftlichen, philosophischen, sowie ökonomischen Verhältnissen der Epoche herausgearbeitet. Besonderer Augenmerk liegt auf der Vorstellung der mittelalterlichen Baumeister des Kraftlinienverlaufs: ausgehend vom Schlußstein, über das Triforium und den Diensten (Halbsäulen) verteilt sich das Gewicht der Konstruktion. Dadurch ergeben sich Orte in der Konstruktion, die eine besondere Bedeutung erhalten.

4.1 Vom Fenster zur leuchtenden Wand

Ein wesentlicher Charakterzug der gotischen Kathedrale stellt die Innenwandgliederung dar. Es wird die Veränderung der Innenwand seit der Vorromanik dargestellt und der zu Grunde liegende Bedeutungswandel erläutert. Dabei werden die Zonen des Wandaufbaus der Romanik (Arkadenzone, Emporenzone, Obergaden) und der klassischen Gotik (Arkadenzone, Emporenzone, Triforium, Obergaden) dargestellt.

4.2 Geometrie und Zahlen

Die Verwendung von Geometrie und Zahlenverhältnissen während der Errichtung der Kathedrale und ihre Bedeutung wird in diesem Abschnitt erläutert. Es wird auf christliche und platonische Zahlenbedeutung eingegangen.

5 Das Licht in der gotischen Kathedrale

Die zentrale Rolle des Lichts in der Architektur der Kathedrale wird in diesem Kapitel ausführlich dargelegt. Die sich aus Christentum und (neu)platonischer Lichtmystik speisenden Vorstellungen werden erläutert. Beginnend bei Platons Höhlengleichnis, über die Lichtmystik der Neuplatoniker (Licht ist identisch mit dem höchsten sein) bis hin zu Pseudo-Dionysius Areopagit werden die wichtigsten Vorstellungen der Lichtmystik dargelegt. Erläutert wird der christliche Begriff des Lichts und die lichtmystische Gleichsetzung von Licht mit Gott bzw. dem „Vater des Lichts“ und Jesus als seine erste „Ausstrahlung“

Erwähnung findet Abt Suger, dessen Studien und Vorstellungen der Lichtmystik ihn veranlassten, den Chor der Abtei St. Denis bei Paris (die Grablage der französischen Könige) im damals neuen gotischen Stil umzubauen. Der christliche Begriff der Erleuchtung wird untersucht. Die lichtmystischen Vorstellungen gelten als die geistige Grundlage für die Lichtwirkung der gotischen Kathedrale.

Es wird die Lichtwirkung der Kathedrale erläutert, dabei finden die Buntglasfenster Erwähnung. Die vertikale Lichttrichtung und das Durchscheinen der Glasfenster führen zu einem speziellen Helligkeitseindruck: es muss nicht zwangsläufig heller sein in einer gotischen Kathedrale. Als Beispiele hierfür werden Tageslichtquotienten romanischer und gotischer Kirchen angeführt.

5.1 St. Denis und die Geburt der Gotik

Der Umbau des Chors der Abtei St. Denis durch Abt Suger markiert einen wichtigen Punkt auf dem Weg der gotischen Entwicklung. Es wird Sugers Gedankenwelt in Bezug auf Lichtmystik dargestellt. Es folgen konstruktive Erläuterungen des von Suger veranlassenen Umbaus des Chors der Abtei. Dabei wird auf das anagogische Moment der Kathedrale eingegangen: durch die Betrachtung des Lichts als einem Abbild des Göttlichen, kann der Mensch näher zu Gott, zur „unio mystica“ geführt werden.

6 Fazit

Es werden noch einmal die wichtigsten Punkte zusammengefasst: die gotische Kathedrale wird als ganzheitliches Phänomen gesehen, dessen formale Entwicklung auf wirtschaftlichen, ökonomischen und philosophischen Vorstellungen basiert. Erwähnt wird noch einmal die Veränderung der Innenwandgliederung, die die durchscheinenden Glasfenster erst konstruktiv möglich machen. Ein besonderer Focus liegt auf der Lichtmystik und dem Verlauf der Kraftlinien.

Es wird abschließend die Frage gestellt, wie und ob man mit einer modernen Beleuchtung die mannigfaltigen Bedeutungen der gotischen Kathedrale gerecht werden kann und ob sich durch die mittelalterliche Vorstellung der Kraftlinien bestimmte Zonen der Konstruktion zur Beleuchtung und Installation von Leuchten mehr oder weniger eignen.

Transformation einer Kirche in eine Schule

Mario J. Rechsteiner / art light GmbH, St. Gallen

Problemstellung

Die unter Denkmalschutz stehende, 1957 erbaute Neuapostolische Kirche von Heinrich Graf (1930-2010) wird in eine private Schule der Betina Würth Stiftung umgebaut. Die Kirche weist eine relativ schlechte Tageslichtnutzung auf und zusätzliche Massnahmen sind auf Sicht der Denkmalpflege nur bedingt möglich.

Ziel

Optimale Tages- und Kunstlichtnutzung und Gestaltung im Kontext zum Gebäude.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Architektur bezogene Tages- und Kunstlichtlösungen mit einem für den klassischen Bildungsbau atypischen Lösungsansatz.

Realisierungsgrad

Die Neue Stadtschule bietet Jugendlichen einen innovativen Lernort, der neue Lernwege eröffnet, und Raum gibt, Fähigkeiten wie unternehmerischen Mut, Querdenken und Neugier zu entwickeln. Das pädagogische Konzept arbeitet hierfür mit der Art und Weise, wie Wissen transportiert wird, aber auch mit dem gebauten Raum. Die Umgestaltung des modernen religiösen Gebäudes in einen gegenwärtigen öffentlichen Bildungsbau beinhaltet einen bewussten Umgang mit Tages- und Kunstlicht. Für das Projekt wurden funktionale Leuchtenkörper entwickelt, die nicht nur das Kunstlicht in die Architektur integrieren, sondern auch den Tageslichteintrag optimieren. Dekorative Komponenten stehen als Sinnbild für Kreativität und Lebendigkeit. Es entstand ein innovativer Lernort, der sich durch eine erlebbare Architektur auszeichnet und Licht ist ein Teil davon.



Bild 1 Kirchenraum vor dem Umbau



Bild 2 Kirchenraum nach dem Umbau

Transformation of a church into a school

Mario J. Rechsteiner / art light GmbH, St. Gallen

Problem

The new apostolic church designed by Heinrich Graf (1930-2010) in 1957 shall be converted into a private school of the Bettina Würth foundation.

The daylight factor of the interior is low. Additional provisions to improve the situation are restricted due to the cultural heritage preservation.

Intent

Optimized daylight and best artificial lighting design in conjunction with the architecture.

Innovation /»Best practice«

Atypical day-and artificial lighting design solution for an educational institution.

Implementation

The Neue Stadtschule offers an innovative place of new learning concepts. It creates space to develop skills like entrepreneurial courage, lateral thinking and curiosity.

The educational concept works with the way, how knowledge is transferred, but also with the built space.

The reconstruction of the modern church into a public educational institution contains the conscious work with day- and artificial light. For this project special light cubes have been developed. They include the artificial light, but also enhance the level of daylight inside.

Decorative lighting components represent creativity and liveliness.

An innovative place of learning has been formed and the light is one part of it.



Pic. 1 Church room before reconstruction



Pic. 2 Church room after reconstruction

Transformation einer Kirche in eine Schule

Mario Rechsteiner

art light GmbH

Zürcherstrasse 202, CH-9014 St. Gallen / www.art.light.ch

Zusammenfassung

Für die neue Stadtschule in St. Gallen wurde ein Lernort in den ehemaligen Räumen der Neuapostolischen Kirche von St. Gallen geschaffen. Bei der, von der Bettina Würth Stiftung gegründeten Schule, stehen die Lernenden im Mittelpunkt. Ein gepflegtes und würdiges Lernumfeld soll zu einem achtsamen Umgang mit Menschen und Material beitragen. Eine optimierte Tageslichtführung sorgt dafür, dass in dem denkmalgeschützten Sakralbau optimale Bedingungen für die Lernenden geschaffen werden konnten. Bei der Kunstlichtlösung wurde zum einen darauf geachtet, dass das gesamte Gebäude mit LED-Systemen ausgestattet werden konnte. Zum anderen sorgen dekorative Leuchten für eine angenehme, wohnliche Atmosphäre.

1 Tageslichtnutzung

Messungen der bestehenden Tageslichtsituation in dem sakralen Raum zeigten sehr schnell, dass hier ein Kompromiss zwischen den denkmalpflegerischen Ansätzen und der gewünschten Lichtqualität gefunden werden musste. Die bestehende vertikale Verglasung mit den satinierten Farbgläsern ermöglichte keinen direkten Blick in den Aussenraum und beeinflusste die Farbwiedergabequalität im Innenraum sehr stark.



Abb. 1: Bestehende Tageslichtsituation im Kirchenraum vor dem Umbau (Bild: art light GmbH)

1.1 Vertikale Verglasung

Um die Tageslichtsituation zu optimieren, wurden in einer nächsten Phase verschiedene Massnahmen und Lösungsansätze im Dialog mit Architekt, Nutzer und Denkmalpflege überprüft. So wurde aufgezeigt, wie wichtig der direkte Sichtbezug nach aussen für die Lernenden ist.



Abb. 2: Bestehende Verglasung ohne direkten Ausblick ins Freie (Bild: art light GmbH)

Abb. 3: Geplante Verglasung mit Ausblick ins Freie (Visualisierung: art light GmbH)

Die Planungsansätze konnten vollumfänglich umgesetzt werden. Um die Farbwiedergabequalität des Tageslichts im Innenraum zu optimieren, konnte ein grosser Anteil der Verglasung in Weissglas ausgeführt werden. In Anlehnung an die ursprüngliche Verglasung wurden vereinzelt Fenster mit bunten Strukturgläsern eingesetzt.



Abb. 4: Umsetzung mit optimierter Verglasung (Bild: Jürg Zürcher)

1.2 Ergänzende Tagslichtnutzung

Die Berechnungen im Modell zeigten sehr schnell, dass für eine optimale Tageslichtnutzung nur eine Optimierung im Bereich der Fenster nicht genügt. Da die bestehende Dachform auch Tageslichtöffnungen in der Decke zulässt, wurde dies ergänzend geprüft. Auf Grund der räumlichen Verbauung mit den Lern-Kuben und der geplanten Deckenkonstruktion mit einer Höhe von 1.8m ergaben auch hier die Berechnungen, dass quadratische Standardöffnungen nicht sehr effizient sind.



Abb. 5: Tageslichtberechnung Bestand (D=1,3%)

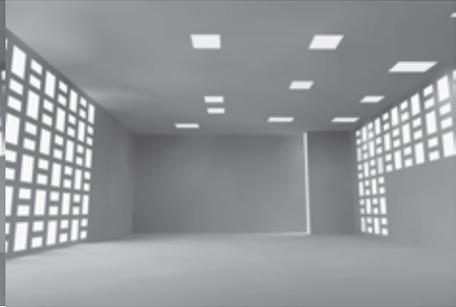


Abb. 6: Tageslichtberechnung mit Oberlichter (D=2,3%)

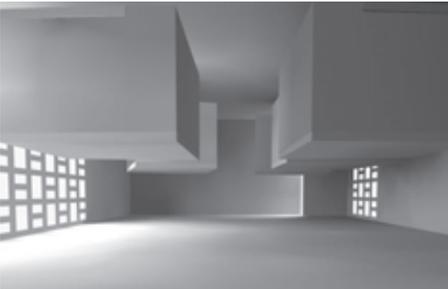


Abb. 7: Tageslichtberechnung Bestand und Lern-Kuben (D=1,0%)



Abb. 8: Tageslichtberechnung mit Oberlichter und Lern-Kuben (D=1.6%)

Die Deckenstärke beeinflusst die Lichtverteilung im gesamten Schulraum sehr stark. Der gewünschte Effekt einer homogenen Lichtverteilung konnte mit Standardöffnungen nicht gewährleistet werden. Lichtlenkende Elemente, wie sie in der Praxis häufig eingesetzt werden, wurden aus gestalterischen Gründen von den Architekten nicht gewünscht. Sowohl aus statischen, als auch bauphysikalischen Gründen waren mehr, oder grössere Oberlichter keine Option. Auf der Suche nach einer Lösung, welche die gestalterischen und lichttechnischen Ansprüche gleichermaßen berücksichtigte, verfolgten wir den Ansatz, den Tageslichteintrag über der Oberlichter mittels eines diffusstrahlenden Körpers flächiger in den Raum zu lenken. Auf diese Weise konnte der für den Raum sichtbare Teil der Oberlichter um über 150% gesteigert werden.

2 Kunstlicht

Für die Architekten von Klaiber Partnership AG und die Innenraumgestalterin Doris Fratton war es ausserordentlich wichtig, dass die Leuchten ein Bestandteil der Architektur und des Raumes sind. Eine wohnliche Atmosphäre sollte für ein entspanntes Lernen und Geborgenheit sorgen. Hochwertige Materialien dienen dazu, den respektvollen Umgang zu unterstützen. Der von uns gewählte Lösungsansatz ist eine Kombination aus punktueller und dekorativer Beleuchtung. Durch den Einsatz von Leuchten mit LED-Technik konnte eine optimale Balance zwischen Ästhetik und Wirtschaftlichkeit erreicht werden.



Abb. 9: Unterrichtsraum mit Tageslicht
(Bild: Jürg Zürcher)



Abb. 10: Unterrichtsraum mit Tages- und Kunstlicht
(Bild: Jürg Zürcher)

Bei den LED-Leuchten wurde bewusst eine warme Lichtfarbe mit 3000K gewählt. Auch bei der Farbwiedergabeeigenschaft wurden in der Regel Leuchten mit einem CRI grösser 85, gewählt. Die dekorativen Leuchten weisen eine weiche Formensprache auf und schaffen mit ihrer Materialisierung eine optische Auflockerung des Raums.



Abb. 11: Kronleuchter Eingangshalle
(Bild: Jean Claude Jossen)



Abb. 12: Aufenthaltsraum
(Bild: Jean Claude Jossen)

Beleuchtung im Restaurant

Carolin Fröhlich, Hochschule Wismar | DE

Problemstellung und Forschungsfragen

Die Studie untersucht den Einfluss individueller Beleuchtungsparameter auf die Atmosphäre in einem Restaurant. Die Beleuchtung kann dabei die Verweildauer der Kunden signifikant erhöhen oder verkürzen. Licht weckt Interesse, schafft Orientierung und begeistert.

Stand der Wissenschaft/Technik

Die Gastronomie ist ein eher privater Zweig. Es gibt kaum Forschung seitens der Beleuchtungsindustrie wegen des kleinen Absatzpotentials. Gastronomen haben aber oft nicht die Erfahrung um das Potential der Beleuchtung auf das Wohlbefinden der Gäste zu nutzen.

Forschungshypothesen

Leuchten werden oft nur nach dem Stil des Restaurants gewählt. Um aber eine authentische Atmosphäre zu erzeugen muss die Lichtverteilung zuerst ausgesucht werden.

Aktuell gibt es hierzu keinen generellen Normen, welche die nötigen Lichtplanungsinstrumente beschreiben um eine bestimmte Stimmung zu erzeugen.

Versuchsaufbau

Im ersten Teil einer online-Studie wurden Bilder mit immer demselben Gesichtsausdruck verglichen. Dabei wurde der positive oder negative Einfluss verschiedener Lichtrichtungen auf das Gesicht untersucht. Im zweiten Teil wurde der Einfluss von Lichtrichtung und Lichtverteilung in einem realen Versuchsaufbau getestet. Dafür wurde eine Diner-für-zwei Situation mit direktem und indirektem Licht von oben und der Seite aufgebaut.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Der positive oder negative Eindruck wurde nicht nur von der Lichtrichtung sondern eher von der Lichtverteilung erzeugt. Weiche Schatten lassen unser Gesicht positiver erscheinen als harte. Das Gesicht wirkt weicher und freundlicher, wenn das Licht von vorne kommt. Hingegen je mehr das Licht steiler von der Seite kommt, desto negativer erscheint das Gesicht. Licht von unten wird nicht als negativ empfunden solange es weiche Schatten im Gesicht erzeugt. Licht von oben wird trotz starken Schatten unter der Nase positiv empfunden, vermutlich da wir diese Beleuchtungsart von direktem Sonnenlicht kennen.

Bei der Planung verschiedener Bereiche geht es vor allem darum Highlights zu setzen. Dies geschieht, indem man die Bereiche wählt, welche erhellt werden oder dunkel bleiben. Direktes Licht hebt die Qualität eines Restaurants. Es ist daher möglich ein Restaurant nur mit direktem Licht zu beleuchten aber nicht nur mit diffusem Licht. Direktes Licht von oben erzeugt starke Schatten im Gesicht, welche durch zusätzliches seitliches Licht gemildert werden. Hinterleuchtete Wände oder beleuchtetes Glas werden für eine Bar bevorzugt.

Wenn man das Design der Leuchten für ein Restaurant wählt, sollte man die Lichtverteilung auch einbeziehen, da sie essential die gewünschte Atmosphäre beeinflusst.

Restaurant lighting

Carolyn Fröhlich, University of Applied Sciences Wismar | GER

Research issue

A study concerning the effectiveness of individual lighting parameters to enhance the atmosphere and wellbeing in a restaurant. Lighting can significantly increase or decrease the time customers spend in a restaurant. Light can stimulate, guide and fascinate guests.

State of science/technology

The restaurants market is a rather private sector. It has a lack of research due to the low sales potential for the lighting industry. Gastronomes often do not have enough experience to know the potential of how light can enhance guests' wellbeing in their restaurants.

Research hypothesis

Often the luminaires are only selected according to the style of the restaurant. However to create an authentic atmosphere the light distribution has to be defined first.

At the moment there are no general standards that describe the lighting design tools needed in order to create a target mood.

Experimental setup

The first part, an online-based research, compared pictures of always the same facial expression. In this study the positive or negative impact of different lighting directions on the face was examined. In the second part of the study, the influence of light direction and luminous distribution was tested on basis of a real built mock up. Therefore a two-person dining situation was created with each direct and indirect light from above and the side.

Results in comparison with previous findings

The positive or negative impression was not created by the light direction itself but rather by the light distribution. Soft shadows let our face appear more positive than hard shadows. The face is softer and therefore friendlier when the light comes from ahead. On the other hand, the more light comes from the side, the face appears even negative. Light from below is not considered negative as long as it creates soft shadows in the face. Light from above can also create some shadows under the nose and is still seen as positive, probably because we know that kind of illumination from direct sunlight.

Lighting design for various areas is mainly about choosing where to put the focus. This is done by choosing which areas are bright and which ones stay in the dark. Direct light lifts the quality level of the restaurant. It is possible to illuminate a restaurant only with direct light but it should never be illuminated with just diffuse light. Only direct light from above casts strong shadows on the face. These shadows can easily be softened by light from the side. Backlit light walls or illuminated glass is interpreted from people as suitable for a bar.

When choosing the design of the luminaires for a restaurant their light distribution should be taken into consideration as well because it is essential for the desired atmosphere.

Beleuchtung im Restaurant

Carolin Fröhlich,

Hochschule Wismar, Philipp-Müller-Str. 14, 23966 Wismar

Zusammenfassung

Eine Studie zur Wirksamkeit einzelner Beleuchtungsparameter auf die Atmosphäre und das Wohlbefinden in einem Restaurant. Die Studie zeigt, dass Lichtplanung im Restaurant hauptsächlich bestimmt, wo man den Fokus setzt. Dies geschieht, indem man die Bereiche wählt, welche im Dunkeln bleiben und welche beleuchtet werden.

Wenn das Leuchtendesign in einem Restaurant ausgewählt wird, sollte zeitgleich auch dessen Lichtverteilung ins Auge gefasst werden. Dies stellte sich im Test als essentiell für die gewünschte zu erreichende Raumatmosphäre dar. Wichtig ist vor allem, dass man durch die gewählte Lichtstimmung weiche Schatten in den Gesichtern erzeugt, da diese angenehmer wirken. Man kann ein Restaurant mit verschiedenen direkten strahlenden Leuchten beleuchten, man sollte aber nie eine ausschließlich diffuse Beleuchtung verwenden.

1 Restaurantbeleuchtung mit passendem Ambiente

Das Ambiente ist der entscheidende Faktor, warum ein Restaurant mehr Gäste anzieht als ein anderes. Eine Verbesserung des Ambientes führt deshalb zu einem nachhaltigen Wachstum der Kundschaft. Dabei steigert oder senkt die im Lokal integrierte Beleuchtung signifikant die Verweildauer der Kunden im Restaurant. Licht weckt Interesse, schafft Orientierung und begeistert.⁰¹

Licht begleitet uns während des gesamten Restaurantbesuchs. Zuerst nehmen unsere Augen die Architektur und die Raumgestaltung wahr, danach folgen das Essen und die Atmosphäre. Wenn uns das alles gefällt nehmen wir zusätzlich die Musik und die guten Essensdüfte auf und schon befinden wir uns mitten im Restauranterlebnis.

Die Atmosphäre, welche hauptsächlich zu diesem Erlebnis beiträgt, wird über die Beleuchtung erzeugt. Deshalb ist es wichtig die richtige Beleuchtung zu wählen.^{02, 03}

Die Studie hat zum Ziel das Verständnis zu vertiefen, wie stark der Einfluss von Licht auf die Erzeugung einer Atmosphäre im Raum Einfluss hat.

1.1 Aktuelle Situation/ Problemstellung

Die Studie untersucht den Einfluss individueller Beleuchtungsparameter auf die Atmosphäre in einem Restaurant. Die Beleuchtung kann dabei die Verweildauer der Kunden signifikant erhöhen oder verkürzen. Licht weckt Interesse, schafft Orientierung und begeistert.

1.2 Stand der Wissenschaft/Technik

Die Gastronomie ist ein eher privater Zweig. Restaurantbesitzer sind oft Einzelpersonen, die ihr Restaurant selbst managen. Es gibt kaum Forschung seitens der Beleuchtungsindustrie wegen des kleinen Absatzpotentials. Gastronomen haben oft nicht die Erfahrung um das volle Potential der Beleuchtung auf das Wohlbefinden der Gäste auszuschöpfen.

1.3 Forschungshypothesen

Leuchten werden oft nur nach dem Stil des Restaurants gewählt. Um aber eine authentische Atmosphäre zu erzeugen muss die Lichtverteilung zuerst ausgedacht werden. Aktuell gibt es hierzu keinen generellen Normen, welche die nötigen Lichtplanungsinstrumente beschreiben um eine bestimmte Stimmung zu erzeugen.

2 Restaurantbeleuchtung Praxistests

2.1 Versuch 1/3 – Beleuchtung des Gesichts

Im ersten Teil wurden Bilder mit immer demselben Gesichtsausdruck verglichen. Dabei wurde der positive oder negative Einfluss verschiedener Lichtrichtungen auf das Gesicht untersucht. Zugleich wurde der Abstand und Winkel der Lichtquelle zum Gesicht variiert.

Einflussfaktoren Teil 1: Lichtrichtung: von oben, von unten, von der Seite und von vorne, Abstand und Winkel der Beleuchtung zum Gesicht.

Tab. 1: Testauswertung – Beleuchtung des Gesichts (Abb. 1-8 © Carolin Fröhlich, Julia Kahl 26.06.2016)

<p>Licht von der Seite, kurzer Abstand zum Gesicht, starke Schatten. Überwiegend negative Bewertungen. Wirkt traurig und konzentriert.</p> 	<p>Licht von oben, kurzer Abstand zum Gesicht, starke Schatten. Überwiegend positive Bewertungen. Wirkt ruhig, freundlich und selbstsicher</p> 	<p>Licht von unten, kurzer Abstand zum Gesicht, starke Schatten. Überwiegend negative Bewertungen. Wirkt ängstlich, wütend und überrascht</p> 
<p>Licht von der Seite, kurzer Abstand zum Gesicht, mit weichen Schatten. Überwiegend positive Bewertungen. Wirkt glücklich, freundlich und selbstsicher</p> 	<p>Licht von oben, kurzer Abstand zum Gesicht, weicher Schatten. Überwiegend positive Bewertungen. Wirkt schüchtern, freundlich und glücklich</p> 	<p>Licht von unten, kurzer Abstand zum Gesicht, weicher Schatten. Überwiegend positive Bewertungen. Wirkt glücklich und freundlich</p> 

Ergebnisse Versuch 1/3 – Beleuchtung des Gesichts

Wenn das Licht von vorne kommt, verteilt sich das Licht besser und erzeugt weiche Schatten. Der positive oder negative Eindruck wurde demnach nicht durch die Lichtrichtung

(oben, unten oder seitlich) sondern eher durch die Lichtverteilung (in welchem Winkel das Licht auf das Gesicht fällt) beeinflusst. Weiche Schatten lassen unser Gesicht positiver erscheinen als harte Schatten.

Umgekehrt, wenn der Winkel des Lichts zum Gesicht kleiner ist und das Licht harte Schatten wirft, wirkt das Gesicht negativ. Licht von unten wirkt anders als erwartet sogar positiv, wenn es weiche Schatten wirft und die Lichtquelle mit Abstand zum Gesicht gesetzt wird.

Eine Ausnahme zur Regel stellt Licht von oben dar. So werden Schatten unter der Nase und den Wangenknochen positiv wahrgenommen. Vermutlich weil uns diese Art der Beleuchtung von direktem Sonnenlicht bekannt ist.

2.2 Versuch 2/3 – Beleuchtungstest mit realem Versuchsaufbau

Im zweiten Teil der Arbeit wurde der Einfluss von Lichtrichtung und Lichtverteilung auf Basis eines realen Modells getestet. Dazu wurde eine Dinner-Situation für zwei Personen mit direktem und indirektem Licht von oben und der Seite aufgebaut. Durch einen bewusst neutral erstellten Versuchsaufbau wurde das Hauptaugenmerk auf die veränderliche Raumwahrnehmung gelegt. Die Teilnehmer konnten das Ambiente, die Lesbarkeit der Speisekarte, die Person gegenüber und die Attraktivität des Essens bewerten und wurden während der verschiedenen Beleuchtungsszenarien nicht abgelenkt. Die Szene wurde mit einer Holzkonstruktion mit vier zu testenden Lichtkomponenten ausgestattet:

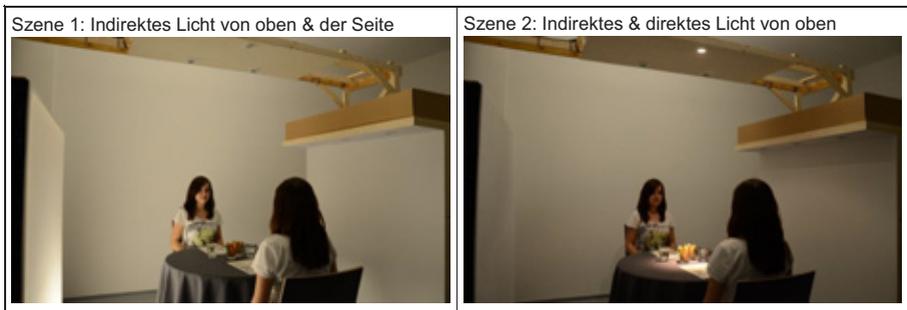
Einflussfaktoren Teil 2: Lichtrichtung: von oben, von unten und von der Seite
Lichtstärkeverteilung: direktes Licht oder indirektes Licht

In der Mitte befindet sich als Testaufbau ein Tisch mit zwei Stühlen. Jeder Teilnehmer bekam ein Glas Wasser, um die Brillanz der Lichtstimmung zu testen, und ein Glas mit Gemüse, um verschieden farbige Lebensmittel und deren Farbwiedergabe beziehungsweise deren Aussehen unter den verschiedenen Lichtstimmungen zu testen.

Auf Tageslicht als weitere Variable wurde in dieser Studie verzichtet, da nicht beeinflusst werden konnte, ob man während der kurzen Testphase Wolken oder direkte Sonne hat. Außerdem würden dann auch die Tageszeit und die Position der Sonne am Himmel den Test weiter beeinflussen, was eine viel längere Testdauer mit mehr Teilnehmern erfordert.

Den Teilnehmern wurden jeweils sechs Szenen gezeigt, bei denen immer zwei verschiedene der vier vorhandenen Lichtkomponenten gleichzeitig eingeschaltet werden.

Tab. 2: Testauswertung – Beleuchtungstest mit realem Versuchsaufbau





Ergebnisse Versuch 2/3 – Beleuchtungstest mit realem Versuchsaufbau

Direktes Licht von oben motiviert die Testteilnehmer mehr von dem angebotenen Essen zu nehmen. Der Effekt fällt immer beim Hinzuschalten einer Szene mit direktem Licht in der Tischmitte, in Folge auf eine Szene ohne direktes Licht, auf. Viele Studienteilnehmer werden sofort durch den hinzukommenden Fokus auf das Essen motiviert, etwas davon zu nehmen! Im Gegensatz dazu bleiben Sie auch motiviert weiter zu essen, wenn der Fokus wieder ausgeschaltet wird.

Um die Leute zum Essen zu motivieren wird eine direkte Lichtquelle als Highlight in der Tischmitte bevorzugt. Dies kann entweder eine Lichtquelle von oben sein oder eine Kerze in der Tischmitte.

Die Testkandidaten fühlen sich sicherer und geborgener, wenn sie nicht selbst im Fokus stehen und weniger beleuchtet werden. Entweder steht dann der Tisch oder die Umgebung im Vordergrund. Vor allem bei einem Essen zu zweit ist es den Personen viel angenehmer, wenn das Essen hervorgehoben wird und die Personen im Hintergrund bleiben.

Eine leichte Umgebungsbeleuchtung in Kombination mit einem Fokus auf dem Tisch erzeugt weiche Schatten auf den Gesichtern. Die Personen selbst sind eher im Hintergrund, die Atmosphäre wird automatisch entspannter und komfortabler, denn man kann nur langsam genauere Details über sein Gegenüber herausfinden. Falten und andere Altersmerkmale sind weniger gut sichtbar und lassen die Person gegenüber jünger wirken.

Umgekehrt wird eine ausgewogene, hellere Beleuchtung in einer Situation mit mehreren Leuten bevorzugt, um alle Gesichter der am Tisch sitzenden Personen besser wahrnehmen zu können und die Gruppe schneller einschätzen zu können.

Hochwertige Beleuchtung mit direktem Licht

Ein Restaurant wirkt qualitativ hochwertiger, wenn man es nur mit direktem Licht beleuchtet und den Fokus auf das Essen auf den Tischen setzt! Das direkte Licht schafft glänzende Reflexionen in den Gläsern und auf den im Raum verwendeten Materialien und hebt dadurch das Ambiente auf ein höheres Level.

Man kann daher ein Restaurant ausschließlich mit direktem Licht beleuchten, aber es sollte nie mit nur diffusen Lichtquellen beleuchtet werden. Rein diffuses Licht wirkt fade, der Raum verschwimmt, da der Fokus fehlt, wohin man schauen soll und folglich werden die Gäste nicht zum Verweilen motiviert.

Direktes und indirektes Licht kombinieren

Die Kombination aus direktem und indirektem Licht schafft eine angenehme Stimmung. Diffuses Licht von oben ist passend für jeden Restauranttyp. Diffus hinterleuchtete Wände oder hinterleuchtetes Glas werden eher für eine Bar bevorzugt. Die Gäste wählen dann auch eher ein Getränk anstatt etwas zu essen. Eine bedruckte Fläche oder ein halbtransparentes Material aus Stoff oder Glas kann so tagsüber unbeleuchtet einen Restaurant- oder Café-Charakter schaffen und abends hinterleuchtet den Raum in eine Bar verwandeln.

2.3 Versuch 3/3 – Beleuchtungstest mit realem Versuchsaufbau

Der dritte Test liefert einfache Ergebnisse über die präferierte Farbtemperatur und Leuchtdichteverteilung für eine direkte Lichtquelle von oben. Der Test wurde nur am Rande der Arbeit ausgeführt um einen Orientierungswert zu erhalten. Das Thema der Farbtemperatur in Bezug auf die Erscheinung des Essens und der Hautfarbe der Gäste bedarf einer gesonderten Analyse welche den Umfang dieser Arbeit übertrifft.

Einflussfaktoren Teil 3: Lichtfarbe: 2400K, 3000K

Lichtverteilung: Direktes Licht mit 10°-Winkel und 25° Winkel

Betrachtung der Wahrnehmung des Gesichts, des Essens und der Speisekarte.

Der Testaufbau sieht zwei am Tisch sitzende Testpersonen vor. Das Licht wird von einem direkt auf die Tischmitte zielenden Downlight erzeugt. Dieses sitzt wie im Test vorher in der Holzkonstruktion. Es wird kein weiteres Licht verwendet.

Testkandidaten bevorzugen wärmere Lichtfarbe

Die wärmere Lichtfarbe wurde meist bevorzugt, da es das Gesicht gesünder und leicht gebräunt erscheinen lässt, das Essen wirkt etwas gelblicher unter 2400Kelvin, weshalb rotes, oranges und gelbes Gemüse appetitlicher wirkt als grünes.

3000K beleuchtet die verschiedenen Farben beim Essen dagegen gleichmäßiger. Das Essen wirkt im direkten Vergleich zu 2400Kelvin sehr frisch und fast etwas künstlich. Die meisten Kandidaten bevorzugten dennoch die wärmere Lichtfarbe.

Die 3000 Kelvin wurden im direkten Vergleich als zu kühl für ein Restaurant empfunden. Verbindungsbereiche wie Korridore oder Nebenräume sollten daher unbedingt dieselbe Lichtfarbe haben wie der Hauptbereich. Schon leichte Farbunterschiede gerade bei Warmtönen können dann als unpassend kühl empfunden werden. Leuchtmittel verschiedener Hersteller sollten daher vor der Ausführung bemustert werden.

Ältere Personen können den Farbunterschied zwischen 2400 Kelvin und 3000 Kelvin schwieriger erkennen. Dies könnte der Ansatz für eine weiterführende Studie mit dem Hauptaugenmerk auf altersbezogene Farbwahrnehmung im Restaurant sein.

Enger Ausstrahlungswinkel legt den Fokus auf das Essen

Die Gesichter erscheinen dunkler bei Verwendung eines 10° -Winkels wegen der Fokussierung des Lichtkegels auf die Tischmitte. Die Situation wirkt dadurch intimer und lässt die Testpersonen näher zum Tisch rücken.

Der 25° -Winkel erzeugt durch die Ausleuchtung des gesamten Tisches stärkere Schatten in den Gesichtern der um den Tisch sitzenden Personen. Dies liegt daran, dass die Personen scharfkantig von oben beleuchtet werden. Die Schatten entstehen deshalb als dunkle Augenringe unter den Augen und als Schlagschatten unter der Nase.

Für ein Restaurant hat das zur Folge, dass es bei breiter Lichtverteilung eine weitere indirekte Lichtquelle von oben oder besser von der Seite geben sollte. Diese lockert die Schlagschatten im Gesicht auf.

Hierbei spielt die Verwendung der Materialien eine wichtige Rolle! Da bei der Reflexion des Lichts Einfallswinkel=Ausfallwinkel gilt, wird das Licht bei einer breit auf den gesamten Tisch ausgerichteten Leuchte bei einer hellen Tischdecke genau ins Gesicht von unten reflektiert und mindert die scharfkantigen Schatten. Je dunkler die Materialien desto mehr Licht von der Seite wird benötigt. Die zweite Lichtquelle kann dunkler sein, damit der Fokus auf den Tischen und dem Essen bleibt.

Die Speisekarte war unter der 10° Grad Ausleuchtung schwerer zu lesen, weil hauptsächlich der obere Teil beleuchtet wird. Bei Verwendung des 25° Grad Winkels wird die Speisekarte heller und gleichmäßiger beleuchtet und ist daher leichter zu lesen. Die Teilnehmer bevorzugten den kleineren Ausstrahlungswinkel für ein Essen zu zweit und den breiteren Winkel für ein Essen mit mehreren Personen.

3 Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Der positive oder negative Eindruck wurde nicht nur von der Lichtrichtung sondern eher von der Lichtverteilung erzeugt. Weiche Schatten lassen unser Gesicht positiver erscheinen als harte. Das Gesicht wirkt weicher und freundlicher, wenn das Licht von vorne kommt. Hingegen je mehr das Licht steiler von der Seite kommt, desto negativer erscheint das Gesicht. Licht von unten wird nicht als negativ empfunden, solange es weiche Schatten im Gesicht erzeugt. Licht von oben wird trotz starken Schatten unter der Nase positiv empfunden, vermutlich da wir diese Beleuchtungsart von direktem Sonnenlicht kennen.

Bei der Planung verschiedener Bereiche geht es vor allem darum Highlights zu setzen. Dies geschieht indem man die Bereiche wählt welche erhellt werden oder dunkel bleiben. Direktes Licht hebt die Qualität eines Restaurants. Es ist daher möglich ein Restaurant nur mit direktem Licht zu beleuchten aber nicht nur mit diffusem Licht. Direktes Licht von oben erzeugt starke Schatten im Gesicht, welche durch zusätzliches seitliches Licht gemildert werden. Hinterleuchtete Wände oder beleuchtetes Glas werden für eine Bar bevorzugt.

Wenn man das Design der Leuchten für ein Restaurant wählt, sollte man die Lichtverteilung auch einbeziehen, da sie essential die gewünschte Atmosphäre beeinflusst.

01 | Vgl.: Book: Reißle Hanna, *Gastronomie & Hoteldesign. Farben formen Emotionen*, Stuttgart, Matthes Verlag GmbH, 2013, S.7f

02 | Vgl.: "restaurant lighting", <<http://www.fsrmagazine.com/fine-dining/illuminate-your-dining-experience>>, (17.07.2014)

03 | Vgl.: "restaurant lighting", <<http://scholarship.sha.comell.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1130&context=articles>>, (02.07.2014)

Es gilt die individuelle Identität des dörflichen und städtischen Raumes trotz Licht zu bewahren!

Dipl.-Ing. Gudrun Schach, Zumtobel Thorn acdc, ZG Lighting Austria GmbH

Problemstellung

Komplexe Raumstrukturen, abwechslungsreiche Raum- und Platzfolgen machen Städte und Orte interessant. Nachts ist dieses Raumgefüge in der Regel nicht erlebbar. Die Ursachen liegen zum einen in einer oft konventionellen Straßenbeleuchtung, zum anderen in einer zum Teil extremen Überstrahlung von Fassaden und Schaufenstern.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Anhand dem Projekt Lech am Arlberg wird eine ganzheitliche Herangehensweise an die Entwicklung eines individuellen Lichtkonzeptes für den öffentlichen Raum präsentiert.

Oberste Priorität war es, dass Licht dem Raum dient und sich intelligent integriert ohne mit der Architektur in Konkurrenz zu treten. Neben einer ordnungsgemäßen Grundbeleuchtung wird der Wiedererkennungswert des Ortsbildes auch in der Nacht erhalten und das Raumgefüge erlebbar gemacht. Durch die sensiblen und einfühlsamen Lichtlösungen wurde eine äußerst hohe Akzeptanz innerhalb der Bevölkerung erreicht.

Der Ort identifiziert sich wieder mit seiner gebauten Umwelt.

Realisierungsgrad

Der Vortrag präsentiert die Lichtlösung im Gesamtkontext, die zugrunde gelegten Planungsparameter, zeigt beide realisierten Projekte und stellt die gewählte Lichtlösung kurz vor. Es wurde ein spezielles LED-Lichtkonzept ausgearbeitet.

Das Lichtkonzept berücksichtigt die Bewegungsbereiche der Passanten und die Helligkeitsverläufe beziehen die städtebaulichen Gegebenheiten in das Gesamtkonzept ein. Sämtliche Lichtsysteme werden über eine neuartige Funkanlage geschaltet und stufenlos geregelt.

It is essential to preserve the individual identity of village and urban areas despite light!

Gudrun Schach, Zumtobel Thorn acdc, ZG Lighting Austria GmbH

Issue

Complex spatial structures and varied space sequences make cities and places interesting. At night, generally this spatial structure cannot be experienced. The reasons are firstly an often conventional street lighting, the other an often bright glare of facades and shop windows.

Description of the innovation/»best practice«

Based on the project Lech am Arlberg the lecture gives an insight in the development of an individual lighting concept for the public space and its holistic approach.

The first priority was that light is there to serve the space and it should be integrated intelligent without competing with the architecture. In addition to a proper general illumination, the recognition of the local image is obtained even at night and the space microstructure can be experienced. By sensitive lighting solutions extremely high acceptance was achieved within the population.

The local community identifies itself again with its built environment.

Level of realization

It's a presentation of the lighting solution in the overall context and a look at the underlying planning parameters, a special LED lighting concept was elaborated.

The lighting concept takes into account the range of movement of the pedestrians and the brightness progression refer the urban planning in the overall concept. All lighting systems are switched via a new radio system and electronic control.

Es gilt die individuelle Identität des dörflichen und städtischen Raumes trotz Licht zu bewahren!

Gudrun Schach,

Zumtobel Thorn acdc, ZG Lighting Austria GmbH, Wagramer Str. 19, A-1220 Wien

Zusammenfassung

Die Möglichkeiten und die Effizienz der LEDs und des Lichtmanagements verführen mancherorts dazu, mit Licht im urbanen Raum verschwenderisch umzugehen. Dabei ist ein reduzierter, gezielter Einsatz von LEDs viel effektvoller, wie die Ortsbildbeleuchtung von Lech am Arlberg beweist.

1 Umgang mit Licht im urbanen städtischem Raum

Licht kann Architektur unterstützen oder bis zur Unlesbarkeit verfremden. Abhängig von Intensität, Lichtrichtung, Strahlungscharakteristik und Lichtfarbe kann ein und dasselbe Gebäude unterschiedlich wirken: Festlich wie ein Theater, repräsentativ wie ein Rathaus, unspektakulär wie ein Verwaltungsbau. Nicht nur kulturelle Institutionen inszenieren ihr Haus mit Licht, auch Betreiber von Shoppingcentern und Großmärkten positionieren ihre Marke mit grellen, hellen Fassaden.

Das führt oft zu Gewöhnungseffekten und visueller Übersättigung. Das Lichtfeuerwerk an Fassaden wird selbstleuchtenden Werbeflächen immer ähnlicher. Europäische Orts- und Stadtbilder sind anders als Stadträume in den USA und Asien. Die Lichtinszenierung im öffentlichen Raum war ursprünglich auf Schlösser, Burgen, Ruinen und den Kirchturm im Ort beschränkt. In Städten wurden Brücken, Plätze und touristische Sehenswürdigkeiten beleuchtet. Die Lichtrevolution - LED verführt dazu, mit Licht verschwenderisch umzugehen.

Weniger ist mehr

Eine nachhaltige Lichtplanung beinhaltet nicht nur die Wahl effizienter Leuchtmittel. Energie zu sparen, kann auch eine Reduktion aufs Wesentliche bedeuten und das erfordert eine weitaus intensivere Auseinandersetzung mit der Architektur. Abwechslungsreiche Raum- und Platzfolgen machen Städte und Orte interessant. Nachts aber sind sie in der Regel nicht erlebbar.

2 Lech, ein Nobelskiort im neuen Licht

Lech ist als überschaubare dörfliche Siedlung erhalten geblieben und stellt dennoch sehr hohe Ansprüche an sich selbst. So wurde Lech in der Vergangenheit auch mit dem Titel "Schönstes Dorf Europas" ausgezeichnet. Die meisten Touristen kommen in der Winterzeit – gerade dann möchte sich das Dorf von seiner schönsten Seite zeigen: Hierzu wird der Ort seit kurzem in perfektes Licht getaucht. Allerdings nicht mit einer schreienden Event-Illumination, sondern durch eine akzentuierende, raumbildende Beleuchtung, wel-

che die Qualitäten des Ortes hervorhebt. Die vorhandene Straßenbeleuchtung mit ihrer veralteten Technik war einfach nicht mehr zeitgemäß. Es bedurfte vieler Gespräche, viel Überzeugungsarbeit und vieler Informationsveranstaltungen, um Politik, Verwaltung und die ortsansässigen Hoteliers mit ins Boot zu holen und für ein neues Lichtkonzept basierend auf der LED-Technologie zu gewinnen. Dieses wurde gemeinsam mit dem Lichtberater Dieter Bartenbach entwickelt und mit Hilfe von Zumtobel umgesetzt.



Abb. 1: Lech am gleichnamigen Fluss im österreichischen Bundesland Vorarlberg

2.1 Herkömmliche Außenraumbeleuchtung: ein "Lichtbrei", der die Ortsgestalt "verwischt"

Die Situation, die Dieter Bartenbach zu Beginn seiner Planungen vorfand, war so, wie er sie auch in anderen Orten immer wieder sieht: ein "Lichtbrei", der die Ortsgestalt "verwischt", hervorgerufen durch eine herkömmliche Außenraumbeleuchtung, mit meist frei strahlenden diffusen Lampen. Dagegen kämpft mit einer extremen Überstrahlung die Beleuchtung von Schaufenstern und Werbeanlagen an – die ursprüngliche Gestalt der Stadt verschwindet. "Die räumliche Wahrnehmung kippt, indem der Fokus des Betrachters allein auf die Blendquellen gerichtet wird", erklärt Bartenbach. Über die neue LED-Beleuchtung wird Lechs nächtliches Ortsbild mit seinen typischen Elementen jetzt akzentuiert und bewusst in Szene gesetzt.



Abb. 2: Das Lichtkonzept holt den Fluss Lech zurück ins Ortsbild

2.2 Das Lichtsystem

Die dafür speziell gefertigte Leuchte löst die Lichtintensität auf mehrere LED-Punkte auf, so dass Passanten kaum noch geblendet werden. Zudem strahlt das Licht deutlich präziser und gerichtet als früher. Dies wird durch eine exakte Fräsung der LED-Lichtpunkte erreicht. Ein weiterer Vorteil ist der modulare Aufbau ähnlich einem Baukastensystem: Die Leuchten können mit 6 bis 34 LED-Punkten mit jeweils circa 2 Watt konfiguriert werden. So ist die Lichtsituation je nach Bedarf anpassbar.

Auch für die Lichtmasten wurden je nach Standort unterschiedliche Ausführungen erarbeitet. Es sind primär linear ausgerichtete Räume, die den Ort ausmachen und mittels Licht herausgearbeitet werden: die Hauptstraße, die angenehm als Promenade ausgestrahlt wird, die Fassadenreihe und der Fluss. Gerade den Fluss im nächtlichen Ortsbild erlebbar zu machen, war den Planern wichtig. Die Beleuchtung holt ihn zurück in den Ort, indem Ufer und Mauerflächen angestrahlt werden. Beide spiegeln sich im Wasserverlauf wider und ergeben durch die Bewegung der Strömung ein dynamisches Bild, das den Betrachter fesselt – eine Raamtiefenwirkung entsteht.

Raumbildend ist auch die Beleuchtung der Fassadenflächen. Hier zeigt sich der besondere Vorteil des Baukastensystems. Statt an den Masten lassen sich die Leuchtenköpfe auch an den Fassaden montieren und sorgen somit nicht nur für ein einheitliches Erscheinungsbild und eine harmonische Lichtwirkung, sondern auch für eine effektvolle Inszenierung der Hotel-Fassaden. Dies überzeugte auch die Hoteliers, welche diese Maßnahmen selbst finanzieren.



Abb. 3: Die speziell gefertigten Leuchten wurden teilweise direkt an die Fassaden montiert und in die Architektur integriert.

2.3 Lichtmanagement - "Smart-City" Gedanke

Der Umgang mit dem neuen Licht erfolgt gut dosiert: Von Beginn der Dämmerung an bis 22 Uhr sind alle Stadträume beleuchtet, ab dann werden die Fassadenaufhellungen abgeschaltet, ab Mitternacht wird die Helligkeit der Straßenbeleuchtung je nach Bedarf reduziert, und bis zum Morgen leuchtet lediglich die Straßengrundbeleuchtung. Die feinen Abstimmungen der Helligkeitslevel ermöglicht eine spezielle, webbasierte Lichtsteuerung: In jeder Leuchte ist ein Funksensor platziert, über den das Licht gedimmt und geschaltet werden kann.

2.4 Eine Investition in die Zukunft

Die neue Ortsbeleuchtung ist nicht nur optisch ein Gewinn. Eine präzise Lichtbündelung, gekoppelt mit einer effektiven Entblendung und Steuerung machen die verwendeten LED-Leuchten effizienter und naturverträglicher als herkömmliche diffus- und freistrahkende Konzepte, die das Licht zu 60 Prozent wirkungslos in den Himmel geben. Lichtverschmutzung und Störung der Kleinlebewesen werden reduziert.

Das Licht verbreitet eine positive Atmosphäre und bringt Einsparungen bei den Energiekosten. Noch nie wurde in Lech eine Veränderung im Ortskern so positiv aufgenommen – Gäste und Einwohner sind begeistert.“



Abb. 4: Das Licht und die Leuchten werden positiv aufgenommen.

3 Weckruf für weitere sensible Lichtlösungen

Nichts hält uns Lichtplaner ab, ähnlich faszinierende Lichtlösungen zu realisieren – die Lichtwerkzeuge dafür sind einsatzbereit!

Entblendung von transparenten Flächenlichtleitern nach DIN EN 12464-1 durch Nanostrukturen

Norbert Fernkorn, SPITTLER Lichttechnik GmbH, Stapelner Straße 1-3, 38644 Goslar

Problemstellung

Flächenleuchten zur Allgemeinbeleuchtung werden häufig mit Lichtleitern und Seitenlichteinkopplung durch LED realisiert. Das Ergebnis ist im Allgemeinen eine annähernd lambert'sche Lichtverteilung wodurch für Entblendung der Lichtstrom reduziert werden muss. Bei Entblendung mit Mikro-Prismen sind dagegen keine transparenten Leuchten möglich.

Ziel

Realisierung eines neuartigen, transparenten Lichtleiters, der eine bildschirmarbeitsplatzgerechte Beleuchtung gewährleistet, welche die Grenzwerte für Entblendung gemäß DIN EN 12464-1 unterschreitet, aber die Mindestbeleuchtungsstärken am Arbeitsplatz liefert.

Beschreibung der Innovation

Im Rahmen eines interkorporativen Forschungsprojektes wurde erreicht, eine miniaturisierte Prismenstruktur in den Lichtleiter zu integrieren. Voraussetzung dafür war eine aufwändige Simulation der Strukturen, um die geforderte Lichtverteilung zu erreichen. Durch die Miniaturisierung der Prismenstruktur konnte dabei eine sehr hohe Effizienz des Lichtleiters erreicht werden. Der wichtigste Aspekt bei der Miniaturisierung sind neben der exakten Kalkulation und Simulation vor allem die Anforderungen an die Präzision der Prismenstrukturen, deren Scheitelradien im Bereich weniger Nanometer liegen müssen, um die geforderten Lichtlenkungeigenschaften zur Entblendung gemäß DIN EN 12464-1 zu erreichen. Diese Nanostrukturen in der geforderten Präzision sind jedoch nicht mit herkömmlichen Bearbeitungsmaschinen realisierbar. Durch die Miniaturisierung der Strukturen wird zusätzlich erreicht, dass der Lichtleiter, welcher unter Licht über die gesamte Fläche eine homogene Lichtverteilung liefert, im ausgeschalteten Zustand nahezu transparent wirkt.

Realisierungsgrad

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut IPT in Aachen konnten auf Ultrapräzisionsmaschinen die geforderten Strukturen reproduzierbar realisiert werden. Um die Lösung produktionstechnisch umsetzen zu können, wird ein Substrat beschichtet und in diese Schicht werden die Nanostrukturen eingepägt. Abschließend wird das bearbeitete Substrat auf einen Lichtleiter laminiert. Die Teile werden zu einer optischen Einheit, welche die geforderte Lichtlenkung bei gleichzeitiger Entblendung realisiert. Durch die Lichttechnischen Vermessungen von erstellten Prototypen konnte die korrekte Funktion verifiziert werden. Das Resultat ist ein nahezu transparenter Lichtleiter, der im indirekten Lichtanteil sehr breit streut, um eine homogene Grundbeleuchtung im Raum herzustellen und im direkten Lichtanteil das Licht auf den Arbeitsplatz fokussiert und dabei die Grenzwerte zur Entblendung gemäß DIN EN 12464-1 einhält. Die Normkonforme Beleuchtung wurde sowohl rechnerisch mit Lichtberechnungssoftware als auch im Labor nachgewiesen.

Glare suppression at transparent light guides according EN 12464-1 via nano structures

Norbert Fernkorn, SPITTLER Lichttechnik GmbH, Stapelner Straße 1-3, D-38644 Goslar

Issue

Panel lights for general lighting are often realized by light guides with side light LED. The result is generally an approximately lambertian light distribution, where the limiting values for the illumination of computer workplaces according to EN12464-1 could be only meet by reducing the total lumen output of the luminaire.

Aim

Realization of a new kind transparent light guide who provide a illumination which is suitable for VDU workplaces and fulfill the requirements for glare reduction regarding EN 12464-1 but delivers the minimum illuminance for the workplace.

Description of the innovation

Within the framework of an intercorporate research project it was possible to realize the integration of miniaturized prism structures in the light guide. The requirement was a complex simulation of the structures, to reach the requested light distribution. Due to the miniaturizing of the prism structures, the multilayer light guide achieved a high efficiency. The most important aspect for the miniaturizing is beside the exact calculation and simulation primarily the requirements at the precision of the prism structures whose vertex radius have to be in the range of few nanometers to fulfill the requirements for glare reduction regarding EN 12464-1. These nanostructures are not realizable by conventional machine tools.

Due to the miniaturization of the prism structures the light guide, who delivers a homogenous light distribution over the surface, is nearly transparent in power off status.

Level of realization

In cooperation with the Fraunhofer institute IPT in Aachen, the requested structures are realized with ultra-precision-machining. For the production related realization, a substrate is coated and in this layer the nano structures are embossed. Finally the machined substrate is laminated on a light guide. The two parts become one unit, which realized the requested light control synchronous with the glare reduction.

Within lighting measurements at realized prototypes the proper operation is verified. The result is a nearly transparent light guide, who delivers a wide diffusion at the indirect light part to reach a homogenous ground level in the office room. The direct light part focused the light to the workplace and meets the limits for glare reduction corresponding to the EN 12464-1. The conformance with the standards is proved by calculation with light calculation software as well as in the lighting laboratory.

Entblendung von transparenten Flächenlichtleitern nach DIN EN 12464-1 durch Nanostrukturen

Norbert Fernkorn, SPITTLER Lichttechnik GmbH, Stapelner Straße 1-3, 38644 Goslar

Zusammenfassung

Im Rahmen eines interkorporativen Forschungsprojektes wurde erreicht, eine miniaturisierte Prismenstruktur in den Lichtleiter zur Seitenlichteinkopplung zu integrieren. Durch die Miniaturisierung der Prismenstruktur konnte dabei eine sehr hohe Effizienz des Lichtleiters erreicht werden. Der wichtigste Aspekt bei der Miniaturisierung sind neben der exakten Kalkulation und Simulation vor allem die Anforderungen an die Präzision der Prismenstrukturen, deren Scheitelradien im Bereich weniger Nanometer liegen müssen, um die geforderten Lichtlenkungeigenschaften zur Entblendung gemäß DIN EN 12464-1 (Leuchtdichte und UGR) zu erreichen. Dadurch wird zusätzlich erreicht, dass der Lichtleiter, welcher unter Licht über die gesamte Fläche eine homogene Lichtverteilung liefert, im ausgeschalteten Zustand nahezu transparent wirkt.

1 Einleitung

Flächenleuchten zur Allgemeinbeleuchtung werden häufig mit Lichtleitern und Seitenlichteinkopplung durch LED realisiert. Das Ergebnis ist im Allgemeinen eine annähernd lambert'sche Lichtverteilung. Zur Reduzierung der Blendung muss der Gesamtlichtstrom reduziert werden. Wird eine Blendungsreduktion gemäß DIN EN 12464-1 benötigt, kommen daher häufig Mikroprismen zum Einsatz, welche den Lichtanteil oberhalb von 65° reduzieren. Bei Entblendung mit Mikroprismen sind jedoch keine transparenten Leuchten möglich.

2 Ausgangspunkt: Stand der Technik

2.1 Lichtleiter für Seitenlichteinkopplung

Leuchten mit Lichtleitern für Seitenlichteinkopplung haben den Vorteil einer geringen Aufbauhöhe, da sich Lichtquelle und Lichtverteilung auf einer Ebene befinden. Das Licht wird seitlich eingekoppelt und aufgrund der Totalreflektion an den Grenzflächen innerhalb des Lichtleiters transportiert. Werden diese Grenzflächen durch Störungen unterbrochen, erfolgt an dieser Stelle eine Ablenkung des Lichtes und bei Überschreitung des Grenzwinkels eine Auskopplung des Lichtes aus dem Lichtleiter. Diese Störungen werden gezielt eingebracht.

Allgemein übliche Methoden dafür sind z.B. Bedruckung, Prägung oder Laserbearbeitung. Aufgrund dieser üblichen Methoden zur Lichtauskopplung erhält man als Resultat i.A. eine nahezu lambert'sche Lichtverteilung. Diese sorgt für eine gleichmäßige Lichtverteilung, wobei eine Reduzierung der Blendungswirkung nur durch eine deutliche Reduzierung des Lichtstromes möglich ist.

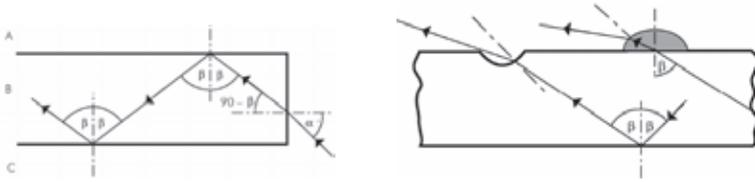


Abb. 1: Links: Lichtlenkung innerhalb von Lichtleitern mittels Totalreflexion an den Grenzflächen, Rechts: Lichtauskopplung aus dem Lichtleiter durch Störungen an der Oberfläche

2.2 Lichtlenkende Prismen

Prismen sind für viele verschiedene Anwendungen in der Lichttechnik bekannt. In den letzten Jahren haben sich sogenannte Mikroprismen einen festen Platz in der Beleuchtung erarbeitet, da mit ihnen die Lichtverteilung der Leuchte gezielt beeinflusst werden kann. Im Gegensatz zu günstig zu fertigenden Streuprismen, sind präzise gefertigte Prismen in der Lage die Blendung bei gleicher Lichtmenge deutlich zu reduzieren. Ausschlaggebend ist hierfür die Struktur der Prismen, insbesondere die Winkel und vor allem die Präzision, mit der diese Prismen gefertigt werden. Insbesondere die Größe der Radien der Prismenkanten und das Verhältnis Radius zu Kantenlänge sind maßgeblich für den Anteil von Streulicht bei der Lichtlenkung.

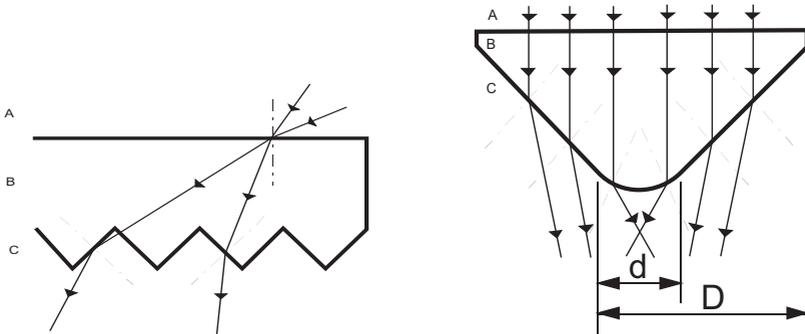


Abb. 2: Links: Prinzip der Lichtlenkung an Prismenstrukturen mittels Brechung und Reflexion Rechts: Störung der gezielten Lichtlenkung durch Radien in der Prismenstruktur

Um eine möglichst gute Qualität der Lichtlenkung zu erreichen sollte der Anteil des Radius an der Gesamtstruktur (das Verhältnis d/D in Abb2.) unter 1% betragen. Bei einem Radiusanteil größer 10% eignet sich das Prisma eher zur Lichtstreuung, es erfolgt keine effektive Blendungsreduktion. Wenn die Prismenstrukturen verkleinert werden sollen, so müssen die Radien an den Prismenkanten im gleichen Verhältnis mit reduziert werden, um die Lichtlenkungeigenschaften der Prismen zu erhalten.

3 Konzept

3.1 Funktionsprinzip

Die Grundidee der beschriebenen Lösung bestand darin, die beiden Technologien von Prismen zur Lichtlenkung und Lichtleitern mit Seitenlichteinkopplung zu einer physikalischen Einheit zu verschmelzen. Die Lichtoptik ist somit gleichzeitig Lichtleiter und Reflektor. Ohne Bedruckung oder Lasergravur wird so eine gezielte Lichtlenkung an den präzisen Flächen der Prismen erreicht. Zu diesem Zweck müssen die Prismenstrukturen in die Oberfläche des Lichtleiters eingebracht werden. Da die Dicke der Lichtleiter beschränkt ist und die Prismentiefe die effektive Höhe der Lichtleiter reduziert, muß die Höhe der Prismen möglichst gering gehalten werden, damit die mögliche Stärke des Lichtleiters nicht zu sehr eingeschränkt wird. Dies hat zur Folge, dass die Anforderungen an die Präzision der Prismenstrukturen entsprechend steigen.

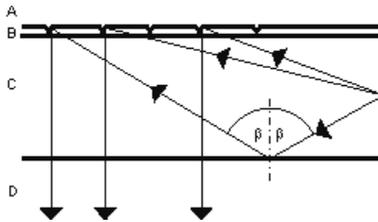


Abb. 3: Prinzip der Integration der Prismenstrukturen in den Lichtleiter

3.2 Kalkulation

Vor der praktischen Umsetzung wurde eine optische Simulation der Strukturen im Lichtleiter durchgeführt um eine optimal angepasste Struktur-Dichte der 3-dimensionalen Muster zu erreichen. Als mögliche Strukturelemente wurden Gitter, Linsen, V-Nuten und Pyramiden mit Größen im Bereich zwischen $5\mu\text{m}$ und $100\mu\text{m}$ berechnet. Bei dieser optischen Simulation wurde eine Zielgröße der Prismen von ca. $30\mu\text{m}$ ermittelt. Dies hat zur Folge, dass die Radien an den Kanten der Prismen mit einer Größenordnung im Nanometerbereich realisiert werden müssen, damit die erforderliche Blendungsreduktion erreicht wird. Diese Miniaturisierung hat andererseits zur Folge, dass die Oberflächenstrukturen ohne Lichteinkopplung kaum erkennbar sein sollten und der Lichtleiter trotz der enthaltenen Nanostrukturen nahezu transparent wirkt.

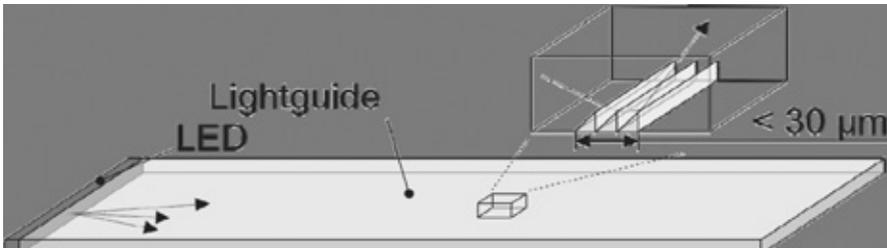


Abb. 4: Prinzip und Größenverhältnisse bei der Integration der Prismenstrukturen in den Lichtleiter

4 Umsetzung

4.1 Technologische Versuche

Nachdem die theoretische Realisierbarkeit anhand der Simulation nachgewiesen wurde, bestand die nächste Aufgabe in der technologischen Umsetzung. Hierzu wurden mit Hochpräzisions-Diamant-Werkzeugen Versuchsstrukturen mit der geforderten Dimension in Folien eingeprägt. Diese Folien wurden anschließend auf den Lichtleiter laminiert, so dass sie zu einer lichttechnischen Einheit verschmelzen. Anschließend wurden die realisierten Strukturen im Mikroschliff analysiert, um die Qualität der Strukturen zu beurteilen.



Abb. 5: Beispiel eines Schnittes durch eine realisierte Mikrostruktur

Nachdem auch die praktische Realisierbarkeit nachgewiesen war, wurden erste Muster mit den kalkulierten Nanostrukturen erstellt, die für eine BAP-taugliche Entblendung gemäß DIN EN 12464-1 errechnet wurden. Sowohl die geforderte Geometrie als auch die Präzision konnten damit erreicht werden.

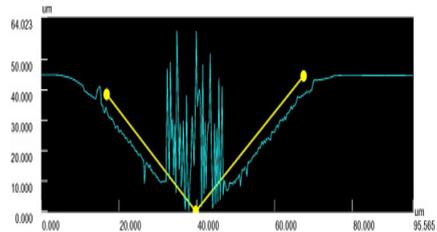
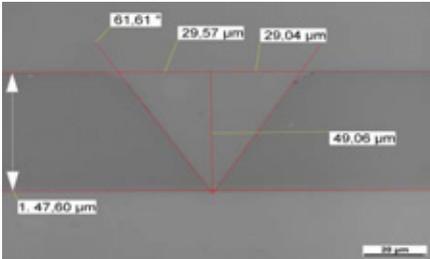


Abb. 5: Mikroschliff und Analyse der realisierten Mikrostruktur

4.2 Fertigungskonzept

Bei der Suche nach einer geeigneten Fertigungstechnologie schieden Spritzguß und Heißprägen des Lichtleiters mit Struktur aufgrund der begrenzten Präzision auf der gesamten Fläche aus. Aufgrund der positiven Erfahrungen bei der Erstellung der Technologiemuster wurde ein Zweischritt-Verfahren gewählt: Zunächst erfolgte die Fertigung einer Folie mit den gewünschten Strukturen, die ihrerseits anschließend auf den Lichtleiter auflaminiert wurde. Durch diese Technologie, welche zur Produktion von mikro-optischen Komponenten verwendet wird, kann die präzise Replikation der Strukturdetails gewährleistet werden. Zu diesem Zweck musste zunächst in einem Hochpräzisionsprozess mit Diamant-Werkzeugen ein Master mit den Präzisionsstrukturen gefertigt werden. Da die geforderte Präzision nicht mit thermischem Prägen erreichbar ist, erfolgt auch die Fertigung der Folie in mehreren Schritten: Beschichtung des Substrates, Prägen der Nanostruktur in die Beschichtung, Aushärtung der Beschichtung unter UV-Strahlung.



Abb. 6: Erstes Master-Werkzeug mit den Diamant-geprägten Präzisionsstrukturen

5 Ergebnis

Die gefertigten Mehrschicht-Lichtleiter mit Nanostrukturen wurden in speziell dafür designte Leuchtenkörper für Lichtleiter mit Seitenlichteinkopplung integriert, um damit die notwendigen lichttechnischen Messungen möglichst praxisnah durchführen zu können.



Abb. 7: Prototyp der Leuchte mit Nanostrukturen im Lichtleiter: SPITTLER SL719 LED

Der semitransparente Lichtleiter befindet sich in einem flachen Leuchtenrahmen mit einer Bauhöhe von nur 20mm. Im ausgeschalteten Zustand, bei nahezu transparentem Erscheinungsbild, schwebt der Rahmen quasi optisch frei im Raum.

Bei den lichttechnischen Vermessungen im Labor konnte der messtechnische Nachweis erbracht werden, dass die im Lichtleiter integrierten Nanostrukturen die Lichtlenkung im geforderten Maße realisieren. Anhand der Messergebnisse konnte die BAP-Tauglichkeit nach DIN EIN 12464-1 nachgewiesen werden – sowohl mit einem UGR-Wert <19 als auch mit einer Leuchtdichte $<3000\text{cd/m}^2$. Anschließende Lichtberechnungen für übliche Bürosituationen zeigten die Praxistauglichkeit der neuen Lichtleiter-Technologie mit integrierten Nanostrukturen.

Diffraktive Optiken zur chromatischen und thermischen Linsenkorrektur sowie zur Lichtformung

Schöne, M.¹, Sandfuchs, O.², Neumann, C.³

¹) L-LAB Lippstadt, Deutschland, ²) Hochschule Hamm-Lippstadt, Deutschland,

³) Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland

1. Einführung

Diffraktive Optiken nutzen die Welleneigenschaften von Strahlung und ermöglichen daher eine Vielzahl an Funktionalitäten, die mittels refraktiver Optiken kaum bis gar nicht realisierbar sind. In diesem Zusammenhang werden im Folgenden die Möglichkeiten zur chromatischen und thermischen Korrektur bestehender refraktiver Systeme sowie die Möglichkeiten zur Erzeugung von Lichtverteilungen ohne Blenden untersucht. Dabei verbessern die Korrekturen bestehende optische Systemlösungen, während die Formung von Lichtverteilungen die Substitution von Blenden und Reflektoren sowie Effizienzen >90% ermöglicht.

2. Herausforderungen

Die Herausforderungen liegen dabei insbesondere im Design der optischen Elemente und unterscheiden sich für die Betrachtungen der Korrektur und der Lichtformung.

Der primäre auslegungstechnische Aspekt bei der Formung von Lichtverteilungen mittels diffraktiver Elemente bedeutet, für polychromatische Weißlichtquellen eine farbsaumfreie Hell-Dunkel-Grenze zu erzeugen. Durch die starke chromatische Abhängigkeit und die Ablenkung in unterschiedliche Beugungsordnungen erfordert dies eine innovative Auslegung der Elemente. Zudem muss die Gesamteffizienz über der aktueller Systeme liegen

Dem gegenüber muss zur chromatischen und thermischen Linsenkorrektur ein neuer Designansatz entwickelt werden, da beide Korrekturen für sich den jeweils anderen Effekt verstärken.

3. Untersuchungen zu Linsenkorrektur und Lichtformung

In diesem Rahmen wurden neuartige und innovative Designansätze entwickelt, die die genannten Funktionen erzielen.

Zur Lichtformung werden Gitterzellenarrays untersucht, die nach einem sequentiellen Verfahren ausgelegt wurden und eine Scheinwerferverteilung erzeugen. Die Untersuchungen richten sich daran, eine chromatisch korrigierte Hell-Dunkel-Grenze zu erzeugen sowie eine homogene, scheinwerferähnliche Ausleuchtung hoher Effizienz zu generieren.

Parallel dazu werden Untersuchungen zur chromatischen und thermischen Linsenkorrektur vorgestellt. Dabei wird untersucht, inwieweit eine chromatische und thermische Korrektur von refraktiven Linsen möglich ist. Hierzu werden zunächst Ergebnisse einer chromatischen Korrektur vorgestellt, die die Grundlage der Untersuchungen bilden. Darauf aufbauend werden erwartete Einflüsse des Herstellungsprozesses untersucht und bewertet. Abschließend werden daraus Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeiten definiert.

Diffraction Optics in Headlamp Systems – Lens Correction and Generation of Light Distributions

Schöne, M.¹, Sandfuchs, O.², Neumann, C.³

¹) L-LAB Lippstadt, Germany, ²) Hamm-Lippstadt University of Applied Science, Germany,

³) Karlsruhe Institute of Technology, Germany

1. Introduction

Diffraction Optics are using the waves characteristics of light and allow a lot of possibilities that cannot be realized by using refractive optics solely. In case of headlamps, these are the chromatic and thermal correction of refractive lenses and the generation of light distributions. This leads to the enhancement of the appearance of the light distribution and to a higher efficiency of the system. The substitution of reflectors and apertures allows efficiencies of the light generating surface > 90%.

2. Challenges

The challenges are the Design of the elements that has to consider the function of the structures and the manufacturing precision.

The diffraction effects allow the correction of refractive lenses or the generation of light distributions but are also generating stray light because of the diffraction orders. The design order is the first diffraction order, therefore all the others are stray light and has to be reduced.

Because of the broadband light sources, the main target of diffraction structures is the generation of light distributions without any colour fringes at the cut-off line. Additionally, the thermal behaviour of a hybrid lens needs to be corrected to minimize the influence of the thermal behaviour to the light distribution.

3. Studies to the Correction of Lenses and the Generation of Light Distributions

In this context, innovative design concepts have been developed to realize the chromatic and thermal lens correction and the generation of high efficient light distributions.

The generation of light distributions is realized by using grating cell arrays. The cells are assigned to the cells of the light distribution sequentially. Studies have to examine the quality of the resulted distributions. In this context, cut-off lines without colour fringes as well as the efficiency of the element are considered.

Furthermore the correction of chromatic and thermal behaviour of refractive lenses is presented. First of all, the correction for ideal optical elements is calculated and represents the upper bound of the correction level. In a second step the influence of typical fabrication based errors of the height profile of diffraction lenses to the light distribution is shown by results of the optical simulation.

Diffraktive Optiken zur chromatischen und thermischen Linsenkorrektur sowie zur Lichtformung

Schöne, M.¹, Sandfuchs, O.², Neumann, C.³

¹) L-LAB Lippstadt, Deutschland, ²) Hochschule Hamm-Lippstadt, Deutschland,

³) Karlsruher Institut für Technologie

Zusammenfassung

Die Nutzung diffraktiver Optiken ermöglicht im Scheinwerfer zum einen die chromatische und thermische Korrektur der Lichtverteilungen und zum anderen deren effiziente Erzeugung. Anhand der chromatischen Korrektur einer Abblendlichtverteilung durch die Substitution der refraktiven durch eine hybride Linse werden erwartete Einflüsse und Auswirkung von spanenden Herstellungsverfahren untersucht. Dies umfasst das Höhenprofil diffraktiver Linsen, Kantenverrundungen bzw. –schrägen sowie die Positioniergenauigkeit der Kavitäten im Herstellungsprozess. Abschließend wird eine Untersuchung präsentiert, die die theoretische, maximale Effizienz eines Scheinwerfersystems unter idealen Rahmenbedingungen ermittelt, bei dem die Lichtverteilung mittels Gitterzellenarray erzeugt wird. Dazu werden parallele Ausleuchtung sowie ideale Gittergeometrien angenommen.

1 Einleitung

Die Substitution von Gläsern durch Kunststoffe im Scheinwerfer [1] führt zu neuen Möglichkeiten, aber auch zu neuen Herausforderungen. Die Verarbeitung von Thermoplasten und Elastomeren ermöglicht die massenproduktionstaugliche Fertigung komplexer Bauteilgeometrien [2], die sowohl die Abformungen diffraktiver als auch refraktiver Optiken einschließt.

Eine generelle Anforderung an Scheinwerfersysteme betrifft deren Effizienz, die selten über 40% liegt. Dies beschreibt das Verhältnis zwischen dem Lichtstrom, der die Lichtquellen verlässt und dem Lichtstrom, der das Scheinwerfersystem verlässt. Durch die Möglichkeiten der Abformung rücken daher diffraktive Elemente zunehmend in den Fokus [3], um die Effizienz zu steigern. Denn durch deren wellenoptisches Verhalten können diese Elemente als Kollimator oder als verteilungsformendes Element genutzt werden. Letzteres bietet die Möglichkeit, eine Scheinwerferlichtverteilung ohne Blende zu erzeugen, welche den Großteil der Verluste ausmacht. Daher wird untersucht, inwieweit derartige Elemente vor dem Hintergrund der Fertigbarkeit ausgelegt werden können und welche Gesamteffizienzen maximal erreichbar sind.

Darüber hinaus können diffraktive Linsen zur chromatischen und thermischen Korrektur von refraktiven Linsen genutzt werden [4]. Diese Korrekturen ermöglichen komplexe optische Systeme, die bislang aufgrund der starken chromatischen bzw. thermischen Abhängigkeiten nur sehr schwer bis gar nicht realisierbar sind. Allerdings basieren die bisherigen Ergebnisse auf idealen Strukturprofilen, die in dieser Form aufwändig gefertigt werden müssen. Diese Betrachtungen werden daher im Folgenden dahingehend erweitert, dass der Einfluss der relevanten Höhenprofilveränderungen auf eine Abblendlichtverteilung simulativ untersucht wird.

2 Fertigungseinflüsse bzgl. der DOEs auf die Lichtverteilungen

Als Basis für die Untersuchungen der Linsenkorrekturen dient ein herkömmliches Projektionsmodul gemäß Abbildung 1. Dieses hat den Vorteil, dass die Anzahl der benötigten optischen Elemente auf ein Minimum reduziert wird und damit die Interpretation der Ergebnisse vereinfacht. Die diffraktive Linsenstruktur ist auf der gekrümmten Linsenoberfläche aufgebracht und als einfache Addition des refraktiven mit dem diffraktiven Höhenprofil als Hybridlinse ausgeführt.

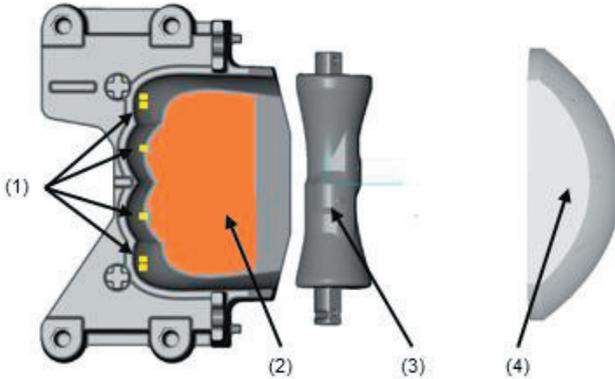


Abbildung 1: Projektionsmodul bestehend aus LED-Lichtquellen (1), einem Reflektorelement (2), der Blende (3) und der abbildenden Linse (4) [4]

Der Vergleich der Simulationen des Projektionsmoduls mit refraktiver und Hybridlinse ergibt die beiden Verläufe an der Hell-Dunkel-Grenze gemäß Abbildung 2. Daran ist zu erkennen, dass die chromatische Korrektur zu einem deutlich kleineren Farbsaum und einer deutlichen Erhöhung der möglichen Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze sowie zu einem erhöhten Streulichtanteil führt, der jedoch um ein Vielfaches unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte liegt. Dabei muss beachtet werden, dass auf weitere Strukturierungen zum Aufweichen der Hell-Dunkel-Grenze verzichtet wurde, da dies nicht das Ziel dieser Untersuchungen ist und damit die Einflüsse der Strukturen nicht mehr zweifelsfrei zugeordnet werden könnten.

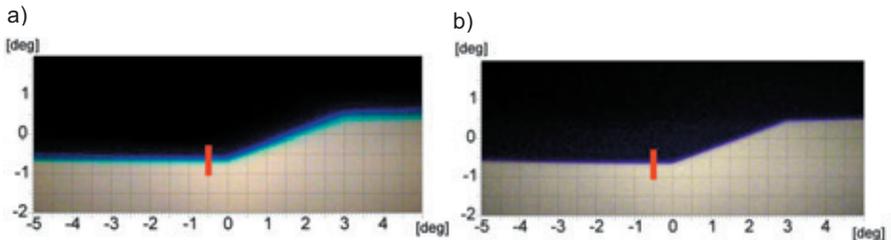


Abbildung 2: Ausschnitt aus der Lichtstärkeverteilung des Ablendlichts um den Punkt HV0 der Farbsimulationen des Projektionsmoduls mit einer refraktiven Linse (a) und einer Hybridlinse (b) nach [4]

In Abbildung 3 sind die Schnitte durch die Lichtstärkeverteilungen bei $x=-0,5^\circ$ dargestellt, die die bereits erwähnten Verbesserungen unterstreichen. Diese Ergebnisse werden unter

idealen Randbedingungen erzielt und sind damit die obere Grenze bzgl. der Analyse der erwarteten Abweichungen der Strukturprofile, die eng mit den Fertigungsmethoden verknüpft sind.

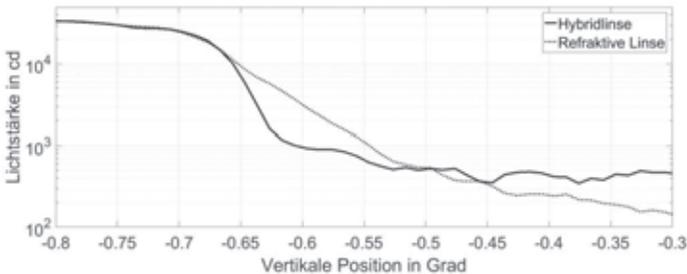


Abbildung 3: Schnitt durch die Hell-Dunkel-Grenze bei $x = -0,5^\circ$ der simulierten Lichtstärkeverteilungen nach [4]

Die Fertigung des Höhenprofils einer diffraktiven Linse erfolgt idealerweise mittels lithographischem Verfahren, da eine maximale Profilhöhe von $\sim 1 \mu\text{m}$ und eine minimale Periode von $\sim 15 \mu\text{m}$ benötigt werden. Während dies nahezu ideal gefertigt werden kann, ist im automatisierten Umfeld die spanende Herstellung mittels Drehmeißeln oder Fräser üblich. Somit ist die Genauigkeit, mit der Strukturen gefertigt werden können, direkt abhängig von dem Radius der Spitze des Werkzeugs.

Je kleiner der Radius, desto feinere Strukturen können eingebracht werden, desto länger dauert jedoch auch die Bearbeitung und desto häufiger muss das Werkzeug gewechselt werden, womit dies ein Optimierungsproblem ist.

Die Untersuchung wird daher in drei Abschnitte unterteilt. Zunächst wird der Einfluss der Beugungseffizienz betrachtet, indem Stufenprofile anstatt von idealen Profilen genutzt werden. Dadurch ergibt sich eine Variation der Effizienzen für die einzelnen Wellenlängen. Darauf aufbauend kann in Kombination mit dem Krümmungsradius des Werkzeugs die Periode bestimmt werden, die noch präzise genug gefertigt werden kann. Bis zu dieser Grenzperiode nimmt die Periodenlänge wurzelförmig zum Rand hin ab und bildet somit eine asphärische diffraktive Linse. Ab dieser Grenzperiode wird die Periodenlänge periodisch fortgesetzt, sodass für diese Randbereiche aus einer Asphäre eine sphärische Linsenfunktion wird. Daraus lässt sich der benötigte Werkzeugradius ableiten, um die Strukturen präzise genug zu fertigen.

Zunächst wird untersucht, inwieweit aktuelle Toleranzen bei der Positionierung der Elemente von $\sim 0,1 \text{ mm}$ ausreichen, da zunächst die refraktive Kavität gefertigt und anschließend die diffraktive Struktur in die Kavität eingebracht wird. Die Nullpunkte für beide Fertigungsschritte weichen maximal um diesen Wert ab. Die Ergebnisse der Simulationen aus Abbildung 4 zeigen, dass der Einfluss der Kavitätenpositionierung im Rahmen aktueller Toleranzen keinen nennenswerten Einfluss auf die Lichtverteilungen hat.

Um Abweichungen von dem gefertigten zum idealen Höhenprofil abzuschätzen, werden gestufte anstatt idealer Höhenprofile simuliert. Somit werden unterschiedliche Beugungseffizienzverteilungen untersucht, wobei die maximale Beugungseffizienz mit sinkender Stufenanzahl ebenfalls sinkt. Die Ergebnisse aus Abbildung 5 zeigen, dass sich dies deutlich auf die Qualität der Hell-Dunkel-Grenze auswirkt. Sowohl für die 2- als auch die 4-

stufigen Linse sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Bereichen deutlich niedriger, da die Werte zunächst unter denen der idealeren Linse und anschließend darüber liegen. Erst ab einer Stufenanzahl von $N = 8$ liegen die Kurven übereinander, wobei die maximale Beugungseffizienz jeweils über 80% liegt.

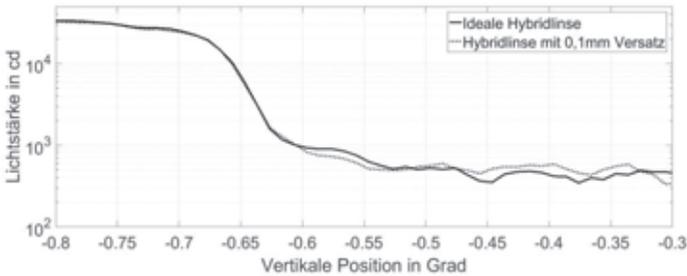


Abbildung 4: Lichtstärkeverlauf an der Hell-Dunkel-Grenze bei $x = -0,5^\circ$ für eine ideale Hybridlinse und eine Hybridlinse, deren beiden Linsenstrukturen um 0,1mm zueinander versetzt sind

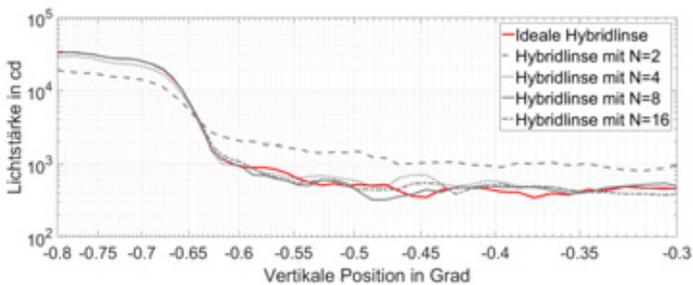


Abbildung 5: Gradienten der Lichtstärkewerten der Hell-Dunkel-Grenze bei $x = -0,5^\circ$ für unterschiedliche, gestufte Höhenprofile mit N Stufen

Dieser Wert bildet somit die Grundlage für die Abschätzung, welche Werkzeuggradient zur spanenden Fertigung mindestens benötigt werden. Denn im besten Fall kann das Höhenprofil durch den Meißel ohne Stufen gefertigt werden. In diesem Fall sind lediglich die Abweichungen durch die abgerundete Werkzeugspitze zu berücksichtigen, die an der senkrechten Flanke zu einer Verrundung führt. Deren Einfluss wird abgeschätzt, indem deren prozentualer Anteil auf die Periodenbreite als Verlustanteil gewertet wird. Die minimalen Verluste sind daher unter 20%, solange das Verhältnis von Werkzeuggradient zu Periodenbreite $< 0,2$ beträgt. Bis dieser Wert erreicht ist, wird die Linse asphärisch gefertigt, d.h. dass die Periodenbreiten zum Rand hin sinken. Sobald die genannte Randbedingung verletzt werden würde, wird die Breite periodisch fortgesetzt, was eine sphärische Linse in diesem Bereich ergibt.

Der Übergang von asphärischer zu sphärischer Linse zeigt gemäß Abbildung 6 teils erhebliche Unterschiede. Die Lichtstärkeverteilungen ergeben zum einen deutliche Abweichungen für große Werkzeuggradienten, da deren Lichtstärkeverläufe deutlich unterschiedlich zu dem der idealen Hybridlinse verlaufen. Erst ab einem Radius von $2,5\mu\text{m}$ liegen die Werte nahe an denen der idealen Hybridlinse.

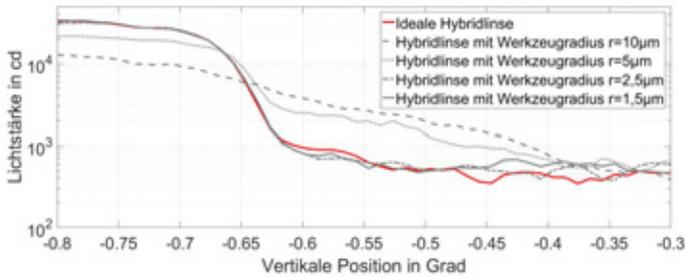


Abbildung 6: Gradienten der Lichtstärkeverteilung der Hell-Dunkel-Grenze bei $x=-0,5^\circ$ für unterschiedliche Linse, die ab der i -ten Periode eine sphärische Linse bilden, während die niedrigeren Perioden eine asphärische Linse beschreiben

Somit ergeben die Untersuchungen, dass zur Herstellung einer Hybridlinse ein Werkzeugradius von $r \leq 2,5\mu\text{m}$ benötigt wird und dass die aktuellen Positionierungsgenauigkeiten der Werkzeugeinsätze ausreichen.

3 Hocheffiziente Lichtformung mittels Gitterzellenarrays

Neben der Steigerung der Abbildungsqualität kann mittels diffraktiver Optiken auch die Effizienz von Scheinwerfersystemen gesteigert werden. Um dies abzuschätzen, wird ein Gitterzellenarray ausgelegt, das eine vereinfachte Abblendlichtverteilung erzeugt. Anschließend wird dieses unter idealen Annahmen simuliert, wobei planparalleler Lichteinfall der wichtigste Parameter ist.

Dabei wird das Gitterzellenarray homogen beleuchtet und nur der Lichtstrom betrachtet, der auf das Element trifft. Die Beleuchtung erfolgt ideal, indem die Strahlen senkrecht auf die Elementebene, parallel zur optischen Achse auftreffen. In Kombination mit einer idealisierten Gittergeometrie sowie einer vereinfachten Lichtverteilung (ohne Schwerpunkt) wird damit untersucht, welche Effizienzen maximal möglich sind. Dieser Aufbau entspricht damit zwar nicht den typischen Scheinwerfersystemen, ergibt jedoch eine Abschätzung der oberen Grenze hinsichtlich der Frage, welche Effizienzen unter idealen Bedingungen maximal möglich wären.

Die Zuweisung der einzelnen Pixel zu denen der gewünschten Lichtverteilung erfolgt zeilenweise beginnend bei der obersten Zeile, die die Hell-Dunkel-Grenze formt. Die dadurch erzeugte Abbildung wird über eine refraktive Linse abgebildet.

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse dargestellt. Das Ziel der Auslegung ist ein scharfe, farbsaumreduzierte Hell-Dunkel-Grenze sowie eine homogene Ausleuchtung inkl. der gekrümmten Form der unteren Hell-Dunkel-Grenze. Anhand der Grafiken wird ersichtlich, dass das chromatische Verhalten an der oberen Hell-Dunkel-Grenze den Anforderungen entspricht, was jedoch auf Kosten der unteren Hell-Dunkel-Grenze erfolgt. Darüber hinaus zeigt sich, dass die höheren Beugungsordnungen einen nennenswerten Einfluss auf die Verteilung haben (Streulicht im betrachteten Bereich). Somit zeigen sich bereits erste Aspekte, die bei einer zukünftigen Auslegung zwingend berücksichtigt und optimiert werden sollten.

Für die Formung ist die Effizienz der erste, primäre Aspekt. Diese liegt für die Grenzfläche des Gitterzellenarrays bei $\sim 98\%$, wobei dies bzgl. der maximal möglichen Werte erreicht

wird. Unter Berücksichtigung der Fresnelreflexion und der Absorption ergeben sich für das gesamte System bestehend aus dem Bauteil Gitterzellenarray und der refraktiven Linse eine Gesamteffizienz bezogen auf den Lichtstrom vor dem Gitterzellenarray und dem Lichtstrom innerhalb der Ziellichtverteilung von ~81%.

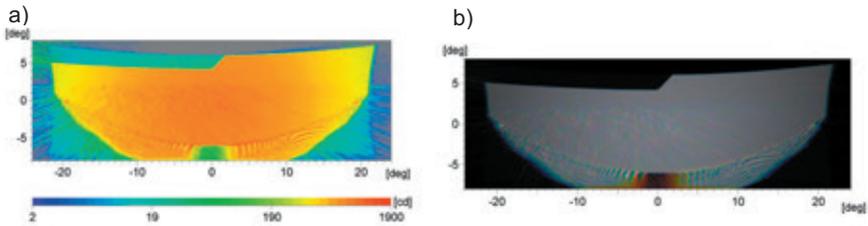


Abbildung 7: Darstellung der Simulationsergebnisse des Aufbaus einer vereinfachten Abblendlichtverteilung unter idealen Bedingungen und ohne Grenflächeneffekte an den Rändern einzelner Gitterzellenarrays in Falschfarbendarstellung (a) und in Farbdarstellung (b)

Dies beschreibt somit den Grenzwert, der unter idealen Bedingungen (idealen Ausleuchtung des Gitterzellenarrays sowie planparallele ebene Welle) erreichbar ist. Im Gegensatz zu der Nutzung einer Blende zeigen sich somit deutliche Vorteile, wobei die Auslegungsalgorithmen optimiert werden müssen, um die Streulichtanteile in Form höherer Beugungsordnungen und das Verhalten an der unteren Hell-Dunkel-Grenze zu bereinigen.

Literaturverzeichnis

- [1] T. Luce, E. Schalle und N. Ziegler, „The Advent of Polymer Projector Headlamp Lenses,“ *International Symposium of Automotive Lighting*, 2009.
- [2] J. Queisser, M. Geprägs, R. Bluhm und G. Ickes, „Trends bei Automobil-Scheinwerfern - Herausforderungen und Chancen für Thermoplaste,“ *Kunststoffe*, Bd. 92, Nr. 3, 2002.
- [3] H.-W. Hoffmeister, R. Wittmer, W.-C. Hahmann, M. Wagner, K. Dilger, B. Heitkamp, A. Hoch und M. Drab, „Innovative Herstellung mikrooptischer Baugruppen - Neuartige Ansätze zur Fertigung von Mikrooptiken in kleinen und mittleren Losgrößen,“ *Werkstattstechnik*, Nr. 101, 2011.
- [4] M. Schöne, O. Sandfuchs und C. Neumann, „Diffractive Optics in Automotive Headlamps – New Design Concepts Including a Special Simulation Process,“ in *DGaO - 117. Jahrestagung*, Hannover, 2016.

Flache Transmissionsoptiken für die LED-Lichttechnik

*Mike Bülters, Tobias Kraus, Dominic Nußbaum, Christoph Stöver, Volkmar Boerner
temicon GmbH, Konrad-Adenauer-Allee 11, 44263 Dortmund*

Problemstellung

Der Umstieg auf LED-Lichtquellen bringt neue Anforderungen an das Leuchtendesign mit sich. Klassische Konzepte mit reflektierenden Optiken lassen sich aufgrund der Abstrahlgeometrien nicht auf LED-Quellen übertragen. Transmissionsoptiken sollen ansprechend aussehen, eine hohe Lichteffizienz haben, leicht und materialsparend sein.

Ziel

Um den Einsatz von LED-Lichtquellen in Flächenleuchten und Linearleuchten zu ermöglichen, werden Transmissionsoptiken entwickelt, mit denen gezielt die Lichtverteilung optimiert werden kann. Als Licht steuernde Elemente werden Mikrostrukturen eingesetzt, die als Folien- oder Plattenmaterial zur Verfügung gestellt werden. Als Produktionsprozesse werden kontinuierliche walzenbasierte Verfahren eingesetzt, die möglichst nahtlos geprägte optische Oberflächen hervorbringen. Damit sind diese Transmissionsoptiken als Produkt sowohl material- und damit ressourcensparend als auch kosteneffizient herstellbar.

Beschreibung der Innovation

Die Innovation besteht in der Miniaturisierung optisch aktiver Strukturelemente, die mit lithographischen Verfahren hergestellt werden. Anders als in der Halbleiterindustrie, in der solche Verfahren sonst eingesetzt werden, werden hier die Strukturen jedoch großflächig nahtlos erzeugt.

Es werden unterschiedliche Verfahrensvarianten genutzt, um lichtlenkende Strukturen zu erzeugen. Durch den Einsatz spezieller UV-Masken-Belichtungstechniken und mit Hilfe interferenzlithographischer Verfahren können gezielt Licht lenkende Oberflächen hergestellt werden.

Realisierungsgrad

Durch die Kombination interferenzlithographischer Belichtungen und nachfolgendem Electroforming sind bereits Prägewalzen als Prototyp mit einer Breite von 200mm hergestellt worden. Diese wurden mit einem UV-Rolle-zu-Rolle-Verfahren in Endlosfolie geprägt. Diese Technik kann perspektivisch verwendet werden, um Linearleuchten und Flächenleuchten mit Licht lenkenden Strukturen auszustatten, die auf eine Ziel-Leuchtdichtevertelung optimiert ist.

Mit UV-lithographischen Techniken sind Strukturen realisiert worden, mit denen Leuchten auf der Basis von Lichtleiterplatten realisiert werden können. Bei diesen transparenten Lichtleiterplatten kann ebenfalls die Abstrahlcharakteristik angepasst und optimiert werden.

Flat transmission optics for LED lighting

*Mike Bülters, Tobias Kraus, Dominic Nußbaum, Christoph Stöver, Volkmar Boerner
temicon GmbH, Konrad-Adenauer-Allee 11, 44263 Dortmund*

Summary

The use of LED light sources in lighting applications is growing extremely fast. New concepts for the optical system are required in order to address specific challenges related to the use of LEDs. Micro structured optical components enable solutions to efficiently use LED light in luminaires, offering more freedom in design, saving material, weight and energy. There are challenges related to the use of micro structured components with respect to optical simulation, creation of the original microstructures on sufficiently large areas and in a cost-effective production process. We address these challenges in our current research.

Objectives

To use LED light sources in panel and linear lights, transmission optics with specific beam light distribution are developed. The micro structured texture on sheet or plate surface refracted the light in a controlled mode. A continuous embossing roll process produce a seamless optical surfaces on almost every surfaces as foils or plates. Such transmission optics saving material, time and energy and are cost-effective manufactured.

A new tailored system design achieves more innovations, such as a combination of multi functions in an ultra-flat one-sheet optics. Particularly, light guiding optics are very attractive to LED light processing.

Description of innovation

The miniaturized active optical elements, which are manufactured via lithographical methods yield to an innovative performance. The manufacturing technology is comparable to the semiconductor process technology. However, we offer seamless large-area micro structuring.

Light deflection structures can be mold in different technologies. By using special UV mask lithography techniques and using interference lithography light deflection surfaces can be produced selectively.

Implementation

Due to combining lithographical techniques and subsequent electroforming, a prototype embossing roll with a width of 200mm are demonstrated. With this tool the microstructure is replicated to an endless foil due to UV curing roll-to-roll process.

Perspectival, this technology can be used to equip panel and linear lamps with light-deflection structures, which is optimized to a tailored light distribution.

Light guiding plates with a micro structured surface have been realized using UV lithography. This allover transparent light guide plates can also be adjusted and optimized the surface emission.

Flat transmission optics for LED lighting

*Mike Bülters, Tobias Kraus, Dominic Nußbaum, Christoph Stöver, Volkmar Boerner
temicon GmbH, Konrad-Adenauer-Allee 11, 44263 Dortmund*

Summary

The use of LED light sources in lighting applications is growing extremely fast. New concepts for the optical system are required in order to address specific challenges related to the use of LEDs. Micro structured optical components enable solutions to efficiently use LED light in luminaires, offering more freedom in design, saving material, weight and energy. There are challenges related to the use of micro structured components with respect to optical simulation, creation of the original microstructures on sufficiently large areas and in a cost-effective production process. We address these challenges in our current research.

1 Trends and requirements in LED lighting

The future of lighting technology is the LED. The fast development of high-power white LEDs with very long lifetime and high efficiency, established the LED in almost all areas of illumination. The wide scope of possibilities for electronic control of e.g. intensity, color, temperature and adaptive lighting scenario can be used for intelligent automation. Therefore, LEDs have many benefits over the conventional light sources.

However, luminaire design has to consider the LED's properties as a light source: single LEDs are very small and very bright. To achieve sufficient brightness of the luminaire, a plurality of individual LED chips or large-scale multi-die-chips have to be used, resulting in a high etendue. Thus, the required optics for achieving a good luminaire performance with respect to light output is large, heavy, complex and expensive. The luminaires need a homogenous appearance of the radiating surface – viewed from certain perspectives – and a homogenous illumination in brightness and colour. The LED light sources provide opportunity for the design of the illumination and the luminaire itself. In most cases for the mass market, lamp components have to be simple and robust, with a long lifetime and with high demands in terms of aesthetics and functionality.

Professional lighting is specifically designed to cater for the visual tasks performed at the workplace, to guarantee visual performance and visual comfort. The more difficult the visual task is, the higher the illuminance needs to be: at least 500 lux is required for compliance with DIN EN 12464-1.[1],[2] Illuminance upon installation needs to be increased by the relevant maintenance factor, in order to account for a decrease resulting from ageing and soiling. Office lighting is based on three concepts: room-related lighting creates uniform visual conditions throughout the room, and thus caters flexibly to requirements even if task areas are rearranged. Task area lighting is recommended where a room contains several task areas used to address different visual tasks, and thus it requires different levels of lighting. Work surface lighting provides a level of lighting, which is tailored to visual tasks or individual requirements on office work surfaces.

Therefore, there are different light distribution curves of interest, such as batwing, with symmetric or asymmetric distribution, down lighters, or wall washers, all of which de-

glaring properties. There is a need for retrofitting the established lamp framework, which is upgraded with LEDs, resulting in a similar or better optical performance.

A new tailored system design achieves more innovations, such as a combination of multi functions in an ultra-flat one-sheet optics. Particularly, light guiding optics are very attractive to LED light processing.

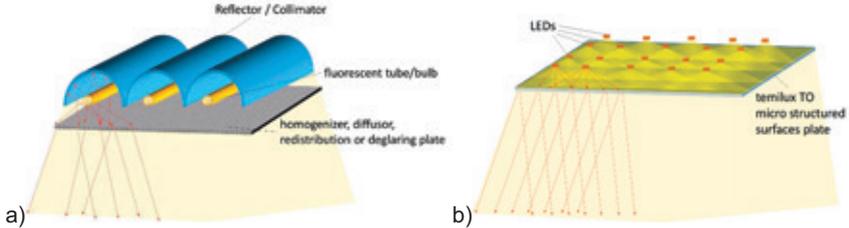


Fig. 1: Sketches of ceiling luminaires with a) conventional light sources with large and complex optical collimation. b) LED solution consisting of a simple light collimation with a single micro structured plate.

2 Benefits of using micro structured surfaces

Considering the requirements set by the LED light source arrangements and the target output performance, including aesthetical aspects of luminaire design, the task to be fulfilled by the optical system is quite complex. Very divergent light coming from an array of spot light sources needs to be converted into a homogeneous light output with defined light output distribution.

The use of micro structured surfaces leads to a miniaturization of the optical system. Complexity can be hidden in micro structured surfaces with a homogeneous appearance. Microstructures lead to a reduction of used materials, and thus have an economical, as well as an ecological impact. Luminaire design can be thinner and aesthetically attractive.

However, there are also challenges to be overcome, which will be addressed in the next sections, such as: the integration of microstructures in the design of complex optical systems like luminaires, the origination of micro structures on sufficiently large areas and a cost-effective production process.

3 Simulation of micro structures in optical systems

The integration of microstructures in complex optical systems comes along with the **challenge of different scales**: classical macroscopic light shaping objects such as parabolic reflectors, lens systems or TIR-assemblies, are generally simulated by ray-tracing. With decreasing size of optical components, down to microscopic structures, wave optical effects like diffraction have to be taken into account, whereas classical refraction loses validity.

Generally, with decreasing structure features, the quasi-continuous diffraction spectrum, which can be identified with classical refraction, is converging more and more into a distinct separation of angles, which is described purely by diffraction. One of the structure types under investigation are engineered surface diffusers, such as the temicon L80-diffuser, which shows feature sizes from approx. $1\mu\text{m}$ to $100\mu\text{m}$. Wave optics plays an im-

portant role in the simulation, but a purely wave optical treatment with RCWA [3] or FDTD [4] of a luminaire cannot be performed with reasonable effort. Simulation of a 600mm x 600mm x 15mm light shaping panel discretized into 175nm cubes ($\frac{1}{2}\lambda_{\min}$), with every voxel described by only one 32bit number, would require about 1.3e9Gb of memory, see Fig. 2 a).

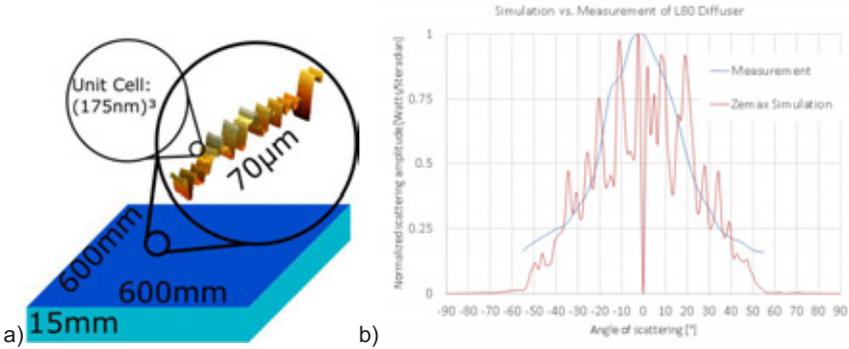


Fig. 2: Sketch a) shows the problem of the different length scales on a full-scale luminaire with a micro-structured surface. Graph b) shows a comparison between the measured and the ray traced scattering behavior.

A typical way to overcome this issue is to measure the scatter-function in time consuming and error prone setups. However, this cannot be used in the theoretical design phase of the diffuser surface. Therefore, one needs to simulate microscopic diffusers in a more sophisticated manner in order to give predictions about the scattering distribution. One approach is a **fully coupled ray tracing (FCRT) combined with scalar-diffraction-theory (SDT)**:

Due to the characteristic length scales of the L80-diffuser produced by temicon [5], both physical regimes will influence the diffusive pattern. The presented results are in an ongoing process and aim to combine those regimes on a simulation basis. Having this in mind, we first converted the AFM-measured surface topography to a 3-dimensional mesh, which was subsequently loaded into Zemax Optical Studio [6]. In Fig. 2 b) the FWHM can be estimated to be approx. 40° (see red curve). This is generally in accordance to the measurement, which was done with a red HeNe laser and the same temicon L80-diffuser (blue curve). Nevertheless, the simulated diffusive pattern looks peaky and non-smooth, which is in strong contradiction to the measurement. The surface is assembled out of five $70\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ AFM measurements, which were aligned mirrored on both axis, thus forming a sheet of symmetrical elements of $700\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$. Not even this large simulated surface showed significant improvement of the spikiness in contrast to a smaller sample formed by one single AFM measurement.

By using the SDT, one can achieve pretty similar results, showing a peaky and non-smooth behaviour, but also being more or less consistent to the half width of the diffusive pattern. One clue that was found, but is still under investigation, is that the SDT in combination with the FCRT approach might smoothen out those sharp dips and valleys by filling up those angles with wave optical diffraction effects.

Once this computational basis is working, one can finally simulate the hemispherical diffusive pattern for arbitrary incidence angles, being equivalent to the well-known and generally used Bidirectional Scattering Distribution Function (BSDF) purely from topographical AFM-Measurements. An even bigger advantage arises from the feasibility of describing more complicated diffractive patterns with this approach, such as the batwing or asymmetric patterns. This effective, yet accurate description of a microscopic scattering surface can finally be used in large-scale simulations of luminaires or lighting applications. From this coupled simulation idea, one could also deduce specific analytical formulas, which could for instance be used in ZOS or similar tools to describe the diffusive behavior accurately for arbitrary angles of incidence.

4 Mastering methods for optical microstructures

A cost-effective method for producing optical elements (such as refractors) follows the process below: creation of a production tool (mostly metal) with a desired surface topography via suitable processing methods and replication of the structures in the production tool into or onto the desired material (e.g. nanoimprints on PET foil).

To create the desired structures within sizes of microns, we use lithographic methods such as laser interference lithography [7] or UV-mask-lithography. Those lithographic methods have their origin in the semiconductor industry (e.g. transistors, diodes, etc.), where they are normally used to create masking layers for subsequent processes such as wet or dry chemical etching or application of dopant materials. Specific chemicals (called photoresists) that react with UV light are used to transfer images onto substrates with feature sizes from $\leq 0.5\mu\text{m}$ up to several $100\mu\text{m}$. This image transition can be performed in both a positive (mask and transferred image match) and a negative way (transferred image is in negative tone to mask) (see Fig 3).

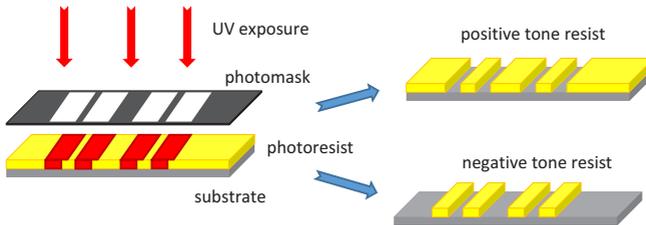


Fig. 3: Basic process of photolithography. The type of photoresist determines whether exposed areas are preserved or eliminated.

Due to the possibility to create 3-dimensional structures, lithography was also used in recent decades in biomedical engineering to produce microfluidic components (e.g. quick blood samples test, etc.). Besides fluidic structures, structures with optical features (such as diffractive or refractive properties) can be fabricated as well.

The overall design of an imaging mask and thus the arrangement of structures on the substrate are almost limitless. Both periodic or stochastic arrangements as well as defined motifs are possible. Depending on process parameters used in the lithographic process, different shapes of structures with high aspect ratios (ratio of height to width of the structure) up to 5:1 are possible as well (such as structures with nearly perpendicular sidewalls,

slanted sidewalls or spherical surfaces), for example gapless microlens arrays via reflow lithography (see Fig. 4). Standard techniques (e.g. spin coating, dry film resist application) allow homogeneous film thicknesses and thus a high optical surface quality.

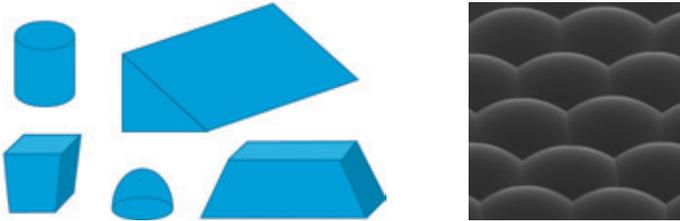


Fig. 4: Feasible structural shapes (left) and SEM image of a gapless micro-lens array (right)

5 Efficient production processes

In order to transfer the above-discussed benefits of micro structured surfaces into innovative new products, an efficient production process is needed. This process has to provide the market with high quality micro structured foils and components, and low production costs. In the same time, the freedom of product designers and engineers, as well as new technical demands on functional surface sizes, have to be taken into account.

The standard technique for industrial production of free form polymer components is injection molding, which is deployed successfully for nano- and microstructure replication at temicon.[8] For larger and plane areas of rigid panels, the roll-to-plate technology is used effectively.[9] In the field of film production, the roll-to-roll production process is nowadays the state of the art, and already led to low production cost and high quality film products. This process was applied to the mass replication of micro structured films by mounting the structure mold onto the embossing roller. Film producers achieve very good replication quality by using this technology for years.[10],[11]

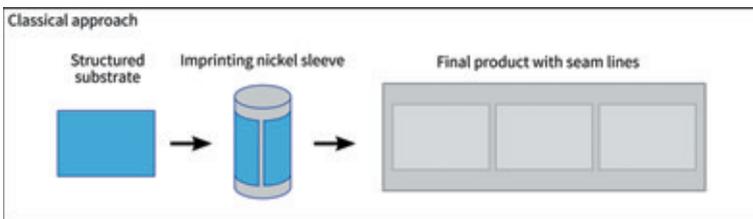


Fig. 5: The classical approach of microstructure replication via Roll to Roll. The welding joint interrupts the functional surface and is replicated into the final product.

One main limitation of the functional surface area remains due to the seam line of the imprinting sleeve, as shown in Fig. 5. Recent research work has been done at temicon to minimize this welding seam or to even avoid it completely. We are working on seamless mastering on cylinders and first results for laser interference lithography have shown the great potential of this technology.[12]

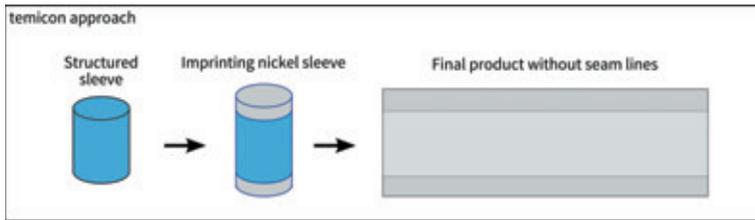


Fig. 6: The new temicon approach of seamless mastering allows a continuous structuring of films and panels without any seamlines.

As indicated in Fig. 6, seamless films become available, pushing the production efficiency and offering a new level of freedom to designers and engineers.

This work was supported by the German Federal Ministry of Education and Research, funding No.: 02P14K510 and 01QE1540A.

References

- [1] DIN EN 12464-1 Beleuchtung von Arbeitsstätten Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen; Beuth Verlag GmbH; 2003
- [2] ZVEI-Leitfaden zur DIN EN 12464-1, Beleuchtung von Arbeitsstätten Teil 2, ZVEI, Frankfurt; 2005
- [3] V. Liu and Shanhui Fan: S4 : A free electromagnetic solver for layered periodic structures, Computer Physics Communications, 2012, 183, pp 2233-2244
- [4] P. Klapetek et al: Rough surface scattering simulations using graphics cards, Applied Surface Science, 2010, 256, pp 5640-5643
- [5] V. Boerner et al: Microstructured light management films for information displays generated by holography, SID Symposium Digest of Technical Papers, 2002, 33, pp 826-829
- [6] <http://www.zemax.com/>
- [7] J. Mick, A. Gombert, B. Bläsi, C. Müller: „Maskless Origination of Microstructures with Optical Functions on Large Areas“, Proc. SPIE, Vol. 5751 (2005), pp 1003-1014
- [8] O. Humbach, M. Rawert, T. Ruhl, W. Schipper, J. Mick, V. Boerner: Industrial Replication of Micro and Nanostructured Polymer Films and Components; Proceedings, Polymer Replication on Nanoscale 2016 Conference, Windisch, Switzerland, May 19-20, 2016
- [9] W. Shipper: Functionalization of flexible and rigid materials. New developments for industrial applications; Proceedings, The Holography Conference, Istanbul, December 3-5, 2014
- [10] S. J. Abbott, P. H. Gaskell: Mass production of bio-inspired structured surfaces; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, October 1, 2007 vol. 221 no. 10, pp 1181-1191
- [11] W. Schipper: Roll-2-Roll – Nano – Imprint – Lithography (NIL) – Journey to seamless, large format functional film; Proceedings, The Holography Conference, Shanghai, December 2-4, 2015
- [12] J. Mick, V. Boerner, C. Stöver: Fabricating seamless nanostructured sleeves; SPIE Newsroom, 2015; 10.1117/2.1201510.006101

An improved analytical technique for determining bending deformations in prismatic optical films

B. García-Fernández¹, A. Alvarez Fernández-Balbuena^{1,2}, D. Vazquez¹ / 1 Department of Optics. Faculty of Optics and Optometry, Universidad Complutense Madrid, Spain. 2 Department of Forest and Environmental Engineering and Management, School of Forestry Engineering, Polytechnic University of Madrid, Spain.

Abstract

Cylindrical hollow Prismatic Light Guides (CPLG) offers an optimal technical alternative as light transport tool because they can transfer natural and artificial light through the buildings interiors efficiently. Prismatic sheets must be bent to fit the shape of the inner surfaces, so changes induced by curving the prismatic film give rise to deformation shifts. A new experimental characterization method is provided in order to obtain a detailed analysis of the rate of angular deformation of the prismatic structure due to changes in the geometry of for bending the film. The relation between curvature and lighting efficiency of prismatic sheets is shown. Results demonstrate good agreement between prism deformations and light flux propagation rate obtained by experimental measurements depending on the curvature.

An improved analytical technique for determining bending deformations in prismatic optical films

B. García-Fernández¹, A. Alvarez Fernández-Balbuena^{1,2}, D. Vazquez¹ / 1 Department of Optics. Faculty of Optics and Optometry, Universidad Complutense Madrid, Spain. 2 Department of Forest and Environmental Engineering and Management, School of Forestry Engineering, Polytechnic University of Madrid, Spain.

Summary

Cylindrical hollow Prismatic Light Guides (CPLG) offers an optimal technical alternative as light transport tool because they can transfer natural and artificial light through the buildings interiors efficiently. Prismatic sheets must be bent to fit the shape of the inner surfaces, so changes induced by curving the prismatic film give rise to deformation shifts. A new experimental characterization method is provided in order to obtain a detailed analysis of the rate of angular deformation of the prismatic structure due to changes in the geometry of for bending the film. The relation between curvature and lighting efficiency of prismatic sheets is shown. Results demonstrate good agreement between prism deformations and light flux propagation rate obtained by experimental measurements depending on the curvature.

1 Introduction

The CPLG is an optically ideal device from the point of view of the propagation of light [1]. Prismatic films are composed of microprismatic structures whose width is of the order of several hundred micrometers and are usually made of acrylic resin materials or clear grade optic polycarbonate. Considerations related to light losses of prism film are very important from the point of view of long distance transmission of light. Although such light guides can be fairly efficient, losses in prism light guides are influenced by several parameters as material absorptance, scattering and optical imperfections [2-5]. Polycarbonates are thermoplastic polymers that have a linear stress strain behavior at low values of pressure, described by Hook's Laws and mechanical response sensitive to strain rates, especially high strain rate [6]. Thus, it is important to consider mechanical deformations on the prismatic surfaces due to the induced bending in the prismatic film needed to conform CPLGs. Analysis of the light transmittance and mechanical characteristics of prismatic flexible films are key to design and performance of curved hollow light guides. The most common method for measuring the stress in a microstructure is based on the substrate bending principle. Furthermore, more sophisticated stress measurement systems are available based upon analytical tools as correlation criteria [7]. In this paper, it is provided a characterization method based on an experimental recognition procedure algorithm developed in order to measure the deformation rate by image processing techniques in the surface geometry of the prisms structure of a prismatic film sheet for different curvatures. After that, experimental procedures have been carried out to quantify luminous flux losses due to mechanical deformations [8].

2 Characterization method, changes in curvature

The prism angle deformation range of a prismatic structure with diameter changes by considering different stages of prismatic film profile to predict the reproducibility in the output flux and then optimize the design. For this purpose, computer analysis such as changes in prism angle related to plane shape were carried out in different prismatic film curvatures k of radius R ($k=1/R$) from plane to 66.67 m^{-1} .

A transverse section of prismatic film was covered by evaporating magnesium oxide onto the surface in order to improve the image contrast, a microscope's image of prismatic film is shown in figure 1. The prism has a base of $356 \text{ }\mu\text{m}$ wide and its peak height is $178 \text{ }\mu\text{m}$.

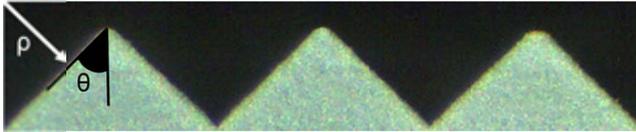


Fig. 1. Image of a cross-section of the prism film cut with 35 mm of diameter used to analyze the contour ($100 \times$).

The image is acquired with a Motic SMZ-143 equipped with a digital camera (Moticam 2000) and using morphological operations, measurement of the inclination angle of the profile are achieved.

First, a threshold is determined from the grey-level histogram is applied to the input image in order to make it binary. Later the profile edge is obtained using Canny operator [9], this operator is an optimal edge objects and hard edges. Later, we used the Hough Transform (HT) [10] to detect the parameters that control the accuracy of the right angle at the vertex of the prism. The HT uses the parametric representation of a straight line $y = mx + b$ where m is the slope or gradient of the line, b is the y -intercept of the line, the point where the graph of the line crosses the y -axis, and x is the independent variable of the function $y = f(x)$. HT uses the polar representation $\rho = x \cos(\theta) + y \sin(\theta)$ to indicate the perpendicular distance from the origin, to the line and θ the angle in which it is shown the sum of intensities in the image peaks. The resolution of the HT digitization process determines the gradient estimation of the curve. Rhoresolution build the accumulation matrix with jump between two consecutive pixels, its value was set on set to 0.4 . Thetaresolution represents the spacing of the Hough transform bins along the θ axis, it was set to 0.05 . Each HT matrix element has a value which are positioned on the line with parameters (ρ, θ) .

Peaks obtained of θ values represent the overriding angle, and shows global changes as the relationship between analyzed curvatures and the Hough peak obtained (fig. 2 (a)). The highest peak becomes quite stable from plane to 20 m^{-1} . There is an increase of 2.5° (from 89.5° to 92°) in the curvature interval from 20.00 to 57.14 m^{-1} . A stabilization in 92° is obtained in the last period (from 57.14 to 66.66), in this period although the increasing of points that belong to different angles in the contour, Hough peak remains stable. The pressure applied to the prismatic geometry at curvatures higher than 20 m^{-1} could increase the deformation in the prism geometry causing the gradient change. The analysis of the mean value of the peaks in the Hough matrix represented as the angular deviation rate is illustrated in figure 2 (b).

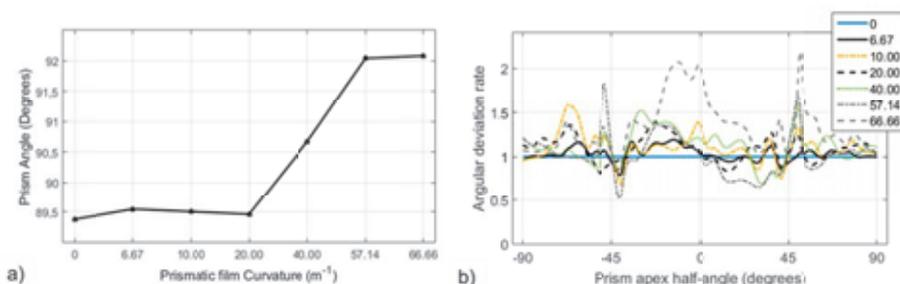


Figure 2. Angle θ obtained by HT related with CPLG curvature. The graph legend shows curvatures evaluated in m^{-1} . Global changes in prismatic angle related with Hough peaks are shown in (a) and local changes in prism half-angle in (b).

In this figure, a detailed analysis of the prismatic apex angle is presented, which shows local changes in prism apex half-angles of several curvatures with regard to the plane prismatic film. Prism angle is obtained by the sum of the corresponding positive and negative slope θ of the measure. The bigger angular distance rate around the main half-angles, -45° and 45° , is detected for higher values of curvature $20\ m^{-1}$ due to the contour deformation. There is an increase number of points that belong to different angles in the edge due to the changes in film curvature. Internal stresses of the material produces asymmetric changes in slope. Although the increasing of points belong to different angles in the contour, Hough peak remains stable nearly to the right angle conformed by the plane contour.

3 Light transmittance analysis

In this section we report light losses of CPLG measured experimentally to check curvature influence in transmittance. Light losses of prismatic film used in CPLG, with a range of curvatures from plane to $57.14\ m^{-1}$ were experimentally measured using physical prototypes on a real size scale to investigate the influence of curvature of prismatic film in flux transmittance.

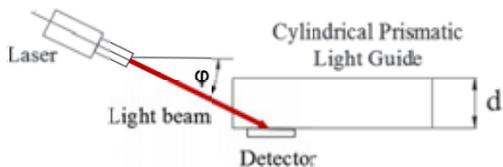
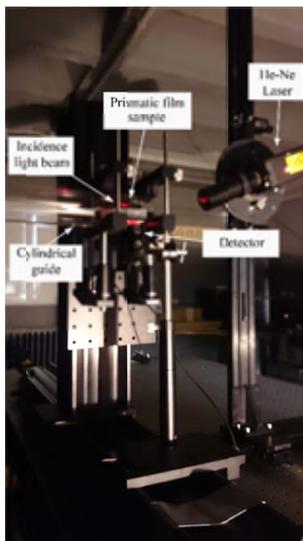


Figure 3. Experimental setup for the transmittance measurements to the left (lateral view) and experimental assembly scheme to the right.

Light supplied by the He-Ne laser (JDS Uniphase 1508 Helium Neon Gas Laser) is injected into the plane surface of the prismatic film for incidence angles φ over the range from 15° to 45° (5° step size) large enough to evaluate acceptance angle influence ($\sim 30^\circ$) in transmittance measurements (Fig.5). Light escaped is recorded by a Photometer (Gamma Scientific's flexOptometer) with a Si-based detector placed together with the prismatic surface. Lost flux is considered as light that scapes through the film because not suffer total internal reflexion. The fraction of the total flux loss induced by curvature of each CPLG as a function of the angle of incidence is shown in figure 4. The light flux lost rate ϕ_k was estimated by dividing the transmission measurements through the film obtained for each particular curvature of CPLG ϕ_{ki} by the transmission obtained with the corresponding incident flux ϕ_t ($\phi_k = \phi_{ki} / \phi_t$).

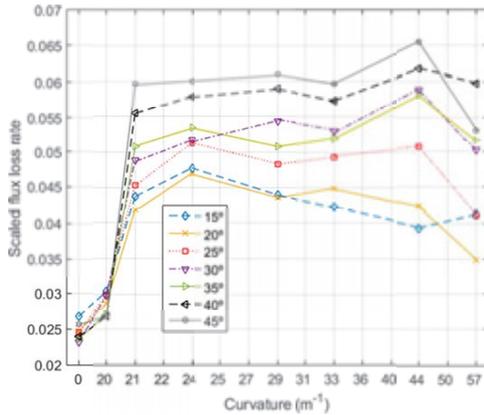


Figure 4. Rate of flux lost scaled from 0 to 1.0 as a function of the curvature of a CPLG for several incidence angles. The graph legend shows incidence angles with regard to the prismatic film flat surface.

The light flux rate escaped through the film is minimum in plane structure. After curvature deformation, there is a high increase in flux lost, resulting in a mean loss from 1.5 to 3.2 % in flux loss of CPLG with curvatures higher to 20. Losses increase with the increasing incidence angles. For example, for the incidence angle of 30°, which correspond with the upper incidence angle close to the angle limit for an optimum light guiding, there is an increase in losses of 2.3 % with regard to plane film. Changes in the direction of the light are intensified with curvatures higher than 33, more complex patterns of optical paths appears related with changes in slopes (see Fig. 4(b)) and thus, a slight decrease for the lower incidence angles appears.

4 Conclusions

A new technique to assess the influence of the bending induced by mechanical stress of flexible prismatic film used in light guides is proposed. Through image processing algorithms, changes in prism apex angle due to the curvature are experimentally evaluated. According to optical analysis, it is concluded that bending deformation has a raised influence in light guides having diameters from 0.1 m to 0.03 m (curvatures from 20 to 66.66 m⁻¹).

Experimental measurements show how light transmission changes in response to curvature. Light losses of about 2.4 times in the medium curvature of 22 m⁻¹ for an acceptance angle of 30° are obtained. Contour deformation are in agreement with light flux propagation rate obtained by experimental measurements depending on the curvature.

5 References

- [1] L. A. Whitehead, "Simplified ray racing in cylindrical systems", *Applied Optics*, 21(19): 3536-3538 (1982).
- [2] Whitehead, L. A., Dosanjh, P., & Kan, P. (1998). High-efficiency prism light guides with confocal parabolic cross sections. *Applied optics*, 37(22), 5227-5233.

- [3] Whitehead, L. A., Nodwell, R. A., & Curzon, F. L. (1982). New efficient light guide for interior illumination. *Applied Optics*, 21(15), 2755-2757.
- [4] Saxe, S. G. (1989). Prismatic film light guides: Performance and recent developments. *Solar Energy Materials*, 19(1), 95-109.
- [5] García-Fernández, B., Vázquez-Moliní, D., Fernández-Balbuena, A. Á., García-Botella, A., & Antón, J. C. M. (2015). Light losses in hollow, prismatic light guides related to prism defects: a transmittance model. *Chinese Optics Letters*, 13(9), 092201.
- [6] Field, J. E., Walley, S. M., Proud, W. G., Goldrein, H. T., & Siviour, C. R. (2004). Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies. *International Journal of Impact Engineering*, 30(7), 725-775.
- [7] Mahalik, N. P. (2006). *Micromanufacturing and nanotechnology* (pp. 178-180). Berlin [etc.]: Springer.
- [8] García-Fernández, B., Fernández-Balbuena, A. Á., & Vázquez-Moliní, D. (2016). Analytical method to measure bending deformations in prismatic optical films. *Chinese Optics Letters*, 14(4), 042201.
- [9] J. Canny, "A computational approach to edge detection," in *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* (IEEE, 1986), 8(6):679–698.
- [10] P.V.C. Hough, "Methods and means for recognizing complex patterns," U.S. Patent 3,069,654 (Dec. 18, 1962).

Freiformflächenoptiken für die Umsetzung von Dynamic-White Beleuchtungskonzepten

*Georg Spielberger, Christian Knoflach, Christian Reisecker
Bartenbach GmbH*

Problemstellung

Energieeffiziente Lichtlösungen basieren heutzutage fast ausschließlich auf LEDs. Diese bieten viele Möglichkeiten in der Beleuchtungsgestaltung, stellen aber Leuchtenentwickler auch vor Herausforderungen, um eine Beleuchtungssituation möglichst gut auf den Menschen anzupassen. Eine exakte Ausblendung und gezielte Lichtlenkung sind dabei von zentraler Bedeutung um eine angenehme und fokussierte Lichtverteilung zu schaffen und einer Ermüdung des Auges vorzubeugen. Darüber hinaus wurde in den letzten Jahren festgestellt, welchen maßgeblichen Einfluss Licht im Allgemeinen und die Lichtfarbe im Speziellen auf den menschlichen Organismus hat. Zum Beispiel kann speziell kaltweißes Licht die Suppression der nächtlichen Melatoninausschüttung und damit den zirkadianen Rhythmus des Menschen stören. Die Kombination von LEDs in verschiedenen Lichtfarben ermöglicht Dynamic-White Beleuchtungskonzepte, die angepasst an die Tageszeit Licht mit entsprechender Farbtemperatur liefern.

Ziel

Ziel ist daher die Entwicklung optischer Komponenten, die eine frei wählbare Farbmischung von kalt- und warmweißem Licht ermöglichen und trotzdem über einen hohen Wirkungsgrad bei gleichzeitig präziser Erfüllung der lichttechnischen Vorgaben (Ausstrahlcharakteristik, exakte Ausblendung) verfügen.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Mittels neuester Technologien in der Berechnung und Herstellung ist es uns nun erstmals möglich dynamisches Licht aus optisch präzisen Systemen mit hohem Wirkungsgrad zu erzeugen. Mikrofacettierte Freiformflächenreflektoren ermöglichen dabei die perfekte Durchmischung von unterschiedlichen Lichtfarben bei direkt- und sekundär strahlenden Systemen. Die Lichtmischung erfolgt dabei rein über die Optik, sodass gänzlich auf lichtstreuende Bauteile wie Diffusorgläser oder Streufolien verzichtet werden kann.

Realisierungsgrad

Es wurden bereits verschiedenste patentierte Spezialoptiken durch die Berechnung mittels Freiformflächen mit anschließender Facettierung entwickelt. Diese wurden in innovativen Anwendungen und internationalen Forschungsprojekten unterschiedlichster Art umgesetzt und reichen von Downlights über zielgerichtete Flächenstrahler bis zu Außenleuchten. Der optische Präzisionsspritzguss mit anschließender hochreflektierender metallischer Beschichtung ermöglicht die kostengünstige industrielle Serienumsetzung.

Complex Surface Optics for the Realization of Dynamic-White Illumination Concepts

*Georg Spielberger, Christian Knoflach, Christian Reisecker
Bartenbach GmbH*

Issue

Energy efficient lighting solutions rely nowadays almost exclusively on LEDs. They are available in a huge variety of quality aspects and offer great freedom in the design of modern illumination concepts. However, several factors have to be considered in order to adapt lighting solutions to human requirements in an optimal way. Features like a sharp cut-off as well as a distinct control of the light intensity distribution according to different needs of the user are important to avoid visual fatigue and eyestrain.

Beside that, the colour temperature of light sources has recently gained increasing attention in the field of human centric lighting, since it has a noticeable impact on human health and well-being. For example, cold white light with moderate illumination levels at eye level immediately suppresses the release of the hormone melatonin and thus disturbs the human circadian rhythm during the night. Therefore, the combination of LEDs in different light colours, varying over the course of the day, is a desired feature in many lighting designs.

Aim

Our aim is to develop optical components which offer a freely selectable combination of cold white and warm white light. Of course this has to be done with a high degree of efficiency while photometrical demands are fulfilled.

Description of the innovation/»best practice«

Using new methods in calculation and production, we realize these requirements by the design of complex surface reflectors with micro facets, guaranteeing a precise implementation of the demands on the light intensity distribution while allowing freely selectable colour mixing. Our solutions have a high degree of efficiency, since the colour mixing is carried out purely via the optics, such that we can forego the use of diffusors or scattering prismatic covers.

Level of realization

Various patent-registered complex surface optics with micro facets have already been designed. In order to allow a cost-efficient series production of our reflectors we use injection moulding followed by metallic coating carried out by our industrial partners. The innovative applications range from downlights over wallwashers to outdoor luminaires.

Integration von Lichtleitern in Geweben mit ortsabhängiger Seitenlichtauskopplung

Daria Wehlage, Andreas Herrmann, Andrea Ehrmann, FH Bielefeld

Problemstellung und Forschungsfragen

Lichtleiter können in Gewebe integriert werden, um Licht an einem Rand des Textils einzukoppeln und durch die textile Fläche zur gegenüberliegenden Seite zu transportieren. Aus Design-Aspekten wäre es interessant, an bestimmten Positionen auch gezielt Licht seitlich (also senkrecht zur Fläche) auszukoppeln zu können, idealerweise mit einer Methode, die einfach anzuwenden und mit textilen Fertigungsverfahren kompatibel ist. Eine solche Methode soll im Vortrag vorgestellt werden.

Stand der Wissenschaft/Technik

Bisherige Methoden, das Cladding von PMMA-Lichtleitern zu beschädigen und so Licht seitlich auszukoppeln, beinhalten beispielsweise Sandstrahlen, Ätzen der Oberfläche oder Schmirgeln. Solche mechanische Verfahren beeinflussen einerseits die mechanischen Eigenschaften der Lichtleiter negativ und sind andererseits nicht auf Lichtleiter in einem Gewebe anwendbar, da hierdurch auch die Kettfäden und eventuelle textile Schussfäden geschädigt würden.

Forschungshypothesen

In einem aktuellen Projekt wurde der Einfluss einer Temperaturbehandlung auf Lichtleiter in Kombination mit textilen Basismaterialien untersucht. Insbesondere wurde geprüft, ob es die Wärmebehandlung bei verschiedenen Temperaturen in einem Trockenofen sowie mittels eines Bügeleisens erlaubt, das Cladding zu entfernen, ohne den Kern des Lichtleiters zu beschädigen oder diesen über seine Glastemperatur zu erwärmen.

Versuchsaufbau

Lichtleiter aus PMMA mit Cladding wurden in Gewebe integriert sowie auf textile Materialien aufgenäht. Durch Testreihen mit verschiedenen Maximaltemperaturen und Verweildauern im Trockenofen wurde untersucht, wie Kern und Mantel der Lichtleiter reagieren; die thermische Verformung sowie die Seitenlichtauskopplung wurden gemessen. Um gezielt an bestimmten Positionen Licht auszukoppeln, wurde ein Bügeleisen genutzt, mit dem ebenfalls temperatur- und zeitabhängige Testreihen durchgeführt wurden.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Im Gegensatz zu den o. g. mechanischen Verfahren zur seitlichen Lichtauskopplung werden die Lichtleiter bei einer thermischen Behandlung mit definierter Temperaturführung nicht geschädigt. Eine gezielte seitliche Lichtauskopplung an festgelegten Stellen ist auf diese Weise möglich und kann, gemeinsam mit der Gewebefixierung, neue Design-Effekte erzeugen.

Integration of optical fibers in woven fabrics with position-dependent sidelight emission

*Daria Wehlage, Andreas Herrmann, Andrea Ehrmann,
Bielefeld University of Applied Sciences*

Research issue

Optical fibers can be integrated into woven fabrics to couple light in at one edge of the textile and transport it through the fabric to the opposite edge. Taking into account design aspects, it would be interesting to couple light out laterally (i.e. perpendicular to the surface) at defined positions, ideally with a method which can simply be applied and is compatible with textile production processes. Such a method will be presented here.

State of science/technology

Previous methods to damage the cladding of PMMA optical fibers in order to couple light out laterally include, e.g., sandblasting, etching of the surface or emery polishing. Such mechanical procedures have a negative impact on the mechanical properties of the optical fibers and can additionally not be used in a woven fabric due to the damage on warp threads and potential textile weft threads.

Research hypothesis

In a recent project, the influence of a temperature treatment on optical fibers was examined in combination with textile base materials. The investigation concentrated on heat treatment at different temperatures, using a drying oven as well as an iron, to remove the cladding without destroying the core of the optical fiber or heating it above the glass temperature.

Experimental setup

Optical fibers from PMMA with cladding were integrated into woven fabrics as well as sewn onto textile materials. Using test series with different maximum temperatures and exposure times in the drying oven, the reaction of fiber core and cladding were examined; thermal deformation and side light emission were investigated. To couple light out at defined positions, an iron was used for temperature and time dependent test series.

Results in comparison with previous findings

Opposite to the above mentioned mechanical procedures to laterally couple out light, the optical fibers are not damaged by a thermo-treatment with defined temperature control. In this way, light can be coupled out perpendicular to the textile surface at defined positions to create, in combination with the chosen woven structures, new design effects.

Integration of optical fibers in woven fabrics with position-dependent sidelight emission

*Daria Wehlage, Andreas Herrmann, Andrea Ehrmann,
Bielefeld University of Applied Sciences, Bielefeld, Germany*

Summary

Optical fibers can be integrated into woven fabrics to couple light in at one edge of the textile and transport it through the fabric to the opposite edge. Taking into account design aspects, it would be interesting to couple light out laterally (i.e. perpendicular to the surface) at defined positions, ideally with a method which can simply be applied and is compatible with textile production processes.

While previous methods to damage the cladding of PMMA optical fibers had a negative impact on the mechanical properties of the fibers, the temperature treatment examined in a recent project did not destroy the PMMA core. In this way, light can be coupled out laterally at defined positions.

1 Introduction

Optical fibers produced from PMMA (Poly(methyl methacrylate)) can be integrated into woven /1/ or even knitted fabrics /2/. Due to the bending of the optical fibers, light will partially be transmitted at the sides of the fiber – an effect which should be reduced if data are to be transmitted, but which can on the other hand be used to support sidelight emission for design or medical purposes.

The side-illuminating effect due to different weave structures was investigated theoretically and experimentally /3,4/. Some attempts were made by other research groups to increase the sidelight emission of optical fibers. Optical fibers, e.g., were disperse dyed at different temperatures for different times, subjected to heat in boiling water or etched using ethyl acetate to increase side emission /5/. In this way, however, the fiber cores were damaged due to the long residence time in the hot fluid.

Another way to enhance the side-emitting behavior of polymer optical fibers (POFs) is a treatment by a CO₂ laser /6/, resulting in light emission becoming more or less independent of the bending curvature. Alternatively, side emitting plastic optical fibers can be integrated into textile fabrics /7/.

All the above described approaches, however, aim at continuously emitting light over the whole area where the POFs are integrated. If sidelight shall be emitted only at defined positions, other methods must be used which should additionally not damage the fiber core and be compatible with processes in the textile industry. This article gives an overview of different heat treatment approaches to destroy the cladding without harming the PMMA core itself. It will show the influence of long-term heat treatment at different temperatures as well as short contacts with a heat source of defined temperature, such as an iron.

2 Experimental

Optical fibers from PMMA with fluorinated cladding (diameter 0.25 mm) were sewn on polyester woven fabrics and integrated into a woven fabric, using different weave patterns.

For long-time heat treatment, the POFs were cut to a length of (100 ± 1) mm and sewn onto a polyester woven fabric using a zig-zag stitch with stitch width and stitch length 4 mm each. The same samples were used for short-term heat treatment; additionally, woven fabrics with integrated optical fibers were subjected to the same treatment.

The long-time heat treatment was performed using a drying oven, starting at room temperature and sweeping to the final temperature at a rate of 4 K / min. Afterwards the sample cooled down in the oven until a temperature of max. 40 °C was reached.

For the short-term heat treatment, a heating plate was used which enabled temperature stability of ± 2 °C, equivalent to an electronic iron. The textile-integrated optical fibers were pressed onto the hotplate for 3-5 s by a wooden indenter to create a thermal contact at the desired positions.

3 Results

To investigate the influence of a long-term heat treatment, the lengths of the optical fibers were measured (Fig. 1). Compared to the original fiber length of 10 cm, the lengths decreased about more than 10 % for temperatures up to 160 °C, and the fibers were found to be more brittle. This finding is consistent with other groups' results /5/.

On the other hand, the cladding remained nearly unaltered; the side light emission was not significantly increased compared to the original behavior.

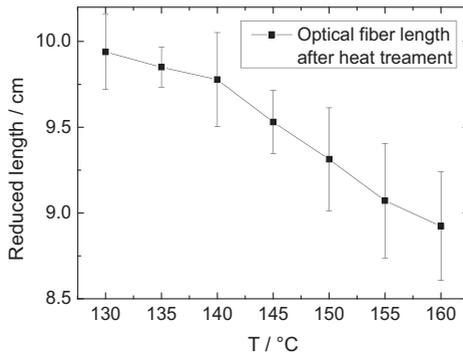


Fig. 1: Lengths of optical fibers after heat treatment in the drying oven at different temperatures.

In short-term heat treatments by a heat plate, however, both findings were exchanged. As can be seen in Fig. 2, destroying the cladding by short heat impulses resulted in a strong sidelight emission in the heated areas, while nearly no sidelight is visible along the residual part of the fibers. The light intensity can be modified due to contact pressure and duration, resulting in brighter and less bright areas (cf. Fig. 2).

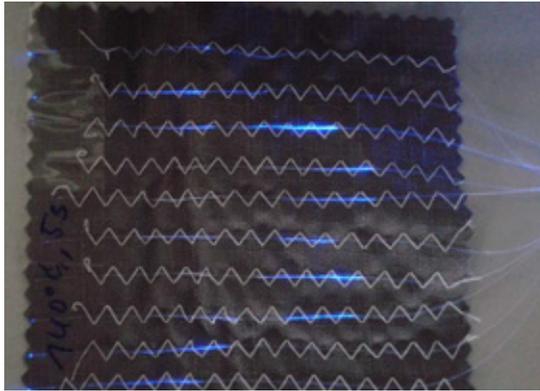


Fig. 2: Optical fibers with sidelight emission at positions defined by short contact to a hotplate.

Fig. 3 depicts the importance of fixing the optical fibers during this process by sewing or weaving. While the sewn fiber keeps its original shape, the other one is bent due to the identical heat treatment. This bending results in a reduced tensile strength compared to the original value, while the sewn fiber retains its tensile strength within the measuring accuracy.

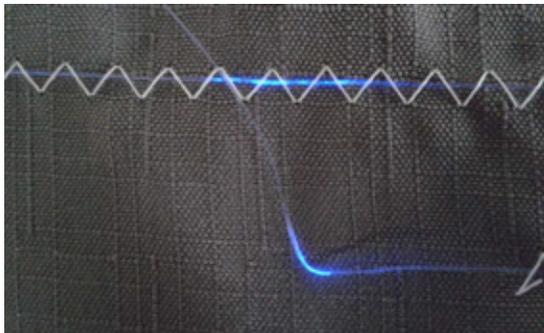


Fig. 3: Comparison of two optical fibers fixed by sewing and lying freely, pressed onto a heat plate at 140 °C for 3 s.

The sidelight emission can be attributed to roughening the fiber surface, an effect which was also utilized in the laser treatment of optical fibers [6]. This can be recognized from comparing microscopic images of the fibers, taken before and after damaging the cladding by heat treatment (Fig. 4). While the original cladding is smooth and translucent (Fig. 4, left panel), the heat treated fiber shows a rough cladding with gratings, similar to the typical effect of a laser treatment of a polymer fiber.

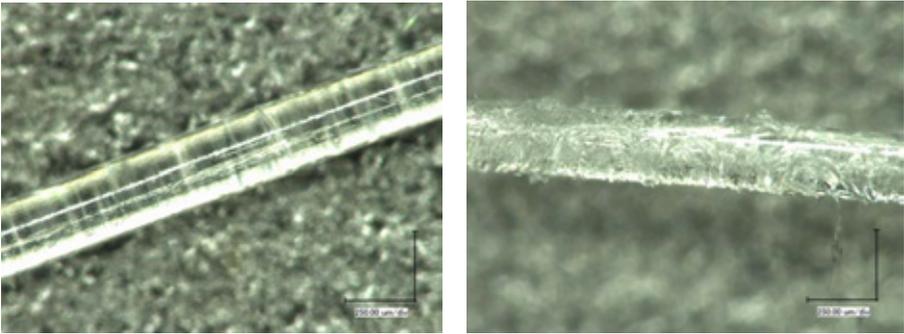


Fig. 4: Microscopic images, taken before (left panel) and after damaging the cladding by heat treatment (right panel).

The effect of this grating in the cladding is visualized in Fig. 5. Obviously, the light is emitted laterally from the optical fiber through the rough surface areas in which the conditions for total reflection are no longer fulfilled.

This means that higher temperatures or longer heat treatments do not necessarily increase the sidelight emission. Instead, the roughness of the cladding must be increased. Comparing this effect with the result of femto-second laser pulses, it can be assumed that higher temperatures in combination with shorter processing times may support the roughness. However, since the method depicted here is meant to be used in the textile industry, temperatures of 140 °C used for durations of 3 s can easily be achieved with common methods, i.e. using an iron and counting the time span with a simple clock or stop watch. Thus, further tests will concentrate on small changes of these parameters to avoid unrealistic values.

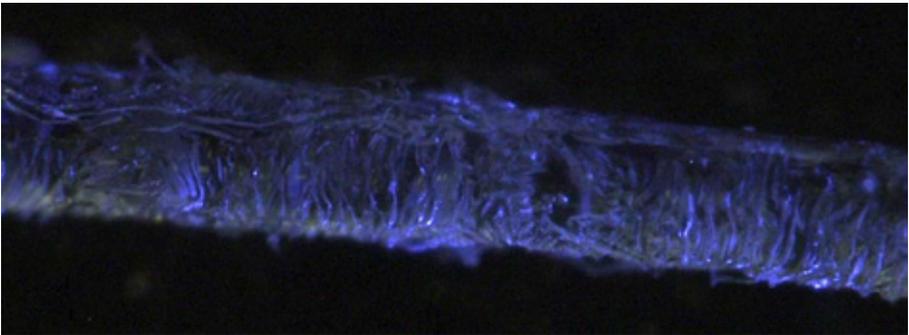


Fig. 5: Microscopic image of thermally damaged optical fiber with laterally emitted blue light.

Finally, Fig. 6 shows a woven fabric with a pattern introduced by the weaving pattern in combination with heat treatment of the optical fibers at different positions. Here, the combination of weave pattern and heat-treated areas defines the optical effects.



Fig. 6: Short-term heat treated fabric with different weaving patterns.

4 Conclusion and Outlook

In a recent project, a method was developed to increase sidelight emission from polymer optical fibers integrated in textile fabrics by sewing or weaving. Using short-term heat treatment at typical ironing temperatures, the fiber cladding is roughened, resulting in significant sidelight emission at defined positions.

Combining different weave structures and heat treatment patterns, new illuminated designs can be created. On the other hand, this technique allows for bringing light to the desired positions, e.g. in medical light therapy.

Future research will concentrate on increasing the surface roughness without damaging the fiber core.

Literature

- /1/ T. Berger, A. Rieschel, A. Herrmann, A. Ehrmann: Examination of the damage of optical fibers during weaving, *Technical Textiles* **58**, E261-E262 (2015)
- /2/ Y. Martens, D. Wehlage, A. Ehrmann: Knitting with optical fibers, Proceedings of 48th IFKT Congress, Mönchengladbach / Germany June 09, 2016
- /3/ J. C. Wang, B. H. Huang, B. Yang: Effect of weave structure on the side-emitting properties of polymer optical fiber jacquard fabrics, *Textile Research Journal* **83**, 1170-1180 (2013)
- /4/ C. Cochrane, S. R. Mordon, J. C. Lesage, V. Koncar: New design of textile light diffusers for photodynamic therapy, *Materials Science & Engineering C* **33**, 1170-1175 (2013)
- /5/ R. Mishra, A. Shukla, D. Kremenakova, J. Militky: Surface modification of polymer optical fibers for enhanced side emission behavior, *Fibers and Polymers* **14**, 1468-1471 (2013)
- /6/ J. Shen, X. M. Tao, D. Q. Ying, C. Y. Hui, G. F. Wang: Light-emitting fabrics integrated with structures polymer optical fibers treated with an infrared CO₂ laser, *Textile Research Journal* **83**, 730-739 (2013)
- /7/ D. Kremenakova, J. Militky, B. Meryova, V. Led: Characterization of Side Emitting Polymeric Optical Fibres, *Textile Bioengineering and Informatics Symposium Proceedings* **1-2**, 76-83 (2012)

Qualitative und quantitative tageslichttechnische Fassadenplanung

Dipl.-Ing. Simon Wössner 1), Eike Budde 1), Dr.-Ing. Jan de Boer 1), Dipl.-Ing. Daniel Witzel 2), Dipl.-Inf. Marco Seegers 2) 1) Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, 2) DIAL GmbH, Lüdenscheid

Problemstellung und Forschungsfragen

Im Bereich der Lichttechnik von Fassaden und Dachoberlichtern herrscht bis heute Planungsunsicherheit. Es fehlt eine geeignete Beratungssoftware mit darauf abgestimmten Systemdaten. Dies kann zu planerischen Fehlentscheidungen führen. Mit einem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Verbund-Forschungsvorhaben von Fraunhofer IBP, DIAL, Hochschule Rosenheim, Ratic Licht und zahlreichen Herstellern von Fassadensystemen und Dachoberlichtern wird Planern die Möglichkeit gegeben, die Tageslichtnutzung über lichtdurchlässige Fassadensysteme (Sonnen- und Blendenschutzsysteme, Lichtenkläser) physikalisch richtig und einfach anwendbar zu planen.

Stand der Wissenschaft/Technik

Es gibt bereits Ansätze zur Beschreibung der Systemdaten, Berechnungsmodule für die Bewertung des Tageslichteintrags durch einzelne Schichten sowie am Markt erhältliche Lichtplanungsprogramme, die jedoch den Bereich Tageslicht bislang eher spärlich berücksichtigen. Diese Teile sind nicht aufeinander abgestimmt und es gibt keinen durchgängigen Prozess, der es Anwendern mit konkreten Herstellerdaten möglich macht Fassaden tageslichttechnisch und zudem zusammen mit Kunstlicht zu planen. Dadurch werden Potentiale der Fassadentechnik nicht im möglichen Umfang genutzt.

Forschungshypothesen

Es benötigt aufeinander abgestimmte Komponenten (Messdaten, Berechnungsbibliothek, Oberfläche mit geeigneten Ausgabemöglichkeiten), um Qualitative und quantitative tageslichttechnische Fassadenplanung in der Praxis überhaupt zu ermöglichen.

Versuchsaufbau

Fassadensysteme und Dachoberlichter werden in einem weiterentwickelten Goniophotometer lichttechnisch korrekt vermessen. Auf den Messdaten aufsetzende Algorithmen ermöglichen Kombinationen von verschiedenen Schichten (Glas oder Verschattungssystem) und Berechnung des Tageslichts in Menge und Richtung im Innenraum. Diese Daten bilden auch die Grundlage für die Erstellung von elektronischen Produktkatalogen, in denen Hersteller Ihre Fassadensysteme oder Dachoberlichter mit den relevanten technischen und marketingbezogenen Informationen für den Planer hinterlegen können.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Planer erhalten so die Möglichkeit, einfach aber korrekt die Tageslichtplanung im Lichtplanungsprozess zu integrieren. Hersteller erhalten die Gelegenheit, die Vorteile ihrer Produkte dem Kunden deutlich zu machen.

Qualitative and quantitative design of facades with complex fenestration systems

*Dipl.-Ing. Simon Wössner**, *Eike Budde **, *Dr.-Ing. Jan de Boer **, *Dipl.-Ing. Daniel Witzel***,
*Dipl.-Inf. Marco Seegers * - * Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, **DIAL GmbH, Lüdenscheid*

Research issues

Regarding light technology issues relating to facades/ CFS and rooflights, the current situation is still marked by significant uncertainty in planning. Due to the lack of reliable consultancy software and adapted system data, this situation may cause mistakes in planning. Thanks to a *DBU (German Federal Environmental Foundation)* funded joint research project conducted by *Fraunhofer IBP, DIAL, Hochschule Rosenheim, Ratec Licht* and many manufacturers of facade systems and rooflights, planners will now be given the opportunity to design the use of daylight through transparent facade systems (shading and glare protection systems, light-redirecting glazing) in a physically correct and easily applicable manner.

State of science/ technology

It is true that approaches to describe system data have been available for some time, just like calculation modules for assessing the amount of daylight entering a building through individual layers, along with customary light planning software, but these programmes do not take sufficient account of daylighting. These components are however not coordinated and there is no consistent process, which enables users to design the daylight performance of facades based on concrete manufacturers' data in conjunction with artificial lighting. As a consequence, potential options of facade technology are not tapped to the full extent.

Research hypothesis

It takes coordinated components (measured data, calculation library, interface with appropriate output options) to provide a practical basis for qualitative and quantitative daylight planning of complex fenestration systems.

Experimental setup

The optical properties of facade systems and rooflights will be correctly measured in an advanced goniophotometer. Algorithms based on the measured data allow comparing combinations of different layers (glazing or shading system) and calculating daylight incidence (amount and direction) in interior spaces. This data will also establish the basis for compiling electronic product catalogues, in which manufacturers will provide planners with relevant technical and marketing-related information about their facade systems or rooflights.

Results in comparison with previous findings

In this way, planners are given the opportunity to integrate daylight planning into the process of lighting planning in a simple but correct manner. Manufacturers will benefit from the opportunity to demonstrate their products' advantages to customers.

Qualitative und quantitative tageslichttechnische Fassadenplanung

Dipl.-Ing. Simon Wössner, Eike Budde *, Dr.-Ing. Jan de Boer *, Dipl.-Ing. Daniel Witzel**,
Dipl.-Inf. Marco Seegers * - * Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, **DIAL GmbH,
Lüdenscheid*

Zusammenfassung

Im Bereich von Fassaden und Dachoberlichtern herrschte bezüglich deren tageslichttechnischen Auswirkungen auf das Gebäude lange Zeit Planungsunsicherheit. Fehlende Systemdaten und darauf abgestimmte Planungs- und Beratungssoftware führten zu planerischen Fehlentscheidungen und Potentiale der Fassadentechnik werden nicht im möglichen Umfang genutzt. Nun wird Planern die Möglichkeit gegeben werden, die Tageslichtnutzung über lichtdurchlässige Fassadensysteme physikalisch richtig und einfach anwendbar mit Hilfe der Software DIALux evo zu planen. Basierend auf den Ergebnissen der Tageslichtplanung kann eine ergänzende Kunstlichtplanung durchgeführt werden, die energetisch optimal auf die vorhandene Architektur abgestimmt ist.

1 Einleitung

Die wesentliche regenerative Energiequelle zur Senkung der Energieverbräuche für Beleuchtung stellt das Tageslicht dar. Weltweit entfallen circa 19 % des gesamten Stromverbrauchs auf den Betrieb von Beleuchtungsanlagen. Im Gebäudebereich, der sich in Deutschland für ca. 40 % des Gesamtenergieverbrauchs verantwortlich zeichnet, kann die Beleuchtung bei Nichtwohnbauten ohne weiteres 30 % des Primärenergiebedarfs von Gebäuden ausmachen. Der Fassadentechnik kommt hierbei hinsichtlich einer gesamtenergetisch effizienten und biologisch wirksamen Lichtversorgung von Innenräumen eine maßgebliche Bedeutung zu. Im Bereich der Lichttechnik von Fassaden herrschte allerdings lange Zeit Planungsunsicherheit. Es fehlen Fassadensystemdaten und geeignete Beratungssoftware. Dies führt zu planerischen Fehlentscheidungen. Potentiale der Fassadentechnik werden nicht genutzt. Ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Verbund-Forschungsvorhaben von Fraunhofer IBP, DIAL, Hochschule Rosenheim, Ratec Licht in Zusammenarbeit mit sechs Herstellern von Fassadensystemen und Dachoberlichtern setzte, wie in Abbildung 1 dargestellt, hier an.



Abb. 1: Durch entsprechende Messtechnik, Datenbanken und Berechnungssoftware werden lichtdurchlässige Fassadensysteme bewertbar.

Für die Planerschaft werden kostenfreie, einfache - aber umfassende - Berechnungs- und damit Analyse- und Optimierungsmöglichkeiten für die objektbezogene Fassadenplanung zur Verfügung gestellt. Die drei unterschiedlichen Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte Messtechnik, Algorithmik und Workflows & Bedienkonzepte werden hierzu in einem neuartigen Planungsprozess für Fassaden integriert.

Konkret wurden die Projektschwerpunkte in der Erhebung von Systemdaten, der Entwicklung von Berechnungsalgorithmen inklusive offener Datenstrukturen und Integration derselben in die frei verfügbare Lichtplanungssoftware DIALux EVO mit einer weltweiten Verbreitung von etwa 500.000 Anwendern, der Modellierung und Implementation planungspraktischer Workflows, der Entwicklung von Datenbankkomponenten und Datenmanagementtools sowie der Validierung und Qualitätssicherung gelegt. Am Markt wird durch das Projekt Vergleichbarkeit unterschiedlicher Fassadenlösungen geschaffen. Dadurch, dass Hersteller Ihre Produkte besser verstehen lernen, ist zu erwarten, dass weitere Innovationen in der Fassadentechnik durch das Projekt angestoßen werden. Im Planungsmarkt kann es zu einer wahrnehmbaren Differenzierung unterschiedlicher planerischer Lösungen und Qualitäten kommen. Besonders im Lichte der Energiewende kann das mittels einer innovativen tageslichttechnischen Fassadenplanung erschließbare Effizienzpotential als ein signifikanter Baustein für ein nachhaltiges Energiekonzept und eine signifikante Entlastung der Umwelt genutzt werden.

2 Messtechnik

Es wurde eine umfangreiche, planungspraktisch relevante Sammlung an Systemdatensätzen erstellt. Um umfänglich, zeiteffizient und kostengünstig messen zu können, wurde zunächst ein am Fraunhofer IBP bestehendes Messverfahren inklusive bestehender Messeinrichtung (de Boer et al., 2010) erweitert. Die Anlage, vgl. Abbildung 2, kann nun ortsaufgelöst sowohl die Transmission als auch die Reflexion von Fassadenkomponenten aufzeichnen (Streuindikatrizen des Leuchtdichtkoeffizienten, auch als BRTDF bezeichnet).

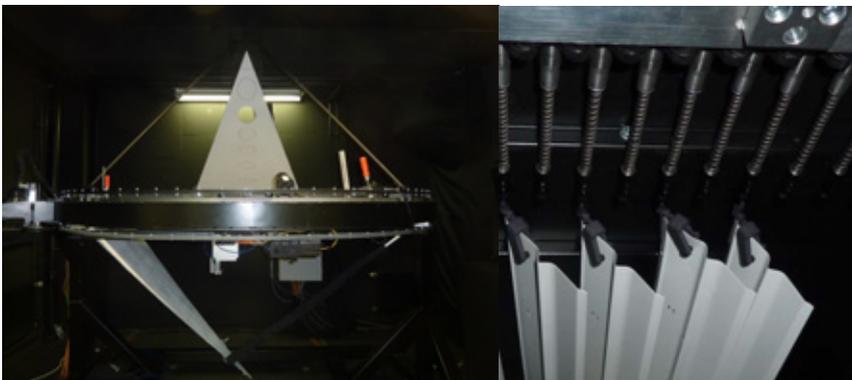


Abb. 2: Fotografische Aufnahme des Goniophotometers und Positioniereinrichtung für drehbare Lamellenraffstore.

Die bisher nur monochromatisch aufzeichnende Messeinrichtung wurde um ortsauflösende Farbmessetechnik und $c(\lambda)$ (circadiane Wirkungskurve) Gewichtung der Spektren erweitert. Somit können z. B. auch farbige Verglasungs- und Sonnenschutzsysteme in Ihrer spektralen Wirkung evaluiert werden. Dies ist in der architektonischen Bewertung der Fassadengestalt von hoher Bedeutung. Durch die $c(\lambda)$ gewichtete Messung können Fassadensysteme zukünftig besser in ihrer Wirkung auf den circadianen Rhythmus des Menschen in Gebäude bewertet werden. Um aufwendige Umrüstvorgänge, z. B. bei unterschiedlichen Winkelstellungen der Lamellen von Raffstores, zu vermeiden, wurde eine Positioniereinrichtung entwickelt. Mittels der automatisierten Messanlage wurden über 30 Proben marktrepräsentativer Komponenten und Systeme der am Projekt beteiligten Unternehmen vermessen. Hierbei kommt ein neu entwickeltes, XML-basiertes Datenformat zum Einsatz, das neben den photometrischen Daten (Aydinli et al., 1999). weitere für die Simulation relevante Informationen, wie erforderliche Einbaurichtung (z. B. bei speziellen Sonnenschutzrastern) und Steuerkennlinien (z. B. Cut-off Steuerung bei Lamellenraffstoren) enthält. Das Format kann als Analogie zu dem für Leuchten genutzten eulumdat-Format verstanden werden.

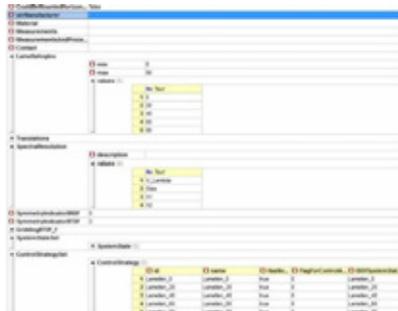


Abb. 3: Auszug einer Beispieldatei auf Basis des neuen XML-Datenformats zur Systembeschreibung

3 Algorithmik

Die Lichtausbreitung von außen durch die Fassadensysteme ins Gebäudeinnere wird durch neu- und weiterentwickelte Algorithmen berechnet. Zum einen kommt ein fassadentechnischer Algorithmus zum Einsatz, der die Lichtstärkeverteilung (LVK) eines Fassadensystems unter den objektspezifischen speziellen Einstrahlbedingungen ermittelt. Hierzu wurde ein bestehendes Verfahren (de Boer, 2006) dahingehend erweitert, dass unterschiedliche Kombinationen von Verglasungen und Sonnenschutz spektral bzgl. ihrer Transmission als auch Reflexion berechnet werden können. Zum anderen wurde die Software DIALux Evo zur Berechnung der Lichtausbreitung in beliebigen Gebäudestrukturen um die erforderlichen Funktionen für die Nutzung der o. g. LVKs und erforderliche Funktionen zur fotorealistischen Darstellung der Fassadensysteme erweitert. Der Ansatz ist in den Abbildungen 4 illustriert.

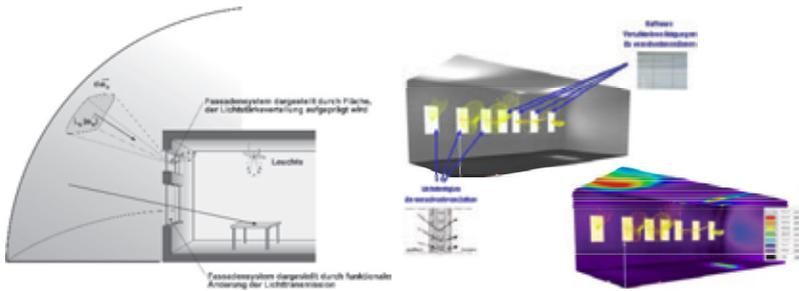
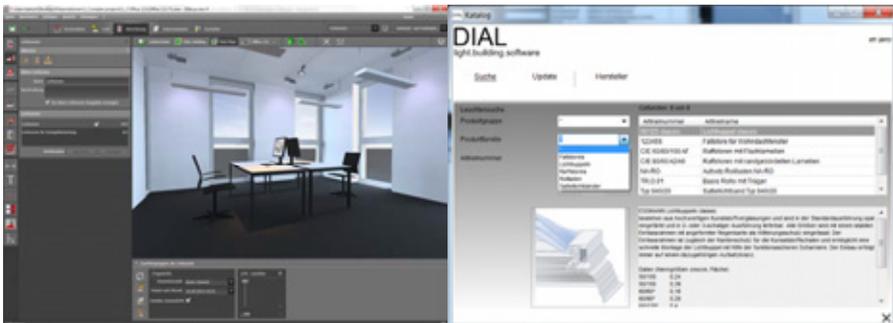


Abb. 4: Prinzipielle Darstellung der Errechnung der Raumbelichtungsverhältnisse mit Hilfe der Modellierung von Leuchten und Fassaden durch Lichtstärkeverteilungen.

4 Workflows und Bedienkonzepte

Ziel der Anwendung ist die Planung mit Systemdatensätzen ohne deutlichen Mehraufwand gegenüber der Kunstlichtplanung und bisherigen Tageslichtsimulationen. Dazu bedarf es einer einfachen und in den bekannten Planungsprozess integrierten Nutzerführung. Für eine schrittweise Planung bietet DIALux evo (DIALux, 2016) ein solches System, welches sich in der Kunstlichtplanung bereits bewährt hat. Dabei werden dem Anwender in jedem Planungsschritt passende Werkzeuge und Hilfsmittel zur Verfügung gestellt. So werden die Tageslichtplanung und die Simulation von tageslichtlenkenden und tageslichtverschattenden Systemen integraler Bestandteil der Lichtplanung. Die Planung der Fassadenelemente und die Eingabe der notwendigen Parameter erfolgt im Modus Konstruktion. Die tageslichtrelevanten Informationen zu Ort und Nordausrichtung werden zusammen mit dem Gelände definiert. Die Fassadenelemente selbst finden sich an Gebäudeöffnungen wie Fenster und Oberlichter. Zur Auswahl der Elemente dient das schon bei der Leuchtauswahl verwendete und dem Planer bekannte Katalogsystem. Das für die Berechnung notwendige Himmelsmodell sowie Datum und Uhrzeit können an den Lichtszenen unter Berechnung definiert werden, so dass Simulationen an verschiedenen Tagen und Uhrzeiten planbar sind. Die Berechnung selbst erfolgt zusammen mit dem Kunstlicht, kann aber voneinander getrennt evaluiert werden. Der Anwender findet Produktdatenblätter der verwendeten Fassadenelemente mit marketingrelevanten Informationen sowie lichttechnische Ergebnisse und Diagramme. Die Abbildungen 5 illustriert das Bedienkonzept.



5 Validierung, Qualitätssicherung

Die Validierung wurde sowohl für die einzelnen Komponenten als auch für das Gesamtsystem durchgeführt. Bei der Validierung der einzelnen Komponenten wurden sowohl die Messeinrichtung als auch der Algorithmus separat verifiziert und validiert. Für die gesamte Berechnungsfunktionalität wurde zunächst der Fassadentechnische Algorithmus validiert. Abschließend wurde die Berechnung der Lichtausbreitung in Gebäudestrukturen überprüft. Folgende Vorgehensweise wurde gewählt:

- analytische Testfälle
- Plausibilisierungen
- Vergleich mit bereits validierten Referenzfällen -> Grenzfälle (idealer Diffusor, Glas)
- veröffentlichte internationale Validierungsfälle für lichttechnische Software.

Zur Validierung der Lichtausbreitung im Inneren von Gebäuden wird auf ein bereits normiertes Verfahren zurückgegriffen. Dieses ist im "CIE Report 171:2006 Test Cases to Assess the Accuracy of Lighting Computer Programs" beschrieben. Auch, wenn es nicht direkt lichtenkende Fassadenelemente adressiert, kann anhand der beiden Grenzfälle (Diffusor, offene Fassadenöffnung: Lochblende) sehr gut die Funktionstüchtigkeit der Implementierung geprüft werden. Die CIE 171-2006 stellt zu einfachen Testszenen mit Tageslicht Sollergebnisse bereit.

Folgende Testfälle konnten zum Test des Verfahrens genutzt werden:

- Testfall 5.3: bedeckter Himmel mit 1 m x 1 m Oberlicht in einem 4 m x 4 m x 3 m Raum, diffuser Messdatensatz als Referenzberechnung.
- Testfälle 5.9: bedeckter Himmel / klarer Himmel mit Oberlichtern in einem 4 m x 4 m x 3 m Raum.
- Testfälle 5.11: bedeckter Himmel / klarer Himmel mit Fenstern in einem 4 m x 4 m x 3 m Raum.

Diese Testräume wurden in DIALux evo nachgebaut, berechnet und mit den Sollwerten der CIE 171-2006 in verglichen. Die Definition und Berechnung für den CIE Testfall 5.11, Fenster 2 m x 1 m sind in Abbildung 6 und Tabelle 1 zu sehen.

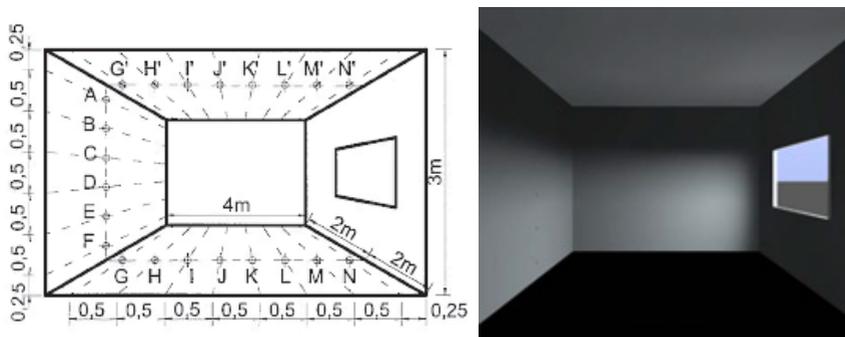


Abb. 6: Referenzwerte für den CIE Testfall 5.11, Fenster 2 m x 1 m aus (Klems, 1993) angegebenen Referenzwerten und Darstellung in DIALux EVO.

Tab. 1: mittlere relative Abweichung gegenüber den CIE-Testfällen auf gegebenen Berechnungspunkten

Testfall	Abweichung [%] bedeckter Himmel
CIE 171-2006 5.9, Oberlicht 1 m x 1 m	1,18
CIE 171-2006 5.9, Oberlicht 4 m x 4 m	0,93
CIE 171-2006 5.11, Fenster 2 m x 1 m	1,16
CIE 171-2006 5.11, Fenster 4 m x 3 m	1,19

Ausblick

Die Software DIALux EVO ist seit Frühjahr 2016 mit der Tageslichtfunktionalität verfügbar. Über die dargestellten Funktionalitäten hinausgehend ist geplant, weitere für die Tageslichtplanung erforderliche und wünschenswerte Funktionen zu implementieren. Dies umfasst die detaillierte Simulation des Außenraums, den Vergleich alternativer Tageslichtlösungen, den sukzessiven weiteren Ausbau der Darstellungs- und Ausgabefunktionalität, Jahressimulationsverfahren und eine weitere Verfeinerung der Systemvisualisierung.

Des Weiteren ist geplant, den Datenbestand von Fassadenkomponenten und –systemen weiter auszubauen. Hersteller sind eingeladen, ihre System und Lösungen in das Softwaresystem zu integrieren.

6 Literatur

Aydinli, S.; Kaase, H.: Measurement of Luminous Characteristics of Daylighting Materials. A Report of IEA SHCP TASK 21 / ECBCS ANNEX 29, Technical University of Berlin (1999).

de Boer, J.: Modelling Indoor Illumination by Complex Fenestration Systems Based on Bidirectional Photometric Data. Energy and Buildings 38 (2006), H. 7, S. 849-868.

de Boer, J.; Panhans, B.; Stößel, F.: Neue lichttechnische Bewertungsmöglichkeiten von Fassadensystemen: Das IBP-Photogoniometer. IBP-Mitteilung 499/2010.

DIALux, Lichtplanungssoftware. Deutsches Institut für angewandte Lichttechnik GmbH, DIAL, www.dial.de

Klems, J. H.: A New Method for Predicting the Solar Heat Gain of Complex Fenestration Systems: 1, Overview and Derivation of the Matrix Layer Calculation. N. p.,

Licht über viele Ebenen

Arne Abromeit, Prof. Bernhard Lenz, Hochschule Karlsruhe

Problemstellung

Viele Bestandsgebäude weisen große Defizite hinsichtlich Energieverbrauch und Nutzerkomfort auf.

Ziel

Verbesserung des Energieverbrauchs sowie des visuellen Komforts

Beschreibung

Beim Projekt Mathematikgebäude KIT handelt es sich um die Sanierung eines bestehenden Hochschulgebäudes aus den 1960er Jahren. Energieverbrauch und Nutzung von Tageslicht spielten bei der Planung des Sanierungskonzeptes eine besondere Rolle. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden Energieverbräuche, Nutzerkomfort und Nutzerverhalten untersucht. Außerdem wurden Tageslichtquotienten, Kunstlichtanteile, sowie der Stromverbrauch für Kunstlicht ermittelt. Für innenliegende Räume wurde die spektrale Zusammensetzung des Tageslichts untersucht.

Das Gebäude verfügt über 6 Nutzebenen. Ein Teil der Räume wird über die Außenfassade belichtet, ein anderer Teil über ein überdachtes Atrium. Während es vor der Sanierung fensterlose Räume gab, besitzen im sanierten Gebäude alle Nutzräume einen Tageslichtbezug. Das Atrium ist mit einem Folienkissendach überdeckt. Räume im Untergeschoss werden durch Lichtöffnungen im Erdgeschoss über das Atrium belichtet.

Der Beitrag verdeutlicht, wie durch eine konsequente Lichtplanung das Tageslichtangebot erheblich verbessert werden konnte. Daneben werden die visuellen Schattenseiten des Tageslichtkonzeptes in der Praxis aufgezeigt.

Realisierungsgrad

Das Gebäude befindet sich auf dem Campus des KIT und wird seit April 2015 genutzt. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird das Gebäude bis Ende 2016 wissenschaftlich begleitet.



Der offene Innenhof vor der Sanierung



Überdachtes Atrium nach der Sanierung



Tagesbelichtung über das Atrium bis ins Untergeschoss

Many levels of light

Arne Abromeit, Prof. Bernhard Lenz, University of Applied Sciences Karlsruhe

Issue

Many existing buildings have deficits in regard to energy consumption and user comfort.

Aim

Improvement of energy performance and visual comfort

Description

The project is a refurbishment of an existing university building from the 1960s. The institution building Mathematics is located at the Karlsruhe Institute of Technology. Energy consumption and the usage of daylight played an important role in the development of the restructuring plan.

Within the research project energy consumption, user comfort and user behaviour are analysed. Furthermore daylight factors, daylight autonomy and energy consumption for artificial lighting are investigated. The spectral composition of daylight was examined especially for rooms to the atrium.

The building consists of six levels. Some rooms are lit through the external facade others through a roofed atrium. After renovation there are only few rooms without daylight link.

The atrium is roofed by a pneumatic membrane structure. Rooms on the basement level are lit by openings in the ground floor through the atrium.

The article illustrates that a consequent planning of daylight can improve daylight autonomy significantly. Visual deficits of the concept in practice are shown.

Level of realization

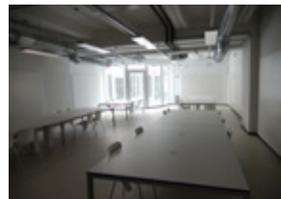
The building is located on the Campus at the Karlsruhe Institute of Technology and is in operation since April 2015. Within the research project the building is evaluated scientifically until the end of 2016.



The inner courtyard before renovation



Roofed atrium after renovation



Daylighting through the atrium down to the basement level

Licht über viele Ebenen

Arne Abromeit, Prof. Bernhard Lenz
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe (Deutschland)

Zusammenfassung

Im Frühjahr 2015 wurde nach mehreren Jahren Planung und Sanierung das Kollegiengebäude Mathematik dem KIT¹ erneut übergeben. Die Gebäudestruktur und die Gebäudetechnik wurden grundlegend verändert. Durch intensive Nutzung von Tageslicht, eine effiziente künstlichen Beleuchtung und ein besonderes Lüftungskonzept soll der Energieverbrauch im sanierten Gebäude deutlich reduziert sein. Gleichzeitig sollen Raumklima, Behaglichkeit und visueller Komfort verbessert sein. Das Projekt verdeutlicht, wie durch eine konsequente Lichtplanung das Tageslichtangebot erheblich verbessert werden kann. Gleichzeitig wird aber deutlich, wie Fehler im Detail den Komfort und den Energieverbrauch negativ beeinflussen können.

1 Ausgangssituation

Das Gebäude wurde 1962/63 erstellt. Ende der 1990er Jahre war das Gebäude sanierungsbedürftig geworden, die Gebäudetechnik veraltet und der Energieverbrauch überdurchschnittlich hoch. Der Komfort im Gebäude war mangelhaft.

Vor der Sanierung wies das Gebäude eine äußerst schlechte Performance der Gebäudehülle auf. Auskragende Bauteile, wie die bis zu einem Meter über alle Geschosse auskragende Deckenplatten, bildeten großflächige Wärmebrücken. Das Gebäude besaß einen offenen Innenhof. Arbeits- und Seminarräume erstreckten sich über 5 Geschosse – vom Untergeschoss bis zum dritten Obergeschoss.



Südwestfassade mit erkennbaren Wärmebrücken



Offener Innenhof

Abb 1 + 2: Gebäude vor der Sanierung (Photos P. Beuchert)

1 KIT – Karlsruher Institut für Technologie

2 Sanierung

Das Sanierungskonzept wurde im Rahmen eines Wettbewerbs von Ingenhoven Architekten [1] entwickelt. Um den gestiegenen Platzbedarf der Fakultät zu erfüllen, wurde die Nutzfläche der einzelnen Ebenen deutlich erhöht und das Gebäude um ein Staffelgeschoss erweitert. Die auskragenden Elemente sind nach der Sanierung vollständig in die Gebäudehülle integriert und die Fassadenebene um jeweils einen Meter nach außen verlagert. Durch eine zusätzliche Reduktion der Tiefe der Büroräume, um etwa zwei Meter, konnten zusätzliche Räume geschaffen werden. Der sanierte Innenhof ist mit einem Folienkissendach überdeckt und als Atrium in die thermische Gebäudehülle integriert. Dadurch kann die Grundfläche des Atriums zusätzlich genutzt werden. Um den Räumen im Untergeschoss einen Tageslichtbezug zu geben, wurden Öffnungen in die Grundplatte des Atriums eingebracht.

Der feststehende Sonnenschutz an den Außenfassaden wurde durch einen außenliegenden Lamellenraffstore ersetzt. Das neu geschaffene Atrium wird durch innenliegende Sonnensegel verschattet. An das Atrium angrenzende Seminar- und Besprechungsräume besitzen einen zusätzlichen textilen Sonnenschutz. Über Lüftungsklappen im Erdgeschoss sowie im vierten Obergeschoss soll das Atrium, vorwiegend nachts, passiv gekühlt werden, um eine Überhitzung durch Solarstrahlung zu vermeiden. Das neu geschaffene Atrium dient als visuelle Kommunikationszone. In den zum Atrium offenen Eckbereichen befinden sich Arbeitsplätze für Studierende.



Tagesbelichtung bis ins Untergeschoss

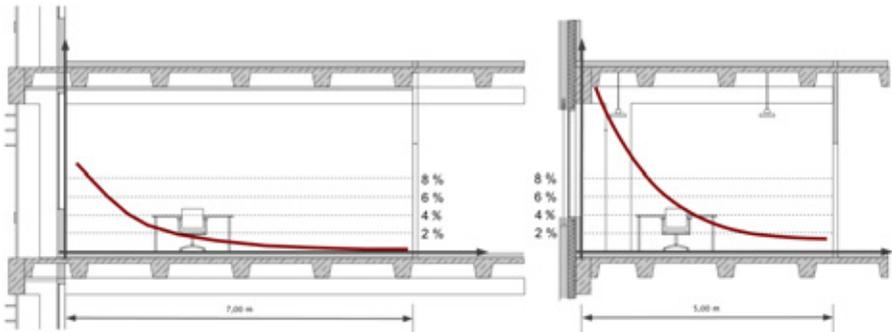


Überdachtes Atrium nach der Sanierung

Abb 3 + 4: Das Gebäude nach der Sanierung – über das Atrium werden angrenzende Räume belichtet

Tab. 1 : Gebäudekennzahlen vor und nach der Sanierung

	vor Sanierung	saniertes Gebäude
Bruttogrundfläche [BGF]	9.963 m ²	15.472 m ²
Bruttorauminhalt [BRI]	37812 m ³	66.140 m ³
A / V - Verhältnis	0,36 m ² /m ³	0,20 m ² /m ³
Büroräume	3504 m ²	4002 m ²
Seminarräume	504 m ²	1818 m ²
Bibliothek	523 m ²	802 m ²
Studentische Arbeitsbereiche	550 m ²	940 m ²
Arbeitsplätze	152	256



Bestehendes Gebäude mit feststehendem Sonnenschutz vor der Fassade

Saniertes Gebäude mit geringerer Raumtiefe und fassadennaher Fensterenebene

Abb 5: Tageslichtquotientenverlauf Büro – durch Verschiebung der Fassadenebene und eine Verringerung der Raumtiefe wurde eine deutliche Verbesserung des Tageslichtangebotes erreicht

Im gesamten Gebäude sind helle Oberflächen verwendet. Raumboflächen und Möbel sind in Weißtönen gewählt. Das Atrium ist zum Teil mit matten Aluminiumplatten verkleidet. Bodenbeläge besitzen einen Reflexionsgrad von ca. 50 %.

Aufgrund der hohen Reflexionsgrade sowie der geänderten Raumgeometrien ist das Tageslichtangebot im gesamten Gebäude deutlich verbessert. Außenliegende Büro- und Arbeitsräume weisen insgesamt einen höheren Tageslichtquotienten auf (Abbildung 5). Eine hohe Tageslichtautonomie und ein geringer Stromverbrauch für Kunstlicht ist an den Arbeitsplätzen zu erwarten.

3 Tageslichtqualität

Das Gebäude weist nach der Sanierung eine deutlich größere Nutzfläche auf. Soll ein gutes Tageslichtangebot erreicht werden, bedeutet dies, dass mehr Fläche und mehr Räume mit Tageslicht erreicht werden müssen.

Neben der Beleuchtungsfunktion ist Tageslicht auch ein Informationsträger. Es stellt Informationen zur Tages- und Jahreszeit, sowie zu Wetter und Umgebung bereit. Vom Nutzer werden diese Informationen über Lichtrichtung, Schattigkeit, Intensität und Lichtfarbe empfangen. Im Innenraum von Gebäuden müssen Tageslichtöffnungen so gewählt sein, dass der Informationsfluss nicht behindert oder verfälscht wird [2].

Das Folienkissendach sowie Sonnenschutz, Oberflächen und Gläser verändern die Qualität des Lichtes in den Innenräumen. In Abbildung 6 sind die unterschiedlichen Qualitäten und die jeweiligen Flächenanteile dargestellt. Die blauen Zonen stellen Bereiche dar, die über die Außenfassade belichtet sind oder dieser visuell zugeordnet sind. Diese Bereiche sind über eine Doppelverglasung mit einem außenliegenden Sonnenschutz an das Tageslicht angekoppelt. Der Nutzer kann den Sonnenschutz direkt steuern. Die übrigen Bereiche werden indirekt über das Atrium mit Tageslicht versorgt. Zum Teil sind Räume über eine zusätzliche Innenfassade (Doppelverglasung, teilweise mit Sonnenschutz) mit dem Atrium

verbunden. Räume, die mit gelb oder orange markiert sind können vollständig mit Tageslicht belichtet werden. Die mit rot markierten Räume im Untergeschoss besitzen einen starken Tageslichtbezug, können aber nicht in der gesamten Fläche mit Tageslicht ausreichend belichtet werden. Die grün markierten Flure stehen zum Teil über Räume zum Atrium mit Tageslicht in Verbindung. Ist der Sonnenschutz in diesen Räumen aktiviert, besteht im Flurbereich nahezu kein Tageslichtbezug. Die dunkelgrau markierten Räume sind Flurzonen und WCs, die in keiner Verbindung zum Tageslicht stehen. Für den Nutzer bedeutet dies, dass der Großteil der von ihm genutzten Flächen entweder vollständig mit Tageslicht belichtet werden kann oder wenigstens ein starker Bezug besteht.

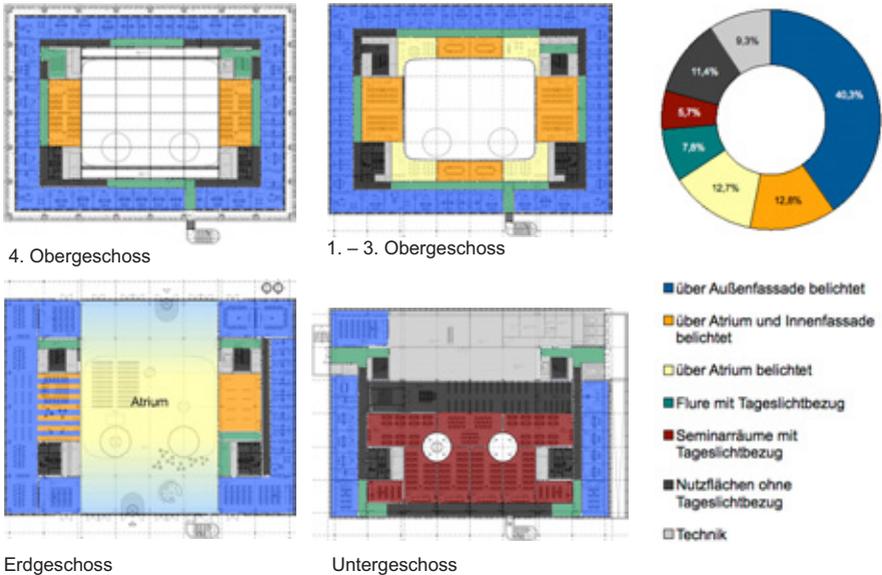


Abb. 6: Übersicht über Tageslichtqualitäten im sanierten Gebäude

Die Lichtqualität des Tageslichtes wurde in den unterschiedlichen Zonen spektral gemessen, um die Veränderung bzw. Verfälschung des Lichts zu überprüfen. Abbildung 7 zeigt einen absoluten spektralen Quotienten. Hierzu wurde das im Raum ankommende Tageslicht mit dem unverfälschten Tageslicht über das sichtbare Spektrum ins Verhältnis gesetzt. Der Wert ist dem Tageslichtquotienten ähnlich und wurde im Abstand von etwa 1,5 Metern von der jeweiligen Fassadenebene gemessen. Die relative Transmission entspricht dem vom Nutzer wahrgenommenen visuellen Eindruck, da der Nutzer über keine absolute Helligkeitswahrnehmung verfügt. Es ist erkennbar, dass die Räume zur Außenfassade (dunkelblau) eine Verschiebung der Lichtfarbe nach Blau aufweisen. Im Atrium sowie in den angrenzenden Räumen ist die Lichtfarbe nach Rot verschoben. Bei an das Atrium angrenzenden Räumen, die über eine zusätzliche Verglasung verfügen ist, das Spektrum im roten und blauen Bereich eingeschränkt. Durch Folienkissendach, Sonnenschutz und Verglasungen kommt es zwar zu Farbverschiebungen, die Farbwiedergabe ist aber aufgrund der kontinuierlichen Kennlinien gut bis sehr gut.

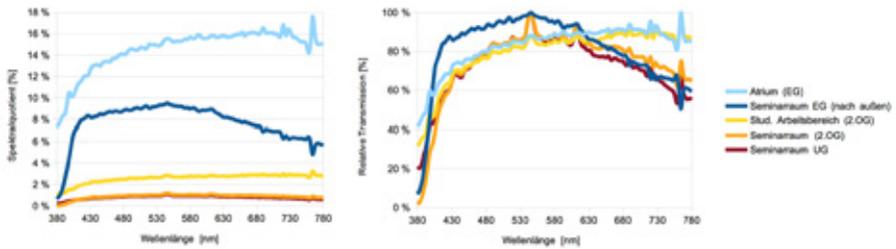


Abb. 7: Tageslichtqualität in den an das Atrium angrenzenden Räumen im Vergleich zu einem außenliegenden Seminarraum

4 Energetische und wissenschaftliche Aspekte

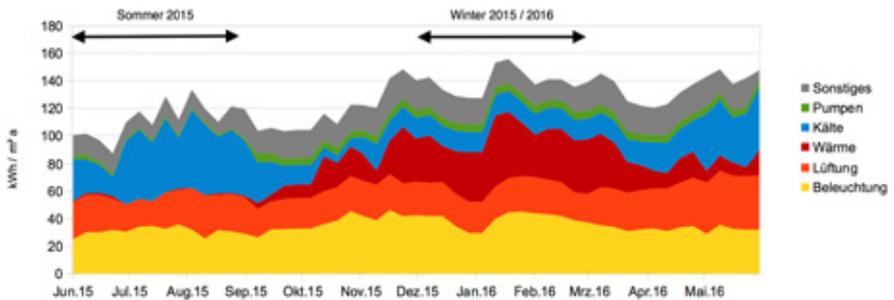


Abb. 8: Primärenergieverbrauch des Gebäudes im Jahresverlauf (vorläufiges Ergebnis)

Das Projekt wird im Rahmen eines vom BMWi [3] geförderten Forschungsprojektes der Forschungsinitiative für Energieoptimiertes Bauen (EnOB [4]) wissenschaftlich begleitet. Es werden Energieverbräuche ermittelt, Konzeptstrategien überprüft und im Gebäude Komfortuntersuchungen durchgeführt. Da das Forschungsprojekt noch nicht abgeschlossen ist, liegen nur vorläufige Ergebnisse zur Performance des sanierten Gebäudes vor.

Der Primärenergieverbrauch des Gebäudes ist tendenziell steigend (Abbildung 8). Der angestrebte Wert von unter 100 kWh pro Quadratmeter und Jahr wird bisher noch nicht erreicht. Auffällig ist der Hohe Anteil des Verbrauches für künstliche Beleuchtung.

5 Fazit

Die Sanierung des Kollegiengebäudes Mathematik am KIT führte zu einem grundlegend veränderten Gebäude. Die Gebäudequalität hat sich deutlich verändert. Das neu entstandene Atrium wird für unterschiedliche Veranstaltungen genutzt.

Hinsichtlich des Gebäudebetriebs gibt es aber Defizite. Einige Schwächen können durch eine Nachjustierung von Schwellwerten in der Gebäudetechnik behoben werden. Andere Mängel können nur mit großem Aufwand nachträglich korrigiert werden. Die Sonnensegel können das Atrium nicht vollständig verschatten. Direkte Sonnenstrahlung fällt durch Lücken zwischen den Sonnensegeln auf die Oberflächen im Atrium und in die angrenzenden Räume. Sind nicht alle Sonnensegel geschlossen wird dieser Effekt verstärkt. Besonders betroffen sind die Arbeitsplätze in den Eckbereichen. Der direkte Sonneneinfall und die hohen Leuchtdichten auf den Oberflächen im Atrium können Blendung bei der Bildschirmarbeit verursachen. An den Bildschirmarbeitsplätzen der Bibliothek ist es ähnlich.

Auch dient der Sonnenschutz gleichzeitig als Blendschutz. Wird der Sonnenschutz aktiviert, da Sonne direkt einfällt oder zu hohe Leuchtdichten in der Umgebung vorherrschen, wird es als Folge zu dunkel im Raum und das Kunstlicht wird eingeschaltet. Eingeschaltetes Kunstlicht an Sonnentagen ist auch im Mathematikgebäude kein seltenes Bild. In der Praxis nehmen Nutzer Blendung in Kauf, um auf Kunstlicht zu verzichten.



Abb. 5 : Studentische Arbeitsbereiche, sowie die Bibliothek verfügen über keinen Sonnen- oder Blendschutz



Abb 6: Der Sonnenschutz ist gleichzeitig Blendschutz und verfügt über keine Lichtlenkung. Aktivierter Sonnenschutz mit gleichzeitig eingeschaltetem Kunstlicht kann vielfach beobachtet werden

Literatur

- [1] Ingenhoven Architekten Düsseldorf: www.ingenhovenarchitects.com
- [2] Heinrich Kramer, Walter von Lom: Licht , Köln 2002, S. 98
- [3] gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Industrie (BMWi),
Förderkennzeichen : 03ET1035K
- [4] Forschungsinitiative für Energieoptimiertes Bauen (EnOB) : www.enob.info

Energetische Bewertung von Gebäuden – Einfluss des Sonnenschutzes

Prof. Dipl. Ing. Björn Schrader

*Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Zentrum für Integrale Gebäudetechnik
Technikumstrasse 21, 6048 Horw/LU, Schweiz*

Die Schweizer Norm SIA 380/4 [1] „Elektrische Energie im Hochbau, Teil Beleuchtung“ ist seit 2006 in Kraft. Die übergeordneten Ziele sind der rationelle Einsatz der Elektrizität und das zur Verfügungstellen eines Tools zur Optimierung des Elektrizitätsbedarfs während des Planungsprozesses. In den vergangenen zehn Jahren wurden die vom Planer erstellten Energienachweise mit den Energiewerten aus den realisierten Objekten in Stichproben immer wieder untersucht, um so Abweichungen im Rechenmodell zu erkennen. Das Projekt hatte das Ziel, speziell die Auswirkung der Sonnenschutzsysteme auf die Tageslichtnutzung mit Messungen in einem Referenzraum 1:1 zu untersuchen, um daraus eine Optimierung für das aktuelle Berechnungsmodell nach SIA380/4 vorzuschlagen.

Mit dem bestehenden Rechenmodell werden die Sonnenschutzsysteme zu positiv bewertet und es wird eine zu hohe Tageslichtnutzung ausgegeben, welche bei realisierten Objekten zu Abweichungen führt.

Es wurde ein um 360° drehbarer Spezialcontainer erstellt, welcher ein Referenzraum mit einer Grösse von 6 x 2,6 m und eine Höhe von 2,8 m beinhaltet. Eine Stirnseite wurde verglast und mit unterschiedlichen Standardsonnenschutzsystemen ausgerüstet. Über die Aussenbeleuchtungsstärke und die Erfassung der Beleuchtungsstärke mit einem Raumscanner im Inneren konnte die Tageslichtverteilung im Raum ermittelt werden. Zusätzlich wurden die Klimadaten bzgl. der theoretisch möglichen Tageslichtnutzung unter Berücksichtigung des thermischen Schutzes analysiert.

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Tageslichtnutzung in der SIA 380/4 bisher zu positiv bewertet wurde. Das Schliessen des aussenliegenden Sonnenschutzes aus thermischen Gründen wurde nur unzureichend berücksichtigt. Die Bewertung des Sonnenschutzes über Typ und Reflexionsgrad sind nicht ausreichend, da die Fahrstrategie einen wesentlichen Anteil auf die mögliche Tageslichtnutzung besitzt und aktuell noch nicht berücksichtigt wird.

Energy performance of buildings – Impact of sun protection

Prof. Dipl. Ing. Björn Schrader

*Lucerne University of Applied Sciences and Arts, Zentrum für Integrale Gebäudetechnik
Technikumstrasse 21, 6048 Horw/LU, Switzerland*

Lighting accounts for 13% of total electricity consumption in Switzerland. For this reason, in ongoing energy discussions lighting is consistently mentioned as a central item in measures to increase efficiency. The SIA 380/4 for lighting is established in practice for years and is being revised. The project SADLESS has the objective to support the utilization of daylight and its potential to the reduction of full load hours of electrical lighting. This has been implemented with the help from 1:1 technical measurements of light in a measurement chamber that is rotated around its own axis. The results will be entered into the new SIA 380/4 “Electric Energy in Buildings- Lighting”. In this context the selections and ratings for solar shading systems contained in SIA 380/4 will also be revised.

Energetische Bewertung von Gebäuden – Einfluss des Sonnenschutzes

Prof. Dipl. Ing. Björn Schrader

Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Zentrum für Integrale Gebäudetechnik
Technikumstrasse 21, 6048 Horw/LU, Schweiz

Zusammenfassung

Der Anteil der Beleuchtung am Schweizerischen Stromverbrauch beträgt 13%. Aus diesem Grund wird die Beleuchtung auch immer wieder in der aktuellen Energiediskussion als zentrales Element bei Effizienzsteigerungsmassnahmen genannt.

Der energetische Beleuchtungsnachweis nach SIA 380/4 ist seit Jahren in der Praxis in der Schweiz etabliert. Aktuell wird diese Norm an die aktuellen Gegebenheiten angepasst. Ein Schwerpunkt liegt dabei im Bereich der Tageslichtnutzung. Das abgeschlossene Projekt S.A.D.L.E.S.S. hatte das Ziel die einzelnen Einflussparameter des Sonnenschutzes in Bezug auf die Tageslichtnutzung zu überprüfen. Grundlage dafür bildeten 1:1 Messungen innerhalb eines drehbaren Lichtmesscontainers. Die daraus resultierenden Ergebnisse flossen in die neue SIA 387/4 (Nachfolger der SIA 380/4) ein, welche sich aktuell in der Vernehmlassung befindet.



Abb. 1: Lichtmesscontainer auf dem Campus in Horw/Luzern (Schweiz)



Abb. 2: Aussenansicht Rafflamellensonnenschutz

1 Ausgangslage – Scope

Die Schweizer Norm SIA 380/4 [1] „Elektrische Energie im Hochbau, Teil Beleuchtung“ ist seit 2006 in Kraft. Die übergeordneten Ziele sind der rationelle Einsatz der Elektrizität und das zur Verfügungstellen eines Tools zur Optimierung des Elektrizitätsbedarfs während des Planungsprozesses. Es geht primär um eine möglichst realitätsnahe Abbildung des zukünftigen Gebäudes, um den zu erwartenden Elektrizitätsbedarf abschätzen zu können.

Vergleichbare Ansätze verfolgt auch die in Bearbeitung befindliche EN 15193, jedoch bestehen hier bislang kaum praktische Erfahrung. In den vergangenen zehn Jahren wurden die vom Planer erstellten Energienachweise mit den Energiewerten aus den realisierten Objekten in Stichproben immer wieder untersucht, um so Abweichungen im Rechenmodell zu erkennen. Weiter zeigen die politischen Regulationen im Bereich der Lampen und die rasante technische Entwicklung im Bereich der Lichterzeugung (LED) auf Seite der Leistungsreduzierung bei der Beleuchtung ihre Wirkung. Dies ist auch an den eingereichten Beleuchtungsnachweisen bei den Zertifizierungsstellen feststellbar. Die Anzahl an Nachweisen mit Projektwerten weit unterhalb des vorgegeben Minergiewertes bzw. Zielwertes (theoretischer Werte, welcher erreicht werden kann, wenn die optimalsten Voraussetzungen bei dem Objekt vorliegen). Dieser Sachverhalt ist ein Indiz dafür, dass das Berechnungsmodell die Leistungsfähigkeit heutiger Beleuchtungslösungen nur unzureichend abdeckt.

Neben der Leistungsreduzierung basiert das Modell zur Reduzierung des Energiebedarfs auf der Senkung der Volllaststunden / Einschaltzeiten der Anlage. Diese Reduzierung soll durch die Verwendung von Präsenzmeldern und die Nutzung des Tageslichtes realisiert werden. Prüfungen von realisierten Gebäuden haben jedoch gerade in diesem Bereich eine Diskrepanz zwischen errechnetem und realem Elektrizitätsverbrauch aufgedeckt. Die Gründe sind vielfältig: Sensorik, Inbetriebsetzung, Rechenmodell etc. Im Jahr 2011 wurden in diesem Zusammenhang auf dem Markt verwendete Präsenzmelder geprüft [2]. Die Prüfung zeigte Widersprüche zwischen deklarierten und in den Messungen ermittelten Werten für den Erfassungsbereich auf.

Weiterhin bestehen Abweichungen, welche die Tageslichtnutzung betreffen. Das Berechnungsmodell basiert hierbei auf lichttechnischen Simulationen, welche unter idealisierten Bedingungen und Annahmen erfolgen. Aus diesen Simulationen hat die Wahl des Sonnenschutzes im Berechnungsmodell einen grossen Einfluss auf die Reduzierung der Volllaststunden erhalten. Beim Nachweis stehen jedoch nur drei mögliche Varianten zur Auswahl, welche unzureichend spezifiziert sind. Dies hat in der Vergangenheit zu Diskussionen im Nachweisverfahren geführt. In sehr vielen Projekten wird jedoch nicht auf tageslichtoptimierte Systeme zurückgegriffen, sondern auf Standardlösungen. Diese sind primär auf die Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes ausgelegt und weniger auf eine optimale Tageslichtnutzung. Durch die starke Marktdurchdringung kommt diesen Standardsystemen (Rafflamellenstoren, Stoffmarkisen etc.) und deren Beeinflussungsgrössen eine hohe Bedeutung zu. Innerhalb des Projektes S.A.D.L.E.S.S. wurden diese Zusammenhänge untersucht. Das Projekt wurde durch das Bundesamt für Energie (BFE) und durch das Amt für Hochbauten der Stadt Zürich finanziert. Projektpartner waren die Siemens Schweiz AG und Schenker Storen AG. Das Projekt hatte das Ziel, speziell die Auswirkung der Sonnenschutzsysteme auf die Tageslichtnutzung mit Messungen in einem Referenzraum 1:1 zu untersuchen, um daraus eine Optimierung für das Berechnungsmodell nach SIA380/4 vorzuschlagen.

1.1 Referenzraum Lichtmesscontainer

Der Referenzraum hatte eine Grösse von 6 x 2,6 m und eine Höhe von 2,8 m. Eine Fassadenstirnseite war vollverglast. Für die Messungen wurden eine Brüstung und ein Sturz eingefügt, um eine praxisnahe Situation zu erhalten. Die Raumboflächen wurden auf die Reflexionsgrade (Decke 70%, Wand 50%, Boden 20%) angepasst. Der Messraum befin-

det sich in einem Spezialcontainer, ist 360° drehbar gelagert und steht auf dem Campus der Hochschule Luzern - Technik & Architektur in Horw/Luzern.

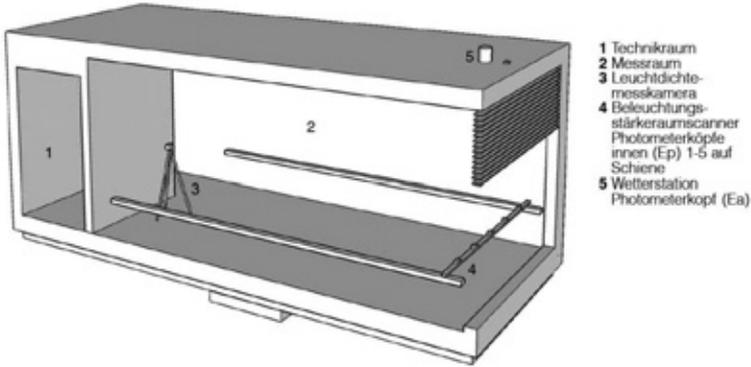


Abb. 3: 3D Prinzipskizze des Lichtmesscontainers mit Messeinrichtung und Raumaufteilung

2 Vorgehen – Methods

2.1 Systemauswahl

Es wurden sieben unterschiedliche Sonnenschutzsysteme ausgewählt. Zur Auswahl kamen Systeme auf Basis von Rafflamellenstoren und vertikalen Stoffstoren. Dabei war ein wichtiges Auswahlkriterium die hohe Marktrelevanz. Weiter wurden die Aufgaben des innenliegenden bzw. aussenliegenden Sonnenschutzes auf ihre Eignung hinterfragt. Dabei wurde nur der Schutz vor thermische Solarstrahlung als primäre Aufgabe ausgemacht, da alle anderen untergeordnete Aufgaben darstellen bzw. diese durch andere Systeme, welche auch innenliegend verbaut sein können, erfüllt werden können.

Tab. 1: Aufgaben des Sonnenschutzes

Aufgabe	Art der Aufgabe	Eignung innenliegend	Eignung aussenliegend
Schutz vor thermischer Solarstrahlung	primär	-	++
Kälteschutz in der Nacht	sekundär	-	++
Blendschutz	sekundär	+	+
Verdunkelung	sekundär	+	+
Sichtschutz (von aussen nach innen bzw. von innen nach aussen)	sekundär	+	+
Vandalenschutz (Schutz vor Vandalismus oder Sicherheit)	sekundär	-	o

++ sehr gut, + gut,
o befriedigend, - mangelhaft

2.2 Analyse

Im zweiten Schritt wurde das Berechnungsmodell nach SIA 380/4 und die darin enthaltenen Korrekturfaktoren analysiert.

Zudem wurden die Klimadaten für drei Standorte in der Schweiz in Hinblick auf die Verfügbarkeit des Tageslichtes analysiert. Weiter wurden diese Daten für die Abschätzung der Zeiten verwendet, in denen der Sonnenschutz aus thermischen Gründen geschlossen sein muss. Hierfür wurden die Vorgaben gem. SIA 180/2 verwendet.

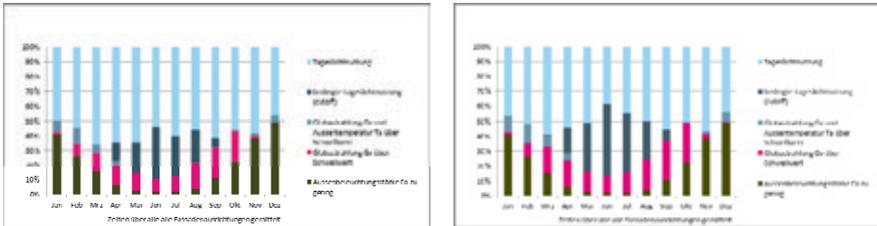


Abb. 4: Theoretisch mögliche Tageslichtnutzung ($G_v = 150 \text{ W/m}^2, G_v = 200 \text{ W/m}^2$) (SIA DIY ZHKloten dry warm)

2.3 Messungen

Der Messablauf wurde nach einigen Testreihen bzgl. Genauigkeit und Zeit optimiert. Voraussetzung für die Messungen waren eine möglichst stabile und gleichbleibende Himmelsbedeckung / Aussenbeleuchtungsstärke. Die Messungen erfolgten bei klarem Himmel mit direkter Sonneneinstrahlung auf die Fassade.

Zur Messung wurde ein Raumbelichtungsscanner entwickelt, welcher die Beleuchtungsstärken im Raum mit fünf Photometerköpfen erfasst.

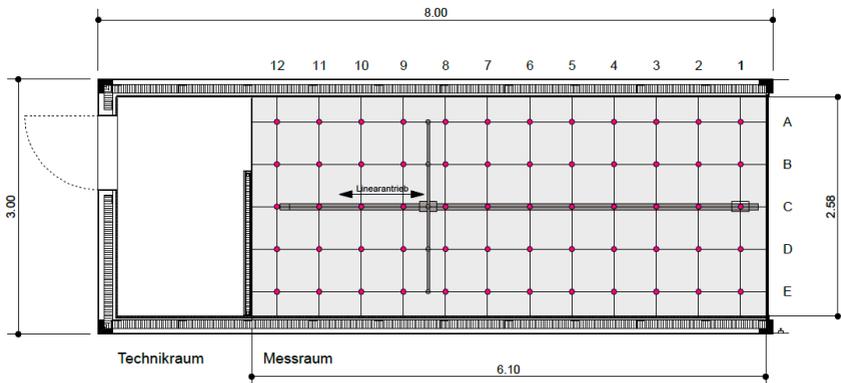


Abb. 5: Grundriss mit Beleuchtungsstärkescanner und Messraster

Bei der vorhandenen Raumgeometrie betrug das Messraster $50 \times 50 \text{ cm}$. Zeitgleich wurde die Aussenbeleuchtungsstärke auf dem Dach des Messcontainers gemessen. Alle Messwerte wurden in einer Datenbank gespeichert und anschliessend analysiert.

3 Resultate – Results

Aus der Analyse der Klimadaten (vgl. Abb3) kann die Aufteilung der Zeiten entnommen werden, welche für das Nutzen des Tageslichtes a) ohne Einschränkung (33% + 6%), gar nicht (18% + 24%) oder bedingt möglich sind. Der Anteil einer bedingten Nutzung entspricht bei einem Rafflamellensystem einem geschlossenen Sonnenschutzsystem bei dem die Lamellenwinkel in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe variiert werden können ohne direkte Strahlung in den Innenraum zu lassen. Hier hat die Wahl des Sonnenschutzes nur einen geringen Einfluss und beträgt 19%.

Die Messungen an den Standardrafflamellenstoren (Lamelle 90mm, Reflexionsgrad 50%) zeigte die begrenzte Genauigkeit bei der Einstellung des Sonnenschutzsystems. Für eine exakte Lamellenwinkeleinstellung, welche bei der Integration einer Nachführung der Lamellen mit dem Sonnenverlauf notwendig ist, ist ein System mit Rückkopplung (Messung des aktuellen Lamellenwinkels an der Lamelle) bzw. die Verwendung von Schrittmotoren notwendig, da die systembedingten Abweichungen erheblich sind. Gute Bedingungen bzw. die geforderten Beleuchtungsstärken im fensternahen Bereich werden sehr schnell erfüllt bzw. übertroffen. Im Rauminnen haben leichte Veränderung der Lamellenstellung sehr starke Auswirkungen auf die Messergebnisse. Der mittlere Tageslichtquotient für den ganzen Raum ist nur unzureichend für die Beurteilung der Tageslichtnutzung geeignet. Es sollte vielmehr ein minimaler Tageslichtquotient verwendet werden, welcher zusätzlich nach Raumtiefe gewichtet wird.

Weiterhin wird zumeist der Sonnenschutz primär zur Vermeidung von Überhitzung des Gebäudes heruntergefahren. Die Analysen legen nahe, dass bei der Berücksichtigung aller Vorgaben der SIA 382/1 [4], die Reduzierung der Volllaststunden durch Tageslicht niedriger ausfallen, als bis dahin angenommen, da diese Aspekte noch nicht in der SIA 380/4 abgebildet wurden .

Damit ist die Güte des Sonnenschutzsystems als alleiniges Kriterium nicht ausreichend. Es wird dringend empfohlen einen weiteren Korrekturfaktor für die Fahrstrategie in die SIA 380/4 zu integrieren, der auch Parameter wie die Globalstrahlung einbezieht.

4 Diskussion – Discussion

Die Durchführung der Testreihen zeigte, dass eine intensive und gründliche Inbetriebnahme für ein optimal funktionierendes System zwingend notwendig ist. Diverse Parameter, welche in Simulationen leicht variiert werden können, sind in der Praxis kaum beeinflussbar bzw. vom Nutzer nicht akzeptiert. Neben einer integralen Planung ist die Wirksamkeit der Fahrstrategie und die Nutzerakzeptanz nach der Inbetriebnahme zu prüfen.

Die Basis für eine integrale Planung ist aber auch, dass sich die Vorgaben für Beleuchtung und thermischen Sonnenschutz nicht gegenseitig widersprechen.

5 Ausblick – Perspectives

Beim Sonnenschutz handelt es sich um ein komplexes System, welchem in der Zukunft mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Dies betrifft alle Ebenen: von der Entwicklung der Produkte, über die Planung, Installation, Inbetriebnahme bis hin zum Betrieb.

Im ersten Schritt ist die Fahrstrategie für den Sonnenschutz in der SIA 380/4 (neu 387/4) über einen Korrekturfaktor zu integrieren. Im zweiten Schritt gilt es integrale Fahrstrate-

gien mit Hilfe von Simulationen und weiteren 1:1 Messungen zu prüfen und weiter zu entwickeln. Die Strategien sollten dabei wesentlich selektiver auf die aktuellen Umgebungsbedingungen reagieren und die verschiedenen Anforderungen der jeweiligen Gewerke berücksichtigen.

Weitere Aspekte wie der Erhalt des Aussenbezugs trotz geschlossenen Sonnenschutzes sowie Eingriffsmöglichkeiten durch den Nutzer sind in die Entwicklung der Strategien einzubeziehen.

Studien die nachweisen, dass das Verwenden von innenliegenden Systemen für die Blendungsvermeidung und aussenliegenden Systemen zum thermischen Schutz sowohl eine höhere Nutzerzufriedenheit und einen tieferen Energieverbrauch ermöglichen, sind weitere Forschungsaspekte.

Literatur

- [1] SIA. (2006). SIA 380/4 Elektrische Energie im Hochbau (Auflage, Bd. Norm SIA). Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein.
- [2] Gasser, S. (2013). Präsenzmelder im Qualitätstest (Messprojekt und Merkblatt für Planende). Zürich: SIA, BFE, AHB der Stadt Zürich.
- [3] Weber, A., & Simalé, K. (2014). sia 380/4 Tageslichtnutzung. Zürich: SIA, Amstein + Walthert AG.
- [4] SIA 382-1 Lüftungs- und Klimaanlage - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen. (2014). SNV-SIA.

Praxisbericht über die lichttechnische Planung mit Sonnenschutz- und Tageslichtlenkssystemen

Dipl.-Ing. Simon Wössner 1), Eike Budde 1), Dr.-Ing. Jan de Boer 1), Dipl.-Ing. Daniel Witzel 2), Dipl.- Ing. Marco Seegers 2), Dipl.-Ing. Dieter Polle 2)

1) Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart , 2) DIAL GmbH, Lüdenscheid

Problemstellung

Bislang fehlte es in der lichttechnischen Planung von Verschattungs- und Tageslichtlenkssystemen an praxistauglichen und einfach anwendbaren Berechnungsverfahren. Das Potential moderner Fassadentechnik konnte nicht im vollen Umfang genutzt werden. 2015 wurde ein von der deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördertes Verbund Forschungsvorhaben von Fraunhofer IBP, DIAL GmbH, Hochschule Rosenheim, Ratec Licht und zahlreichen Herstellern von Fassadensystemen abgeschlossen. Die Ergebnisse stehen nun durch die Umsetzung in DIALux evo 6 allen Planern auf der Welt zur Verfügung.

Ziel

Der Vortrag beschreibt einen neuartigen Planungsablauf, in dem Lichtplaner von nun an ganz einfach reale Daten von Verschattungs- und Tageslichtlenkssystemen einsetzen und aus den Berechnungsergebnissen wichtige lichtplanerische Schlüsse ziehen können. Außerdem beschreibt er Stärken und Schwächen der entwickelten Lösung.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

In der kostenlos verfügbaren Lichtplanungssoftware DIALux können neben den Leuchten beliebiger Hersteller seit März 2016 auch Verschattungs- und Tageslichtlenkssysteme simuliert werden. Planer integrieren mit wenig Aufwand die Tageslichtplanung unter Berücksichtigung von Verschattungssystemen, lichtlenkenden Dachoberlichtern und Tageslichtlenktechnik in ihren Planungsprozess. Erstmals kann Tageslicht, wie es wirklich in der Praxis zu erwarten ist, lichtplanerisch berücksichtigt werden. Dieser Planungsprozess basiert nicht auf theoretischen Annahmen, sondern auf Basis realer physikalischer Eigenschaften der am Markt befindlichen Produkte. Es werden alle relevanten lichtplanerischen Werte ermittelt und dargestellt und natürlich auch die die Lichtwirkung der Systeme im 3D Rendering, Raytracing oder Falschfarben visualisiert.

Diese Möglichkeit wurde dem Markt gerade erst zur Verfügung gestellt. In diesem Vortrag wollen wir ein erstes Resümee ziehen: Welche Erfahrungen haben Planer und Hersteller mit der Software bisher gemacht, welche Daten stehen dem Planer zur Verfügung?

Realisierungsgrad

Die Umsetzung ist zur L&B 2016 in Frankfurt für die Allgemeinheit verfügbar. Planer und Hersteller von Verschattungs- und Tageslichtlenkssystemen werden bis zur Konferenz erste Planungserfahrung gesammelt und an uns gemeldet haben.

Practice report about lighting design with blinds and light guidance systems

Dipl.-Ing. Simon Wössner 1), Eike Budde 1), Dr.-Ing. Jan de Boer 1), Dipl.-Ing. Daniel Witzel 2), Dipl.- Inf. Marco Seegers 2), Dipl.-Ing. Dieter Polle 2)

1) Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart , 2) DIAL GmbH, Lüdenscheid

Issue

Until now, it was not possible to take shading and daylight control systems with convenient and simple to use calculation methods into account. It was not possible to use the full potential of modern facade technology. The German Federal Environmental Foundation commissioned a research project to Fraunhofer IBP, DIAL GmbH, Rosenheim University, Ratec light and numerous manufacturers of facade systems in 2015. The results are now available for all lighting designers through the implementation in DIALux evo 6.

Aim

The paper describes a new planning process, where lighting designers use real data of shading and daylight control systems. They can draw important conclusions from the calculation results in day-by-day work. It also describes the strengths and weaknesses of the developed solution.

Description of the innovation/»best practice«

Since March 2016, the free lighting design software DIALux simulates shading and daylight control systems in addition to artificial lighting. Planners integrate with little effort the daylight planning, taking shading systems, light directing skylights and daylight control systems into account. For the first time light planning considers daylight as it is really used in practice. This planning process uses not theoretical assumptions, but real physical properties of the products on the market. The system determines all relevant lighting design values and visualizes the lighting effect of the systems in 3D rendering, ray tracing or false colours.

This possibility is available to the market for a short time. In this presentation we want to draw a first summary: What experiences did planners and manufacturers made with the software till now, which data is available for the planner?

Level of realization

The feature is available since L&B 2016 in Frankfurt. Planner and producer of shading and daylight control systems will have gained initial planning experiences.

Praxisbericht über die lichttechnische Planung mit Sonnenschutz- und Tageslichtlenkssystemen

Dipl.-Ing. Simon Wössner 1), Eike Budde 1), Dr.-Ing. Jan de Boer 1), Dipl.-Ing. Daniel Witzel 2), Dipl.-Inf. Marco Seegers 2), Dipl.-Ing. Dieter Polle 2)

1) Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, 2) DIAL GmbH, Lüdenscheid

Zusammenfassung

Das Potential moderner Fassadentechnik konnte bislang nicht im vollen Umfang genutzt werden, da es an passenden Planungswerkzeugen fehlte. In der kostenlos verfügbaren Lichtplanungssoftware DIALux können seit März 2016 Sonnenschutz- und Tageslichtlenkssysteme in Innenräumen simuliert werden. Das Poster zeigt den Planungsablauf, in dem Lichtplaner reale Daten von Verschattungs- und Tageslichtlenkssystemen einsetzen und aus den Berechnungsergebnissen wichtige lichtplanerische Schlüsse ziehen können. Außerdem zeigt es Stärken und Schwächen der entwickelten Lösung.

1 Einleitung

Bislang fehlte es in der lichttechnischen Planung von Sonnenschutz- und Tageslichtlenkssystemen an praxistauglichen, einfach anwendbaren Berechnungsverfahren und Werkzeugen. Das Potential moderner Fassadentechnik konnte nicht im vollen Umfang genutzt werden. 2015 wurde ein von der deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördertes Verbund Forschungsvorhaben abgeschlossen. Die Ergebnisse stehen seit März 2016 durch die Umsetzung in der kostenlosen Lichtberechnungssoftware DIALux evo 6 allen Planern auf der Welt zur Verfügung.

DIALux simuliert neben dem Kunstlicht auch Sonnenschutz- und Tageslichtlenkssysteme in Innenräumen. Planer integrieren mit wenig Aufwand die Tageslichtplanung unter Berücksichtigung von Verschattungssystemen, lichtlenkenden Dachoberlichtern und Tageslichtlenktechnik in ihren Planungsprozess. Erstmals kann Tageslicht, wie es wirklich in der Praxis zu erwarten ist, lichtplanerisch berücksichtigt werden. Dieser Planungsprozess basiert nicht auf theoretischen Annahmen, sondern auf Basis realer physikalischer Eigenschaften der am Markt befindlichen Produkte. Es werden alle relevanten lichtplanerischen Werte ermittelt und die Lichtwirkung der Systeme im 3D Rendering, Raytracing oder Falschfarben visualisiert.

Das Plakat beschreibt einen neuartigen Planungsablauf, in dem Lichtplaner mit wenig Aufwand Verschattungs- und Tageslichtlenkssysteme einsetzen und aus den Berechnungsergebnissen wichtige lichtplanerische Schlüsse ziehen. Außerdem zeigt es Stärken und Schwächen der entwickelten Lösung: Welche Erfahrungen haben Planer und Hersteller mit der Software bisher gemacht, welche Daten stehen dem Planer zur Verfügung?

2 Projekt

Zwischen 2013 und 2015 wurde das von der deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Verbund Forschungsvorhaben von Fraunhofer IBP, DIAL GmbH, Hochschule Rosenheim, Ratec Licht und zahlreichen Herstellern von Fassadensystemen (s.Abb.1) durchgeführt. Neben der Erweiterung einer beim Fraunhofer IBP bestehenden Messeinrichtung zur orts aufgelösten Aufzeichnung der Transmissions- und Reflexionseigenschaften von Fassadenkomponenten, entwickelte Fraunhofer IBP geeignete Algorithmen zur Berechnung der Lichtausbreitung von außen durch Fassadensysteme. Zeitgleich implementierte DIAL die für die Tageslichtberechnung notwendige Infrastruktur in DIALux und erarbeitete geeignete Nutzerführungen und Bedienkonzepte. Von vier der beteiligten Unternehmen stehen bereits heute Planerdaten in Form von elektronischer Katalogen zur Verfügung.



Abb. 1: Beteiligte Industriepartner

3 Praxis

3.1 Datenfluss

Die am Fraunhofer IBP gemessenen Daten (Messdaten und Steuerdaten) werden aufbereitet und können direkt als ODLS Dateiformat in Lichtplanungsprogrammen verwendet werden. Alternativ erweitert der Hersteller die Daten um marketingrelevante Informationen wie Bilder und Beschreibungstexte und stellt sie dem Planer als elektronischen Katalog zur Verfügung. Aus den Planungsdaten berechnet die Software unter Berücksichtigung von Lage, Sonnenstand und Himmelsmodell Lichtstärkeverteilungskurven.

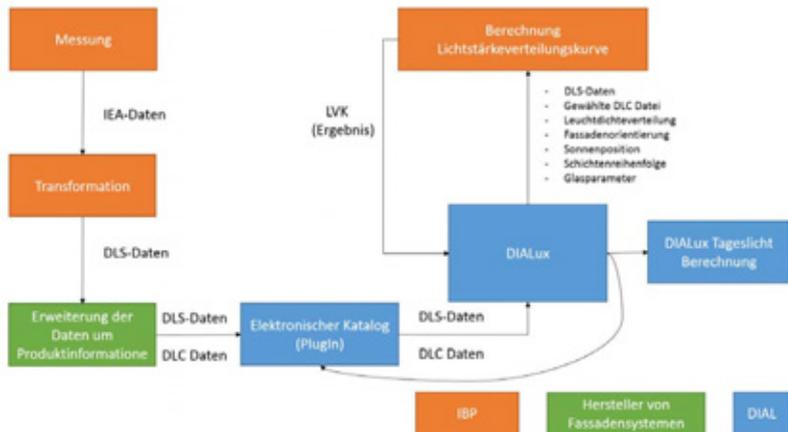


Abb. 2: Datenfluss

Die Berechnung des Tageslichts erfolgt äquivalent zur Kunstlichtberechnung. Da es sich bei Fassadensystemen nicht um punktförmige Lichtquellen handelt, berechnet die Software verschiedene Lichtstärkeverteilungskurven unter Berücksichtigung der Lage und der Verschattung durch Nebengebäude und verteilt diese auf den Fensterflächen.

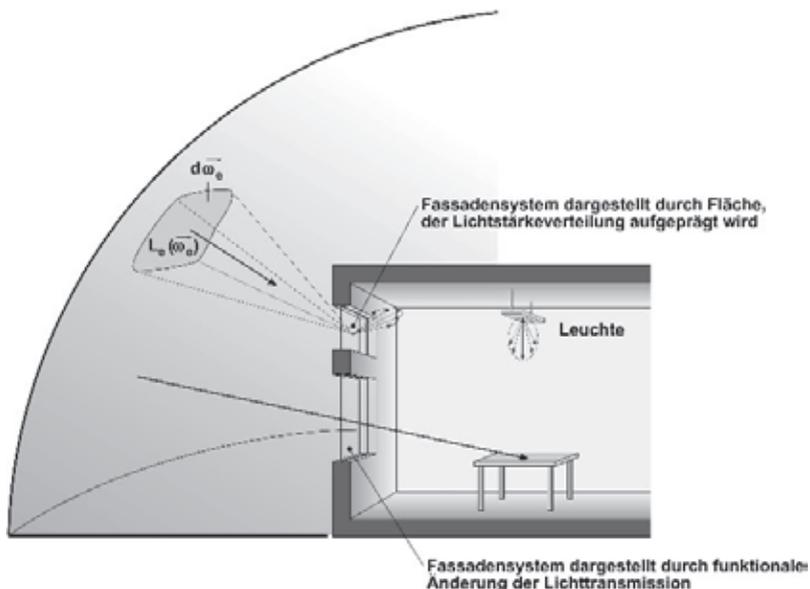


Abb. 3: Berechnungskonzept

3.2 Planungsbeispiel Klassenzimmer

In diesem Klassenzimmer wurde das allgemeine Tageslicht und der direkte Sonneneinfall simuliert und die Wirkung verschiedener tageslichtlenkender Systeme verglichen.

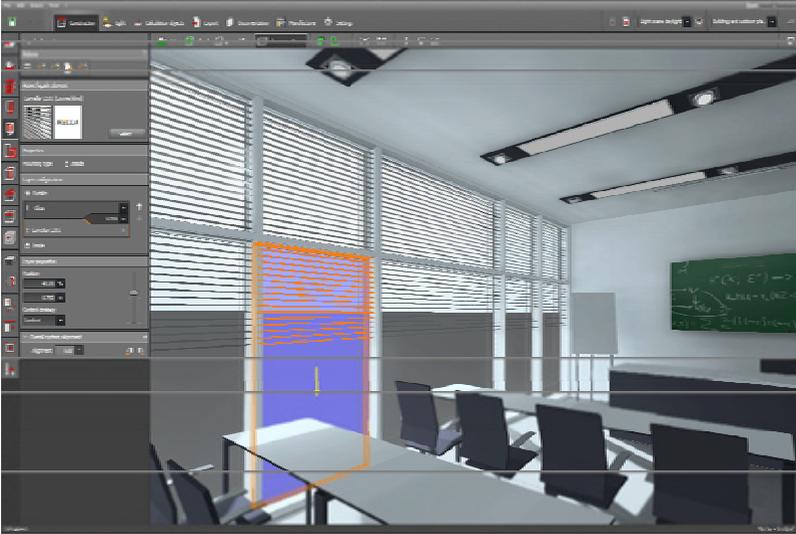


Abb. 4: Planungsbeispiel Klassenzimmer – Konfiguration Fassadensystem



Abb. 5: Planungsbeispiel Klassenzimmer – Wirkung direktes Sonnenlicht

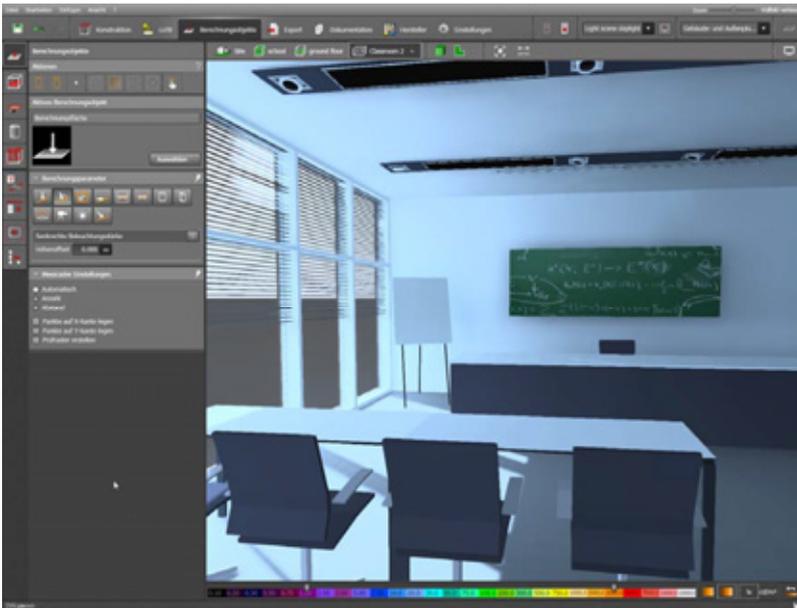


Abb. 6: Planungsbeispiel Klassenzimmer – Simulation Tageslicht

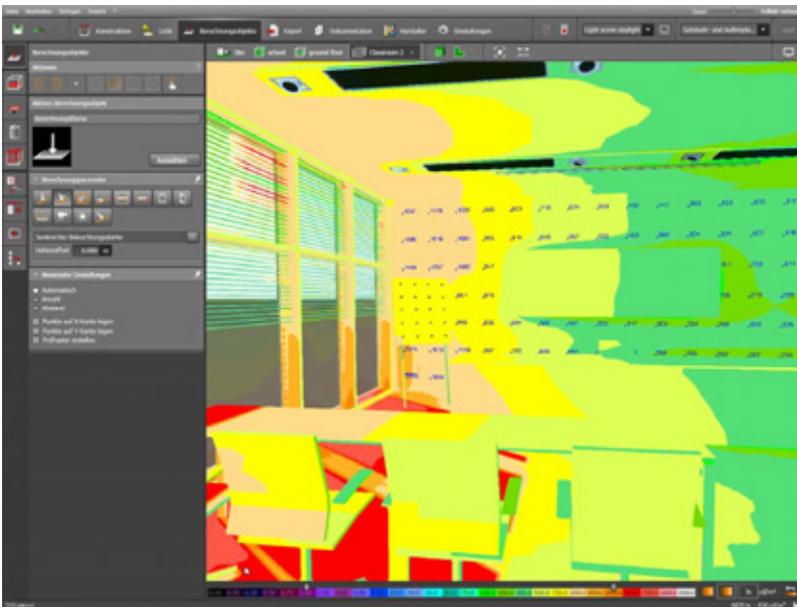
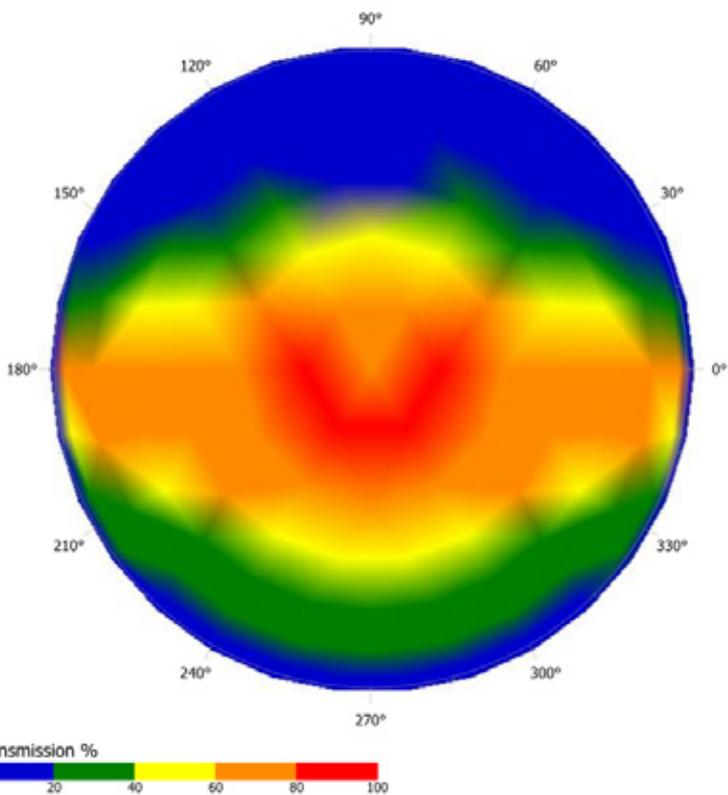


Abb. 7: Planungsbeispiel Klassenzimmer – Werte und Falschfarbendarstellung



Regelstrategie: AR63_S_grau_5

Abb. 8: Hemisphärisches Transmissionsdiagramm - Produktinformation

Praktische Anwendbarkeit der spektralen Himmelsmodelle im städtischen Planungsprozess

*Aicha Diakite, Martine Knoop, Sebastian Bremer, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik*

Problemstellung

Heutige Städte unterliegen einem dynamischen räumlichen und sozialen Wandel. Der rasche demografische Wandel und die zunehmende globale Urbanisierung führen zu neuen Rahmenbedingungen in der Stadtplanung. Tageslichtmasterpläne bieten die Möglichkeit, den Platzmangel mit anspruchsvollen architektonischen Konzepten durch kontextbezogene und Mensch zentrierte Lösungen anzugehen. Dieses städtebauliche Entwurfsverfahren bietet einen territorialen Ansatz, um den Neuentwurf und/oder die Sanierung von bestehenden Stadtteilen auf Basis von Tageslichtverhältnissen zu koordinieren. Die Implementierung der farbmetrischen Information in Form von spektralen Himmelsmodellen würde zusätzlich die Einbeziehung der nicht-visuellen Aspekte in die Tageslichtplanung unterstützen. Es soll herausgefunden werden, welchen Einfluss die einzelnen Himmelsbereiche auf die spektrale Tageslichtsituation auf der Fassade im Zentrum vom Ballungsraum Berlin in Abhängigkeit von Himmelstyp, Verbauungsgrad, Reflexionsgrad der gegenüber liegenden Verbauung, Jahreszeit, Sonnenposition und Orientierung des Gebäudes haben.

Ziel

Diese Arbeit zielt auf die Entwicklung eines computerbasierten parametrischen Tools ab, um die Tageslichtplanung in der urbanen Stadtstruktur gleichzeitig für mehrere Gebäude zu optimieren. Den Schwerpunkt bildet dabei die praktische Anwendbarkeit der spektralen Himmelsmodelle im städtischen Planungsprozess.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Das Planungstool soll eine bessere Bewertung der Auswirkungen von mit Hilfe von Tageslicht gestalteten urbanen Räumen ermöglichen indem der spektrale Dynamikbereich für nicht-visuelle Effekte des Tageslichts aufgezeigt wird. Zurzeit ist bei der Betrachtung der Tageslicht Masterplanung als eine nachhaltige Stadtplanungsstrategie, die Energieoptimierung in der Regel der Hauptzweck und die einzige Richtlinie. Werden jedoch die biologischen, psychologischen und physiologischen Bedürfnisse der Bürger betrachtet, so zeigt sich, dass Farbinformation für die Tageslichtplanung eine wesentliche Rolle spielen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die spektralen Informationen des Tageslichts neben der Beleuchtungsstärke zu berücksichtigen.

Realisierungsgrad

Das Tool nutzt die Daten, die vom FG Lichttechnik an der TU Berlin durchgeführt werden und baut darauf auf. Die implementierten spektralen Himmelsmodelle (Eingangsgrößen) werden anhand der orts aufgelösten spektralen Messungen entwickelt. Die für die urbane Tageslichtplanung relevanten Leistungskriterien (Ausgangsgrößen) und Entwurfsparameter (Kontrollgrößen) wurden anhand von einer Literaturrecherche und Fallstudien ermittelt. Die Arbeit wird in Rahmen von dem BMBF Projekt „Tageslicht in Gebäuden“ ausgeführt und befindet sich in der Abschlussphase.

Practical Applicability of Spectral Sky Models in the Urban Planning Process

*Aicha Diakite, Martine Knoop, Sebastian Bremer, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik*

Issue

Today's cities are subject to dynamic spatial and social change. This rapid demographic change and increasing global urbanization cause new framework conditions for urban planning. To minimize the environmental burden and improve the quality of life in the more and more dense city texture, we need to build in a sustainable, durable and reasonable way. Daylighting master plans provide an opportunity to tackle the lack of space with sophisticated architectural concepts and with in-context human-centered solutions. Moreover, this urban design method offers a large-scale approach to coordinate the design and/or retrofit of existing neighbourhoods based on natural light conditions. The implementation of colorimetric information of the daylight would support the inclusion of non-visual aspects in daylighting design. This work examines what influence individual sky patches have on the daylight situation on the façade predicated on certain conditions as: sky type, obstruction, reflectance from the build environment, season, sun position and orientation.

Aim

This work aims at developing a computer-based parametric tool to optimize the daylight planning in urban texture for multiple buildings based on spectral sky models. The main emphasis thereby is the practical applicability of the sky models in an urban planning process. The implementation of the colorimetric information supports the inclusion of non-visual aspects in daylight design.

Description of the innovation/»best practice«

This planning tool allows a better impact assessment of designing urban spaces with daylight by outlining the dynamic range for non-visual effects of daylight based on spectral sky models. Currently in the consideration of daylighting master planning as a sustainable urban design strategy, energy optimization is typically the only guideline and main purpose. Yet, considering biological, psychological and physiological needs of the citizens, the performance criteria indicate that colorimetric characteristics play an essential role. Hence the need to factor in the spectral information of daylight, next to the illuminance level and the emphasis on the interdependence between the performance criteria, in order to realize healthy and sustainable urban environments.

Level of realization

The tool builds up on the spectral data measurements (input variable) carried out by the Department of Lighting Technology at the Technical University of Berlin. The relevant performance criteria (output variable) and design parameters (control variable) for the program were determined based on literature survey and case studies and will be prioritized in a scale model study. The implemented spectral sky models are based on the spatially resolved spectral power distribution measurements.

Praktische Anwendbarkeit der spektralen Himmelsmodelle im städtischen Planungsprozess

*Aicha Diakite, Martine Knoop, Sebastian Bremer, Stephan Völker
Technische Universität Berlin
FG Lichttechnik, Sekr. 6, Einsteinufer 19, 10587 Berlin*

Zusammenfassung

Derzeit werden in der Beleuchtungsplanung mit Tageslicht lediglich die Leuchtdichteverteilung und eine überschlägige Farbtemperatur von 6500 K angenommen. Um eine Optimierung der Tageslichtnutzung in Gebäuden zu gewährleisten und die Einbeziehung der nicht-visuellen Aspekte in die Tageslichtplanung zu unterstützen, sind zusätzliche Informationen zur zeitlichen und örtlichen Farbverteilung des Himmels erforderlich. In dieser Arbeit wird daher angestrebt, die Beschreibung des Tageslichtangebotes um spektrale Tageslichtinformationen zu erweitern, indem spektrale Himmelsmodelle entwickelt werden. Zudem soll ermittelt werden, welchen Einfluss die einzelnen Himmelsbereiche auf die spektrale Tageslichtsituation auf der Fassade im Zentrum des Ballungsraums Berlin in Abhängigkeit von Himmelstyp, Verbauungsgrad, Reflexionsgrad der gegenüber liegenden Verbauung, Jahreszeit, Sonnenposition und Orientierung des Gebäudes haben.

1 Einleitung

Der rasche demografische Wandel und die zunehmende globale Urbanisierung führen zu neuen Rahmenbedingungen in der Stadtplanung. Tageslichtmasterpläne bieten die Möglichkeit, den Platzmangel mit anspruchsvollen architektonischen Konzepten durch kontextbezogene und Mensch-zentrierte Tageslichtlösungen anzugehen. Dieses städtebauliche Entwurfsverfahren bietet einen territorialen Ansatz, um den Neuentwurf und/oder die Sanierung von bestehenden Stadtteilen auf Basis von Tageslichtverhältnissen zu koordinieren /1/. Die Implementierung von farbmetrischen Informationen in Form von spektralen Himmelsmodellen würde zusätzlich die Einbeziehung der nicht-visuellen Aspekte in die Tageslichtplanung unterstützen. Durch die verbesserte Anpassung an die wahrnehmungsphysiologischen und kognitiven Bedürfnisse des Menschen kann eine höhere Nutzerakzeptanz erreicht werden.

Neue Lichtquellen (LED) ermöglichen bereits eine energetisch optimierte Anpassung des Lichtniveaus und eine Abstimmung der Farbtemperatur der künstlichen Beleuchtung auf die Tageslichtsituation. Derzeit werden in der Beleuchtungsplanung mit Tageslicht jedoch lediglich die Leuchtdichteverteilung und eine überschlägige Farbtemperatur von 6500K angenommen. Um eine Optimierung der Tageslichtnutzung in Gebäuden und die gewünschte Abstimmung mit der künstlichen Beleuchtung zu gewährleisten, sind demzufolge zusätzliche Charakteristika zur zeitlichen und örtlichen Farbverteilung des Himmels analog zur Himmelsleuchtdichteverteilung der Tageslichtquelle /2//3/ von entscheidender Bedeutung.

Im Rahmen der Doktorarbeit zum Thema „Tageslicht-Masterplanung als neue nachhaltige Stadtplanungsstrategie“ wurden anhand einer umfassenden Literaturrecherche die relevanten Parameter für die Planung mit Tageslicht im urbanen Raum identifiziert:

- | | |
|--|--|
| <p>(1) Vorhandene Tageslichtbedingungen</p> <ul style="list-style-type: none"> · Jahreszeit · Sonnenposition · Standort · (dominante) Himmelstyp(en) | <p>(2) Eigenschaften der Verbauung</p> <ul style="list-style-type: none"> · Orientierung des Gebäudes · Verbauungsgrad und · Reflexionsfaktor der Verbauung |
|--|--|

Die Literaturrecherche führte zur einer Modellbildung, in der die Eingangsgrößen (spektrale- und lichttechnische Eigenschaften), Kontrollgrößen (Entwurfsparameter) und Ausgangsgrößen (Leistungskriterien: visuelle, nicht-visuelle und energetische Aspekte) definiert wurden /1/.

In dem Forschungsprojekt wird angestrebt, die Beschreibung des Tageslichtangebotes um spektrale Tageslichtinformationen zu erweitern, indem spektrale Himmelsmodelle analog zu den Leuchtdichtehimmelsmodellen entwickelt werden. Zudem soll herausgefunden werden, welchen Einfluss die einzelnen Himmelsbereiche auf die Tageslichtsituation auf der Fassade im Zentrum des Ballungsraums Berlin in Abhängigkeit von Himmelstyp (1-15), Verbauungsgrad (0 % - 25 % - 50 % - 75 % - 100 %), Reflexionsgrad der gegenüber liegenden Verbauung (0,2), Jahreszeit (Sommer, Winter), Sonnenposition und Orientierung des Gebäudes (N, O, S, W) haben. Die Herangehensweise für die Teilprojekte „Vorhandene Tageslichtbedingungen“ und „Eigenschaften der Verbauung“ werden nachfolgende beschrieben.

2 Spektrale und lichttechnische Bestimmung des Tageslichtangebotes

2.1 Rechenmodell zur Bestimmung der Farbverteilung für verschiedene Himmelstypen

Seit Oktober 2014 werden die spektralen Eigenschaften von 145 Himmelsbereichen mit dem Sky-Scanner der TU Berlin erfasst /4/. Im ersten Schritt wird untersucht, ob eine räumlich aufgelöste spektrale Verteilung (Farbverteilung) von Tageslicht analog zu der Leuchtdichteverteilung von Himmelstypen nach ISO/CIE Standard /2/ beschrieben werden kann /5/. Hierfür wurde ein Programm zur Bestimmung der Farbverteilung für verschiedene Himmelstypen entwickelt. Unter Zuhilfenahme der gemessenen spektralen Verteilung werden die Leuchtdichte, der Farbort, die ähnlichste Farbtemperatur und der Himmelstyp bestimmt. Die Himmelstypbestimmung erfolgt nach Kobav et al. /6/. Die Leuchtdichte und der Farbort der Himmelsbereiche werden aus der gemessenen spektralen Farbverteilung der Bereiche berechnet. Die ähnlichste Farbtemperatur wird nach Robertson /7/ bestimmt.

2.2 Bestimmung der dominanten Himmelstypen

Aufbauend auf dem Rechenmodell zur Bestimmung der Farbverteilung verschiedener Himmelstypen wurde zusätzlich eine Software zur Bestimmung des dominanten Himmelstyps entwickelt. Mit dem Programm wurde die Häufigkeit der Himmelstypen über das Jahr 2015 für den Standort Berlin bestimmt (Abb. 1). Für die weitere Analyse in dieser Veröffentlichung wurden repräsentativ für den Standort Berlin die dominanten Himmelstypen vom klaren und bedeckten Himmel untersucht. Für die bedeckten Himmelsbedingungen im Jahr 2015 dominierte der Himmelstyp 3, für die klaren Himmelsbedingungen der Himmelstyp 12 /8/.

Monat	Himmelstyp														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Januar	864	29	896	60	172	112	33	15	69	73	36	65	13	4	0
Februar	557	21	663	88	143	112	76	39	63	72	82	459	308	63	0
März	1109	89	1237	225	373	290	140	59	130	358	225	491	197	51	2
April	389	55	467	135	230	222	126	54	157	240	148	293	93	45	7
Mai	783	123	1191	490	686	1187	393	153	515	529	289	465	222	135	17
Juni	1246	172	1371	445	760	684	262	136	323	338	244	351	125	138	11
Juli	309	37	290	104	227	145	74	38	73	51	27	18	18	26	2
August	496	67	561	199	305	471	258	138	281	313	355	1105	648	194	13
September	614	85	721	202	504	315	173	60	155	115	60	35	102	40	0
Oktober	1453	81	1189	114	240	180	66	35	101	153	129	588	407	106	8
November	920	73	895	163	311	235	130	53	82	109	141	116	50	37	5
Dezember	521	18	486	87	127	161	62	25	51	105	58	63	36	19	2
Jahr 2015	9261	850	9967	2312	4078	4114	1793	805	2000	2456	1794	4049	2219	858	67

Abb. 1: Häufigkeit der Himmelstypen im Jahr 2015, Standort Berlin

3 Praktische Anwendung der spektralen Information von Tageslicht im urbanen Planungsprozess mit Tageslicht

Das Forschungsprojekt zielt auf die Entwicklung eines computerbasierten parametrischen Tools ab, um die Tageslichtplanung in der urbanen Stadtstruktur gleichzeitig für mehrere Gebäude zu optimieren /1/. Den Schwerpunkt bildet dabei die praktische Anwendbarkeit der spektralen Himmelsmodelle im städtischen Planungsprozess. Für die Entwicklung des parametrischen Tools ist eine Analyse der Einflussparameter notwendig.

3.1 Einfluss der spektralen Eigenschaften der Himmelsbereiche auf die Tageslichtbedingungen auf der Fassade

Anhand der an der TU Berlin generierten und aufgearbeiteten Datensätze wurde der Einfluss der spektralen Eigenschaften der einzelnen Himmelsbereiche auf die Tageslichtbedingungen auf der Fassade in Abhängigkeit der oben genannten Entwurfsparameter untersucht. Es werden Diagramme erstellt, die die orientierungsabhängige integrale ähnlichste Farbtemperatur darstellen. Diese Diagramme zeigen die Dynamik der ähnlichsten Farbtemperatur des Lichtes auf einer Fassade in Abhängigkeit von dominantem Himmelstyp, Sonnenposition und Verbauungsgrad auf. Dabei wird zwischen direkten und reflektierten spektralen Himmelsanteilen unterschieden.

4 Vorläufige Ergebnisse

Vorrangiges Ziel der Arbeit ist es, das spektrale Tageslichtangebot an den Fassaden im Zentrum des Ballungsraums Berlin in Abhängigkeit von Himmelstyp, Verbauungsgrad, Reflexionsgrad der Verbauung, Jahreszeit, Sonnenposition und Orientierung des Gebäudes zu bestimmen, um so einen Beitrag zur Unterstützung der Einbeziehung der nicht-visuellen Aspekte in die Tageslichtplanung zu leisten. Dabei wird untersucht, ob das spektrale Tageslichtangebot auf der Fassade durch die vorhandenen Tageslichtbedingungen und die Verbauung variiert und orientierungsabhängig ist. Es soll herausgearbeitet werden, wie sehr die spektralen Eigenschaften der einzelnen Himmelsbereiche das Tageslichtangebot auf der Fassade beeinflussen.

Für die Analyse wurden die dominanten Himmelstypen 3 und 12 für den bedeckten und klaren Himmel gewählt. Um unterschiedliche Sonnenpositionen zu berücksichtigen, wurden pro Himmelstyp die Messdaten zweier Tage in unterschiedlichen Jahreszeiten (Sommer und Winter), und drei Uhrzeiten (9:00 Uhr, 12:00 Uhr und 15:00 Uhr wahre Ortszeit) analysiert. Die Analyse wurde für die Verbauungsgrade 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 % und einen festen Reflexionsgrad der gegenüberliegenden Verbauung in Höhe von 0,2

durchgeführt. Das spektrale Tageslichtangebot auf der Fassade wurde für die vier Haupt-himmelsausrichtungen untersucht. Der direkte Beitrag durch die Sonne wurde in dieser Studie noch nicht berücksichtigt.

Vorläufige Ergebnisse haben gezeigt, dass bei bedecktem Himmel (Beispiel in Abb. 2) das spektrale Tageslichtangebot als orientierungsunabhängig angesehen werden kann und bei allen Verbauungsgraden (unabhängig von der Sonnenposition) nahezu gleich dem Integralwert der Farbtemperatur ist. Basierend auf den vorläufigen Ergebnissen kann vermutet werden, dass die angenommene ähnlichste Farbtemperatur von 6500K für alle Himmelsrichtungen zu keinem großen Fehler führt.

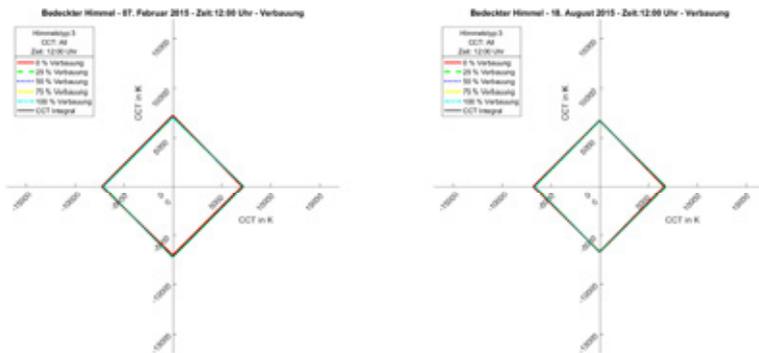


Abb.2: Spektrales Tageslichtangebot in Abhängigkeit von Verbauungsgrad und Sonnenposition für einen Tag im Februar (links) und einem Tag im August (rechts) für den Himmelstyp 3 – bedeckter Himmel

Bei klarem Himmel (Beispiel in Abb.3) hingegen haben sowohl die Sonnenposition, die Ausrichtung sowie der Verbauungsgrad einen wesentlichen Einfluss auf das spektrale Angebot auf der Fassade. Der Einfluss der berechneten Farbtemperatur in Abhängigkeit von der Orientierung variiert je nach Integralwert der ähnlichsten Farbtemperatur (Farbtemperatur der horizontalen diffusen Bestrahlungsstärke). Es ist vor allem an dem untersuchten Tag im Februar ein Einfluss der Verbauung zu erkennen. Bei niedrigen Verbauungsgraden fällt an diesem Tag die Orientierung Nord mit höheren Farbtemperaturen auf. Mit zunehmendem Verbauungsgrad verringert sich die ähnlichste Farbtemperatur für die Ausrichtung Nord und steigt durch die Reflexion der gegenüber liegende Fassade für die Südorientierung. Die vorläufige Analyse hat zudem ergeben, dass höhere Farbtemperaturen in allen 4 Himmelsrichtungen bei klarem Himmel an dem untersuchten Tag im Winter erreicht werden, was auf die niedrige Sonnenposition zurückgeführt werden könnte. Es ist ein wesentlicher Unterschied zu der integralen Berechnung sichtbar. Die Studie hat gezeigt, dass die spektralen Eigenschaften der Sky-Patches (nach Tregenza /10/) an einem Wintertag, vor allem bei Verbauung, einen wesentlichen Einfluss auf die Tageslichtsituation auf der Fassade haben. Die Plausibilität der absoluten Werte wird überprüft.

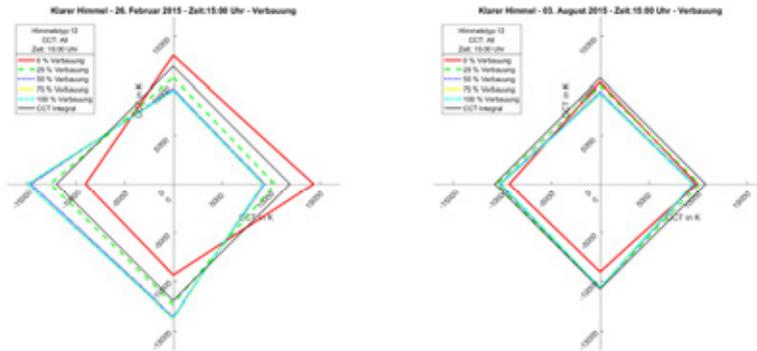


Abb.3: Spektrales Tageslichtangebot in Abhängigkeit von Verbauungsgrad und Sonnenposition für einen Tag im Februar (links) und einem Tag im August (rechts) für den Himmelstyp 12 – klarer Himmel (d-f)

5 Diskussion und Ausblick

Die vorläufigen Ergebnisse beziehen sich auf den Tageslichtmessplatz der Technischen Universität Berlin und gelten demzufolge nur für diesen Standort. Die Studie ergab, dass die derzeit in Planungen verwendete Farbtemperatur von 6500K zwar für den bedeckten Himmel annäherungsweise angenommen werden kann, jedoch bei klarem Himmel nicht mehr repräsentativ ist. Bei klarem Himmel erreicht die Farbtemperatur nicht nur höhere Werte, sondern ist auch orientierungsabhängig. Im Winter spielt auch die Verbauung bei klarem Himmel eine wesentliche Rolle. Die spektrale Komponente sollte demzufolge im urbanen Planungsprozess mitberücksichtigt werden.

Zurzeit wird die Plausibilität der Absolutwerte überprüft und das Rechenmodell optimiert. Im nächsten Schritt sollen mehrere Tage auch für andere Himmelstypen und Himmelsrichtungen ausgewertet werden. Der Untersuchung wurde das Tregenza Modell zugrunde gelegt, d.h. die Himmelsbereiche decken nur einen Teil des Himmels ab (55%). Unter tatsächlichen Himmelsbedingungen können die Leuchtdichten und damit die ähnlichste Farbtemperatur gegebenenfalls variieren. Des Weiteren wurde für die Berechnung nur die Reflexion des gegenüberliegenden Gebäudes betrachtet. Eine Mehrfachreflexion zwischen den Gebäuden sowie Reflexion vom Boden wurden vernachlässigt.

Aufbauend auf den Ergebnissen zur spektralen Farbverteilung der Himmelsstrahlung soll im Weiteren verifiziert werden, ob spektrale Himmelsmodelle analog zu Leuchtdichtehimmelsmodellen beschrieben werden können und ob die Farbverteilung vom Himmel aus der Himmelsleuchtdichteverteilung abgeleitet werden kann /9/. Vorausgesetzt, dass die Beziehung zwischen Leuchtdichte- und Farbverteilung nachgewiesen werden kann, können zukünftig neue Ansätze für eine tageslichtabhängige Lichtsteuerung erarbeitet werden /11/.

Die Ergebnisse der Simulationen zur Bestimmung der Orientierungsabhängigkeit der ähnlichsten Farbtemperatur auf der Fassade werden nachfolgend mittels einer Scale Model Studie validiert. Der Vorversuch zur Erprobung der Messtechnik wurde in Juni 2016 abgeschlossen. Der Folgeversuch ist für Juli 2016 geplant.

Mehr und aktuelle Informationen können Sie auf der Website des Fachgebiets Lichttechnik finden: http://www.li.tu-berlin.de/menue/ueber_uns/mitarbeiter/aicha_diakite/

Förderung

Das Vorhaben „Energetische und ergonomische Optimierung neuer Beleuchtungssysteme für Sanierung und Neubau“ (03ET1148B) wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Danksagung

Die Autoren danken Frederik Rudawski und Adrian Schödl für ihre Mithilfe für diese Veröffentlichung.

Literatur

- /1/ Diakite, A.; Knoop, M.: Designing and retrofitting the urban structure with daylight, SBE 16 Hamburg - Proceedings of International Conference on Sustainable Built Environment, Hamburg, 322-329, 2016
- /2/ CIE.: Spatial Distribution of Daylight – CIE Standard General Sky. CIE Publication S 011.1/E:2003 (ISO 15469:2004), Vienna: CIE, 2003.
- /3/ Perez, R.; Seals, R.; Michalsky, J.: Modeling skylight angular luminance distribution from routine irradiance measurements. Journal of the Illuminating Engineering Society, 22(1):10-17, 1993
- /4/ Knoop, M.: Analysis of spatially resolved measurement approaches to assess spectral characteristics of sky patches. In: CIE x039:2014 Proceedings of CIE 2014 Lighting Quality & Energy Efficiency, Kuala Lumpur, Malaysia, 2014
- /5/ Knoop, M.; Diakite, A.; Rudawski F.: Methodology to create spectral sky models to enable the inclusion of colorimetric characteristics of daylight in research and design. In: Proceedings of CIE 2015, Manchester (UK), 2015
- /6/ Kobav, M.B.; Bizjak, G.; Dumontier, D. Characterization of sky scanner measurements based on CIE and ISO standard CIE S 011/2003 Lighting Research and Technology 45(4):504-512, 2013
- /7/ Robertson, A.R.: Computation of correlated color temperature and distribution temperature. JOSA 58(11): 1528-1535, 1968
- /8/ Bremer, S.: Einfluss der spektralen Eigenschaften der Sky-Patches auf die Tageslichtbedingungen im Gebäude, Masterarbeit, TU Berlin, 2016
- /9/ Chain, C.: Caractérisation spectrale et directionnelle de la Lumière naturelle : Application à l'Éclairage des Bâtiments. Thesis of ENTPE, Laboratoire des Sciences de l'Habitat, Département Génie Civil et Bâtiment, 2004.
- /10/ Tregenza, P.: Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements. Lighting Research and Technology 19(1):13–14, 1987.
- /11/ Weber N.; Knoop, M.; Völker, S.: Adaptive tageslichtabhängige Lichtsteuerung für nicht-visuelle wirksame Beleuchtung, In: Tagungsband Licht2016, Karlsruhe, Germany, September 25 – September 28. 2016.

Daylight contribution to an artificially lit football field

Martijn Pakkert¹, Myriam Aries¹, Wout van Bommel², Alexander Rosemann¹

¹ Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands; ² Van Bommel Lighting Consultant, Nuenen, the Netherlands

Corresponding email: a.i.p.rosemann@tue.nl

Research issue

Football stadiums hosting international matches generally have to abide by strict lighting requirements as defined by, for example, the Union of European Football Associations (UEFA, 2010, Gomez et al., 2005). Even though the sun is the most dominant light source during the day, the electric stadium lighting is almost always on even when there is sufficient daylight. Depending on the orientation of the stadium, the shape of the stadium roof, geographical location, time of year, and meteorological conditions, daylight may be unevenly distributed over the field, and therefore compensated by electric lighting.

State of science/technology

Sports fields all over the world are designed to meet recommended lighting requirements. Especially the rules for the football industry are very strict. The contribution of daylight to the overall light condition on the pitch has not yet been investigated, even though the latest electric lighting technology is capable to substitute and support the use of daylight.

Research hypothesis

Daylight as a contributor towards meeting the stadium lighting requirements has the possibility to reduce energy costs and increase visual comfort.

Experimental setup

In collaboration with the football club PSV Eindhoven from the Netherlands, photometric measurements were carried out in a professional football stadium (UEFA category 1). In 2015 the electrical lighting system has been replaced with the latest LED-technology. The PSV Stadium was modelled in Dialux, validated with the field measurements, and used to simulate a full football season in order to investigate whether the UEFA requirements regarding illuminance levels, uniformity, and glare are met. This study focussed on how daylight can contribute to the illumination of an otherwise artificially lit pitch.

Results

Results indicate that there are certain times during a football season when daylight can be used to fulfil all needs for lighting. There are also multiple moments where additional electric lighting is required to fulfil the UEFA requirements.

References

- Gomez, F., Seron, F., Aporta, J., Gutierrez, D., 2005, Predictive sunlight simulation for the remodeling of the Real Madrid stadium, Proceedings 3rd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia -GRAPHITE '05, pp. 139-142.
- Union of European Football Associations, 2010, UEFA Stadium Infrastructure Regulations, Nyon. http://www.uefa.org/MultimediaFiles/Download/Regulations/uefaorg/Stadium&Security/01/48/48/85/1484885_DOWNLOAD.pdf (last accessed January 26th, 2016)

Daylight Contribution to an Artificially Lit Football Field

*Martijn Pakkert, Myriam Aries, Wout van Bommel, Alexander Rosemann
Building Lighting group, Unit Building Physics and Services, Department of the Built
Environment, Eindhoven University of Technology, P.O. Box 513, 5600 MB, Eindhoven,
the Netherlands*

Summary

Sports fields all over the world have to fulfil certain requirements defined for light conditions. Especially for the football industry these rules are very strict. Daylight has never been studied for meeting those requirements, although it has the possibility to reduce energy costs and increase visual comfort. This study investigated potential daylight contribution to a currently artificially lit sports field. As a real world example, the Philips Stadium, home of football club PSV, in Eindhoven, the Netherlands, is chosen to model, validated with on-field measurements. A model in DIALux was used to simulate a football season and focus on what the Union of European Football Associations (UEFA) has required, such as illuminance levels, uniformity and glare. Results indicate that daylight always fulfils a few of the requirements, although there are only a few situations in which all are fulfilled.

1 Introduction

During the day the sun is the most dominant source of lighting. Even though light levels provided by daylight are much higher than electric light levels in sports stadiums, the artificial light source is always switched on. The stadium itself forms a barrier for the sun by casting shadows on the field. Depending on the stadium's orientation, time of day and year, and weather conditions, daylight is often unevenly distributed over the playing field. During the evening the amount of daylight is frequently significantly reduced or even absent. Artificial lighting can be the solution to guarantee the required uniformity and illuminance levels.

The importance of a good light distribution is demonstrated based on the situation in the Santiago Bernabeu stadium of Real Madrid (Spain) in 2005. Parts of the field did not get enough light due to the shadow casted by the stadium's geometry. The grass in the shadow areas withered very quickly.

The light distribution is also important during the football game. Therefore it is not surprising that the Union of European Football Associations (UEFA) specified the light requirements for football stadiums during matches. In order to host the most important matches, stadiums must meet category 1 ranking of the UEFA lighting requirements (Gomez, Seron, Aporta, & Gutierrez, 2005). This ranking consists of requirements for i.e. illuminance, uniformity, and glare (see Table 1). Since the majority of the public watches the games via television, additional requirements are designed to make the match visible onscreen (UEFA, 2014). Uniformity plays a big role and is calculated in two ways. U_1 is calculated with $E_{\text{minimum}}/E_{\text{maximum}}$, and U_2 is $E_{\text{minimum}}/E_{\text{average}}$. Agreement to these uniformity values prevents the existence of extreme high or low values.

Glare, the difficulty seeing in the presence of bright light, can be calculated according to different standards, designed for different situations. In 1994, the CIE developed a glare

evaluation method for outdoor sports lighting and area lighting applications (CIE document 112-1994). The Glare Rating calculation grid provides an indication of glare experienced by the observer for each point in the grid based on the veiling illuminance produced by the luminaires and the environment (ground plane only) on an observer's eye. Glare Rating (GR) is used by the UEFA.

Table 1. Requirements set by the UEFA on Lighting for a Category 1 Stadium (UEFA, 2014)

	Minimum Requirement
$E_{h\text{ avg}}$ (average horizontal illuminance)	2000 lux
Uniformity U_{1h} / U_{1h}	0.50 / 0.70
$E_{v4-96\text{ avg}}$ (4 point average vertical illuminance (all four viewing directions))	2000 lux
Uniformity U_{1v} (4-point average) / U_{2v} (4-point average)	0.35 / 0.50
$E_{v\text{ ave } 270^\circ}$ (average vertical illuminance on main camera plane (270°))	2000 lux
Uniformity $U_{1v-270^\circ} / U_{2v-270^\circ}$	0.50 / 0.70
Glare Rating (GR)	< 50

Football stadiums around the world put a lot of time and effort into the design of the lighting including suitable luminaires and correct positioning. The contribution of daylight was never researched for its contribution to the lighting of a sports facility.

Since the energy demand grows, saving energy and reducing emissions is one of the main challenges the world is facing today (Zahedi, 2010). Therefore it is important to take every opportunity to reduce energy consumption, and thus also every opportunity to reduce lighting energy demand. This makes it very important to see if and how daylight can be used to substitute or support artificial lighting for a football field.

2 Method

In collaboration with football club PSV in Eindhoven, the Netherlands, measurements in their football stadium situation were performed. Recently, the light situation in the Philips Stadium attracted publicity because the lighting company Royal Philips installed new LED luminaires. This makes it the first football stadium in the Netherlands and the third in the world that has this state of the art lighting system installed.

The study consisted of two parts:

- 1) real-time measurements, and
- 2) a simulation study.

To come to an extensive and structured mapping of the light situation, real-time measurements (both illuminance and luminance) have been carried out to validate the results of simulations (Szűcs, Perraudeau, & Allard, 2006). There are 10 moments in the Dutch Eredivisie ('Honour Division') Season simulated that cover clear and overcast sky conditions and different sun positions. Illuminance values on the horizontal plane were used as input for the model. Glare indices were calculated based on luminance measurements, from the line of sight of the users, which are in this case the football players. This will show the

quality of the lighting in the stadium, which then will be compared to the visual comfort that daylight yields. The Daylight Glare Index (DGI) is used for daylight glare measurements, and the Unified Glare Rating (UGR) for artificial lighting measurements.

2.1 Visual comfort assessment

The first experiment was done to detect glare: an important test to evaluate visual comfort by daylight and in night situations. This was done using a photo camera with a wide angle lens as measurement equipment and using the software tool 'Evalglare' (Wienold and Christofferson, 2005; Suk and Schiller 2012) for the image processing. The camera used was a Canon EOS D60 provided with a Sigma 4.5mm F2.8 EX DC fish-eye lens with a diagonal viewing angle of 180°, all connected to a laptop. This laptop ran the DSLR Remote Pro software and the light simulation software Radiance, including Evalglare. With High Dynamic Range (HDR) images, directly imported into Radiance, luminance values per pixel were combined into false colour images. Also, glare values were calculated with the standards DGI, and UGR.

The real-time measurements were done at seven positions on the football field (A, B, C, etc., see Figure 1a) facing two directions towards both goals. These seven positions were chosen since the football players come there frequently, as seen in red in Figure 1b.

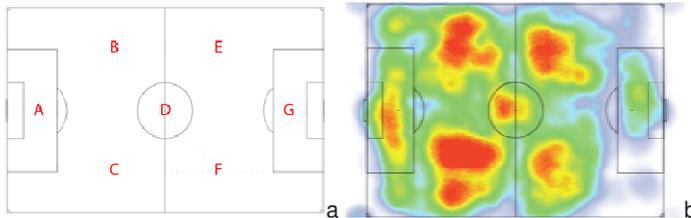


Figure 1. (a) Measurement positions on the field for the Visual Comfort Assessment ; (b) Heat Map of the PSV Player Positions during the first match PSV vs. Manchester United with the new LED luminaires on the 15th of September 2015 (OrtecSports, 2015)

2.2 Light level assessment

Illuminance was measured with the help of three illuminance meters (Minolta 1 * T-10A and 2 * T-10MA receptor heads). These meters have silicon photocells and a measuring range of 0.01 to 299,990 lx. Theoretically, the devices have a linearity of $\pm 2\% \pm 1$ digit of displayed value and the T-10A was calibrated automatically. Two T-10MA's were mounted on a tripod at a height of 1.0 m, with the first cell placed on top of the tripod to measure horizontal illuminance, and the second one on the side of the tripod to measure the vertical illuminance. During the measurement the tripod was rotated in four directions, facing the four different tribunes (north, east, south, and west).

To relate these results to the lighting conditions outside the stadium, horizontal illuminance values from a weather station on the roof of a two-storey building on the TU/e campus were retrieved. This was used to analyse how well the DIALux model performed. The daylight measurements are done on the 18th of November 2015 between 1:51 PM and 2:41 PM, and the night measurements on the 7th of December 2015 between 7:19 PM and 7:57 PM.

2.3 Computer simulation model

The computer simulation model was made with DIALux 4.12, which has built-in sports elements. Information about the LED luminaires and their positions was retrieved from Philips. In total, 296 luminaires hang from the canopies of the stadium, mounted in a line configuration. Every luminaire has a slightly different angle and aiming point compared to its adjacent luminaire, as can be seen in Figure 2. Figure 3 shows an aerial view of the Philips Stadium and the simulation model in DIALux. Simulations are done for the 1st of the month at 12 AM for one half (August until December) of the Dutch Eredivisie season (August until June).

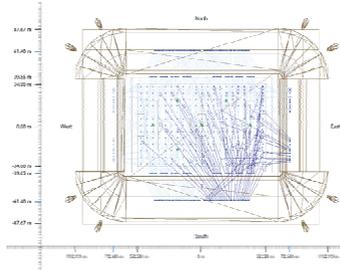


Figure 2. Overview of the luminaires in the Philips stadium and their main direction as used in DIALux



Figure 3. Aerial photo (left) and DIALux model (right) of the Philips Stadium in Eindhoven, the Netherlands

3 Results

Table 2 shows that the difference between the measured and simulated values is within an average comparison factor of 1.12, which means that the simulated values are on average 12% higher than the measured values.

Table 2. Comparison on measured values to simulation results on artificial lighting

Position	Measured horizontal illuminance in lx	Simulated horizontal illuminance in lx	Comparison Factor [simulated/measured]
A	2420	2380	0.98
B	2150	2740	1.27
C	2320	2740	1.18
D	3200	3010	0.94
E	2180	2750	1.26

F	2280	2740	1.20
G	2330	2380	1.02
Average			1.12

Below, in Table 3 and Table 4, the results from the Light level assessment are shown. All figures that do not meet the requirements set by UEFA are presented in *italic bold*. Table 5 shows the glare results from measurements and simulations.

Table 3. Horizontal illuminance and uniformity values from simulations

Horizontal illuminance in lx		E _{max} in lx	E _{min} in lx	E _{avg} in lx	U ₁	U ₂
Artificial lighting		4 210	2 160	2 940	0.51	0.73
Month	Sky condition					
August	Clear Sky	70 570	4 970	52 720	0.07	0.09
	Overcast Sky	13 480	8 130	11 540	0.60	0.70
September	Clear Sky	58 200	4 280	34 940	0.07	0.12
	Overcast Sky	11 720	7 070	10 030	0.60	0.70
October	Clear Sky	41 220	3 550	17 760	0.09	0.20
	Overcast Sky	9 280	5 600	7 940	0.60	0.70
November	Clear Sky	8 870	2 910	5 990	0.33	0.49
	Overcast Sky	7 050	4 250	6 040	0.60	0.70
December	Clear Sky	5 450	2 080	3 960	0.38	0.52
	Overcast Sky	4 900	2 960	4 200	0.60	0.70

Table 4. Vertical illuminance and uniformity values towards the camera from simulations

Vertical illuminance in lx (towards camera, °270)		E _{max} in lx	E _{min} in lx	E _{avg} in lx	U ₁	U ₂
Artificial Lighting		4 340	1 550	2 750	0.36	0.56
Month	Sky condition					
August	Clear Sky	18 190	4 380	13 270	0.24	0.33
	Overcast Sky	6 360	1 810	4 700	0.29	0.39
September	Clear Sky	17 010	3, 80	10 980	0.23	0.36
	Overcast Sky	5 530	1 580	4 090	0.29	0.39
October	Clear Sky	14 670	3 650	8 120	0.25	0.45
	Overcast Sky	4 380	1 250	3 240	0.29	0.39
November	Clear Sky	8 670	3 220	5 340	0.37	0.60
	Overcast Sky	3 330	950	2 460	0.29	0.39
December	Clear Sky	3 500	2 010	2 800	0.57	0.72
	Overcast Sky	2 310	660	1 710	0.29	0.39

Table 5. Glare indexes from measurements and simulations

Glare index	Point on field						
	A	B	C	D	E	F	G
Simulated Artificial Lighting [GR]	44	46	47	40	47	46	44
Measured Artificial Lighting Facing West [UGR]	11.6	9.3	9.3	12.2	10.8	12.7	11.8
Measured Artificial Lighting Facing East [UGR]	11.2	10.6	11.9	12.3	9.6	9.1	11.0
Measured Daylight Facing West [DGP]	0.26	0.38	0.33	0.46	0.53	0.40	0.46
Measured Daylight Facing East [DGP]	0.43	0.46	0.33	0.53	0.49	0.37	0.27

4 Discussion

Especially for the vertical illuminance values, most of the results do not meet the requirements for stadium lighting, except for one simulated situation: the clear sky in December. This situation has a bright sky with a shadow casted on the whole field, which improves illuminance uniformity. It is predicted that this will also apply to an overcast sky in mid-summer since this yields a high uniformity and a semi bright sky, which might be enough to meet the requirements. This is left out of the simulations since the first match of the Dutch Eredivisie season is played in August.

The simulation results show relatively high glare indexes even though they do not exceed the requirement of 50. This is comparable for both the day and the night situations in the stadium. Situations with daylight show the highest probability for glare, but it must be noticed that the results are collected on the 18th of November at noon when the sun had a low position, but just high enough to reach players on the field. Therefore it is predicted that any other moment in the Eredivisie season, will result in lower glare probability.

5 Conclusions

It is concluded that daylight can be used to meet the football lighting requirements in December with a clear sky, which occurs 27% of the time in the Netherlands (KNMI, 2016). Since half of the year is simulated, also clear skies in January will be meeting the requirements. This comes down to 6% of the Eredivisie season.

References

- OrtecSports. (2015) Heat map of PSV vs. Manchester United, Retrieved from: www.telegraaf.nl/telesport/voetbal/livewidget. Last accessed on 8 October 2015
- CIE (1994), Glare Evaluation System for Use within Outdoor and Area Lighting, report CIE 112-1994, ISBN 978 3 900734 55 8, 14 pages. Last accessed on 15 October 2015
- Gomez, F., Seron, F., Aporta, J., & Gutierrez, D. (2005). Predictive sunlight simulation for the remodeling of the Real Madrid stadium. *Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia - GRAPHITE '05*, 139. <http://doi.org/10.1145/1101389.1101416>. Last accessed on 18 September 2015
- KNMI. (2016). December 2015. Retrieved from <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/maand-en-seizoensoverzichten/2015/december>. Last accessed on 10 June 2016
- Szűcs, Á., Perraudeau, M., & Allard, F. (2006). Assessment of visual comfort of spectators in stadia. In *PLEA 2006 - 23rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Conference Proceedings*. Geneva. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84855599085&partnerID=tZ0tx3y1>. Last accessed on 19 September 2015
- UEFA. Stadium Lighting Guide and Regulations 2014, Draft Version 2.03 (2014). <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>. Last accessed on 15 October 2015
- Zahedi, A. (2010). Australian renewable energy progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2208–2213. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.026>. Last accessed on 2 October 2015

Quo vadis DIN 5034 – Die Europäische Tageslichtnorm kommt

*Dipl.-Ing. Wolfgang Cornelius VDI
Fachverband Tageslicht und Rauchschutz (FVLR e.V.)*

Problemstellung

In CEN/TC 169/WG 11 wird an einer Europäischen Norm zur Tageslichtbeleuchtung in Gebäuden gearbeitet. Trotz auch in englischer Sprache verfügbarer, vorhandener Deutscher Normen (DIN 5034), die als Basis hätten verwendet werden können, entschloss sich WG 11, neue Wege zu gehen und die Ergebnisse wissenschaftlicher Arbeiten gleich zu einem Standard zu machen.

Ziel

Dieser Vortrag beschreibt:

- a) den gegenwärtigen Stand der Deutschen Normung,
- b) den gegenwärtigen Stand der Europäischen Normung zur Tageslichtversorgung in Innenräumen und
- c) wägt ab, wie sich eventuell die Einführung der Europäischen Norm auf das Deutsche Normenwerk auswirken könnte.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Das von WG 11 gewählte Verfahren für die empfohlene Tageslichtversorgung orientiert sich an der in den USA bereits eingeführten räumlichen Tageslichtautonomie (Spatial Daylight Autonomy – sDA). Sie ist eine Weiterentwicklung der Tageslichtautonomie und beschreibt den Anteil der Nutzungsstunden über das Jahr, in denen mindestens 50% eines Raumes mit einer bestimmten Tageslichtbeleuchtungsstärke, z. B. 300 lx, beleuchtet werden.

Realisierungsgrad

WG 11 hat einen Entwurf vorgelegt, der voraussichtlich im Frühjahr 2016 in die Umfrage geht. Mit einem Weißdruck ist zum Ende der 2. Jahreshälfte zu rechnen.

Quo vadis DIN 5034 – A European Daylight Standard becomes reality

*Dipl.-Ing. Wolfgang Cornelius VDI
Fachverband Tageslicht und Rauchschutz (FVLR e.V.)*

Abstract

In 2010 already CEN/TC 169/WG 11 started work on a new proposed work item „Daylight in buildings“, initialized and supported by Germany. German experts have a long tradition and experience in standardization work in the field of light and lighting, exceeding 80 years. The first edition of the DIN standard 5034 entitled “Leitsätze zur Tagesbeleuchtung” was published in November 1935. The current German standard series DIN 5034 “Tageslicht in Innenräumen” (Daylight in interiors) consists of the following parts:

- Part 1: General requirements,
- Part 2: Principles,
- Part 3: Calculation,
- Part 4: Simplified method of determining window sizes in dwellings,
- Part 5: Measurement,
- Part 6: Simplified determination of suitable dimensions for rooflights.

Recently, CEN/TC 169/WG 11 published a new draft prEN 17037 “Daylight in buildings” currently in enquiry procedure.

This contribution

- a) explains the current status and content of German standards referencing daylight,
- b) presents the highlights of the draft European standard prEN 17037 and
- c) discusses the possible consequences for the standard series DIN 5034.

Simulative Bewertung der indirekten Blendbelastung durch Kfz-Scheinwerfer

Christian Werner, Benedikt Kleinert, Michael Marutzky, Sven Bogdanow, IAV GmbH

Problemstellung

Das Blendpotenzial eines Scheinwerfers wird nach ECE-Regularien derzeit im Wesentlichen durch den Punkt B50L bestimmt. Erhöhte Blendbelastungen durch Reflexionen an der Fahrbahnoberfläche werden nur bedingt berücksichtigt. Bei Trockenheit ist die indirekte Blendung vernachlässigbar, bei nassen Witterungsbedingungen verursachen die Reflexionen allerdings mehr als 90% der Blendbelastung.

Die Bewertung von Kfz-Scheinwerfern bezüglich ihres indirekten Blendpotenzials kann derzeit erst bei Vorliegen eines Prototypen geschehen. Durch den Einsatz einer spezialisierten Simulationssoftware ist dies bereits während des Entwicklungsprozesses möglich. Daher wurde das IAV-Software-Tool CAGE (Computer Aided Glare Evaluation) entwickelt.
/1/

Ziel

Mit dem derzeitigen Entwicklungsstand der Software wird die indirekte Blendbelastung lediglich durch die Auswertung eines Punktes ermittelt. Da jedoch jeder Punkt entlang der Blendkeule zur Blendbeleuchtungsstärke beiträgt, ist ein integraler Bewertungsansatz realitätsnäher.

Die der Software derzeit zugrundeliegenden Daten entstammen Freifeld-Messungen. Um von Umwelteinflüssen unabhängig zu sein, sollen Messdaten zukünftig innerhalb einer Referenzumgebung unter wiederholbaren Bedingungen aufgenommen werden. Ziel ist die Optimierung der Software hinsichtlich einer besseren Approximation an die reale Blendbelastung während eines Passiervorgangs.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Der Entwicklungsprozess von Scheinwerfern wird durch CAGE um eine Dimension erweitert. Es ermöglicht den Entwicklern, die indirekte Blendung bereits während der Konzeptphase des Scheinwerfers zu berücksichtigen und dadurch Zeit und Kosten zu sparen. Im Straßenverkehr führt die Reduzierung der indirekten Blendbelastung zu einer erhöhten Verkehrssicherheit.

Realisierungsgrad

Die Optimierung der Software erfolgt in mehreren Schritten. Zuerst wird die Software an die veränderten Bedingungen angepasst; der punktuelle Ansatz wird dabei in die integrale Betrachtung entlang der Blendkeule überführt. In späteren Untersuchungen werden die Reflexionseigenschaften unterschiedlicher Fahrbahnzustände ermittelt. Abschließende Messungen dienen der Validierung.

/1/ Kleinert et al., „CAGE – Computer Aided Glare Evaluation of automotive headlamps“, in: ISAL 2015 Proceedings, Darmstadt, 2015

Simulative evaluation of the indirect glare exposure caused by headlights

Christian Werner, Benedikt Kleinert, Michael Marutzky, Sven Bogdanow, IAV GmbH

Issue

The glare potential of a given headlight is determined mainly through point B50L according to ECE regulations. Increased glare exposure due to reflections on the road surface are considered only to a limited extent. Indirect glare may be neglected on dry conditions but on wet road surfaces reflections cause more than 90% of the overall glare exposure.

Today the evaluation of headlights with respect to indirect glare may only be done if a prototype is available. The usage of a specialized simulation software may allow this even during the process of development. Therefore IAV developed the evaluation-tool CAGE (Computer Aided Glare Evaluation). /1/

Aim

At the current state of the software's development the indirect glare exposure is computed via the evaluation of one point. Since any point along the projected linking line between headlight and oncoming driver's eye (so called reflex line) is contributing to the glare illuminance, an integral approach would be more realistic.

The underlying data for the software are extracted from free-field measurements. Future data shall be recorded under reproducible conditions in a well-known reference environment in order to be independent of atmospheric influences. Scope of the software's optimization is a better approximation of the glare exposure experienced during a real passing situation.

Description of the innovation/»best practice«

The process of development is enhanced by CAGE. It allows developers to take indirect glare into account as early as conception phase therefore saving time and money. Additionally a reduction of the indirect glare exposure will result in an increase of road safety.

Level of realization

The software's optimization is conducted in multiple steps. First it is adapted to the changed prerequisites; the punctual approach is transferred to the integral consideration along the reflex line. Later investigations will identify reflection properties of reference surfaces. A final measurement will be carried out for validation.

/1/ Kleinert et al., „ CAGE – Computer Aided Glare Evaluation of automotive headlamps“, in: ISAL 2015 Proceedings, Darmstadt, 2015

Simulative Bewertung der indirekten Blendbelastung durch Kfz-Scheinwerfer

Christian Werner, Benedikt Kleinert, Michael Marutzky, Sven Bogdanow, IAV GmbH

Zusammenfassung

Der Beitrag beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung einer Software zur Bewertung von Kfz-Scheinwerfern. Es wird sowohl die direkte als auch die indirekte Blendung berücksichtigt. Die größte Veränderung gegenüber der Vorgängerversion ist die Verwendung mehrerer Stützpunkte entlang der auf den Boden projizierten Verbindungslinie Auge – Scheinwerfer (Reflexlinie). Dadurch ist eine realitätsnähere Simulation der Blendbelastung möglich. Zudem werden weitere mögliche Entwicklungsschritte vorgestellt.

1 Einleitung

Seit der Einführung von Kfz-Scheinwerfern werden diese fortlaufend komplexer. Die fortwährende Weiterentwicklung von Hard- und Software erlaubt es Scheinwerferentwicklern, zusätzliche Funktionen in Scheinwerfer zu implementieren. Dazu gehören neben Funktionen mit statischer Lichtverteilung (Abbiegelicht) auch Funktionen, die ihre Lichtverteilung an Fahrsituationen dynamisch anpassen können (AFS). Techniken wie Matrix- und Pixellicht erlauben sogar eine noch dynamischere Adaption der Lichtverteilung. Neben neuen Lichtquellen (LED) werden daher auch neue Licht-Systeme in Regelungen der Economic Commission for Europe (ECE) thematisiert. Zusätzlich werden bestehende Regelungen erweitert (beispielsweise die Einführung von Abblendlichtklassen in den ECE-Regelungen R48 und R123), um mit der technischen Entwicklung Schritt zu halten.

Das tatsächliche Blendpotenzial von Scheinwerfern wird durch die Regelungen der ECE nicht erfasst. Eine Bewertung der indirekten Blendung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrbahnzustände findet nur bedingt statt. Andere Methoden zur Bewertung von Scheinwerfern wie beispielsweise das Headlight Test and Rating Protocol des Insurance Institute for Highway Safety (IIHS) bedeuten einen großen Aufwand bei der Durchführung der Messungen und setzen das Vorhandensein eines voll Funktionsfähigen Versuchsfahrzeugs voraus. /1/

Lichtverteilungen, wie sie zukünftig z.B. mit Matrix- oder Pixellicht-Scheinwerfern realisierbar sein werden, können zunehmend dynamisch auf die vorliegende Fahrsituation angepasst werden. Die Anzahl der zu bewertenden Lichtverteilungen steigt dadurch an und damit auch der Aufwand zur Bewertung des Blendpotenzials eines Scheinwerfers.

2 Problemstellung & Ziel

Für die Zulassung innerhalb des Geltungsbereichs der ECE-Regelungen wird zur Bewertung des Blendpotenzials mittels einer Photogoniometermessung der Schwellwert am Punkt B50L sowie innerhalb mehrerer Zonen überprüft. Unter Annahme eines trockenen Fahrbahnuntergrunds ist diese Vorgehensweise ausreichend, da in diesem Fall die Reflexionen über die Fahrbahnoberfläche vernachlässigbar gering sind. Bei feuchter und somit

zunehmend stärker gerichtet reflektierender Fahrbahnoberfläche sind die Reflexionen allerdings für bis zu 90% der entstehenden Blendbelastung verantwortlich. /2/

Verschiedene Untersuchungen weisen darauf hin, dass die durch Reflexionen auf der Fahrbahnoberfläche resultierenden Beleuchtungsstärken am Auge eines entgegenkommenden Fahrers um einen Faktor 9 – 13 höher sein können. /2/, /3/ Für die Entwicklung einer Abblendlichtverteilung, die bei Nässe eine entblendende Funktion /4/ hat, ist es also nicht ausreichend, entgegenkommende bzw. vorausfahrende Fahrzeuge durch eine Modifikation der Lichtverteilung direkt auszuschneiden. Um umfassende Aussagen über die Blendbelastung machen zu können, muss von der Fahrbahnoberfläche reflektiertes Licht in die Betrachtung mit einbezogen werden.

Obwohl eine simulative Bewertung des Blendpotenzials durch Ray-Tracing-Programme grundsätzlich vorstellbar ist, ist eine kontinuierliche Bewertung während des Entwicklungsprozesses nicht praktikabel. Die benötigten Strahlenzahlen und somit die für die Simulation erforderliche Rechenleistung und -zeit steigen stark an, da zusätzlich zu den direkt simulierten Strahlen die über die Fahrbahnoberfläche reflektierten Lichtstrahlen zu berücksichtigen sind. Dies legt die Entwicklung einer auf die Blendungsbewertung spezialisierten Software nahe, mit deren Hilfe bereits während des Entwicklungsprozesses überprüft werden kann, ob beispielsweise ein blendfreies Abblendlicht /4/ auch unter realen Verhältnissen blendfrei ist.

Aus diesem Grund wurde bei IAV die Software CAGE (Computer Aided Glare Evaluation) entwickelt. /5/ Die Berechnungen in CAGE 1.0 basieren auf der Annahme, dass ausschließlich der mathematische Reflexpunkt für den indirekten Anteil der Blendbeleuchtungsstärke verantwortlich ist (vgl. Abb. 1). Dies stellt aus mehreren Gründen eine Vereinfachung dar:

1. Fahrbahnoberflächen reflektieren Lichtstrahlen nicht ideal spiegelnd.
2. Aus dem Scheinwerfer austretendes Licht wird von jedem Punkt der Fahrbahnoberfläche in Richtung Fahrerauge reflektiert.
3. Die zur Berechnung der indirekten Blendbeleuchtungsstärke verwendete Funktion basiert auf empirisch gewonnenen Daten.

Mit der Weiterentwicklung der Software sollen diese Vereinfachungen eliminiert werden.

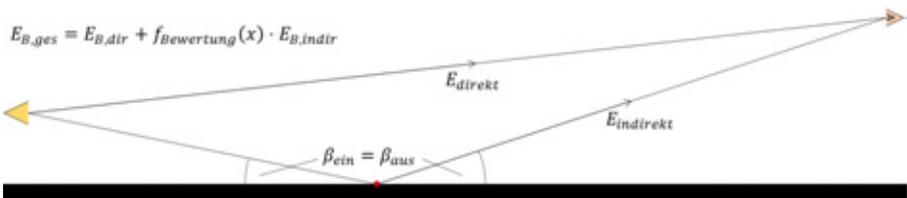


Abb. 1: Prinzip der Berechnung der Blendbelastung in CAGE 1.0

3 Vorgehensweise

Untersuchungen haben ergeben, dass bei nasser Oberfläche eine Ausmaskierung der Reflexlinie (vgl. Abb. 2) die Blendbeleuchtungsstärke um bis zu 70% reduzieren kann. /6/

Aus diesem Grund wird in einem ersten Weiterentwicklungsschritt der Software die integrale Betrachtung entlang dieser Linie in den Fokus gestellt. Die Software wird daher dahingehend modifiziert, dass sie in der Lage ist, die Beleuchtungsstärkewerte von n Stützpunkten zu einer resultierenden Blendbeleuchtungsstärke aufzusummieren. Im Gegensatz zu Rosenhahn /7/ soll dies nicht nur für eine diskrete Begegnungsdistanz von 70 m sondern für jeden Zeitpunkt während des Passiervorgangs geschehen.

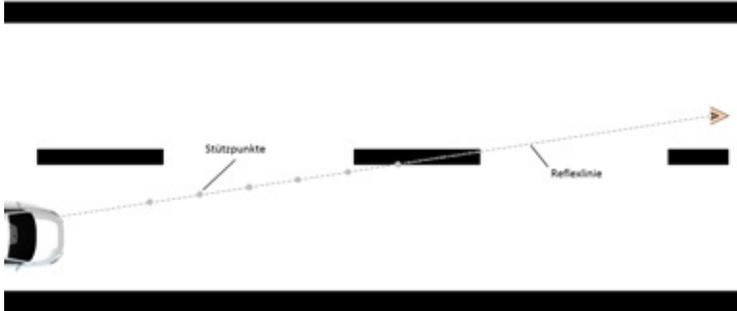


Abb. 2: Skizzierte Begegnungssituation

Abb. 3 veranschaulicht die prinzipielle Funktion und Abb. 4 zeigt ein vereinfachtes Ablaufdiagramm der Software. Zur Berechnung der Blendbelastung wird zunächst eine Scheinwerfer-Lichtverteilung im ies-Format eingelesen, wie sie mit kommerziell erhältlichen Lichtsimulationsprogrammen erstellt werden kann. Aus der Entfernung des Stützpunkts (SP) zur Lichtquelle (siehe Abb. 3) errechnet sich der Winkel der für die Berechnung aus der Lichtverteilung zu berücksichtigen ist. Ein- und Ausfallwinkel ergeben sich aus den geometrischen Gegebenheiten (Begegnungsdistanz, Höhe des Fahrerauges, Anbauhöhe des Scheinwerfers). In Verbindung mit den Reflexionseigenschaften der Fahrbahndeckenschicht sowie dem photometrischen Entfernungsgesetz kann somit die Größe der Blendbelastung für einen Stützpunkt berechnet werden. Gemäß dem Superpositionsprinzip setzt sich die gesamte Blendbeleuchtungsstärke aus der Summe der Einzelbelastungen zusammen. Die Genauigkeit der Simulation sowie deren Dauer werden durch die Anzahl der Stützstellen bestimmt. Ausgehend von Erfahrungen aus ersten Simulationen soll dem Anwender im späteren Entwicklungsverlauf eine für die Begegnungsentfernung optimale Anzahl an Stützstellen vorgeschlagen werden um einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit herzustellen.

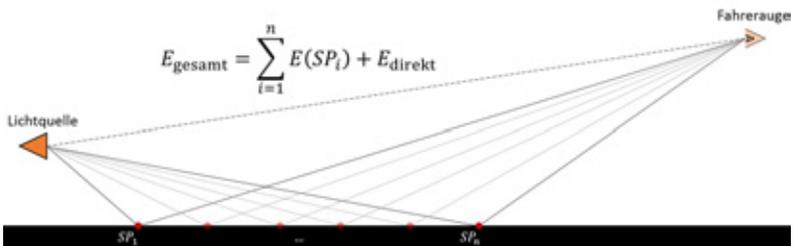


Abb. 3: Schematische Darstellung der Berechnung der Blendbeleuchtungsstärke zusammengesetzt aus direktem Anteil (gestrichelt) und indirektem Anteil (hier: 6 Stützpunkte)

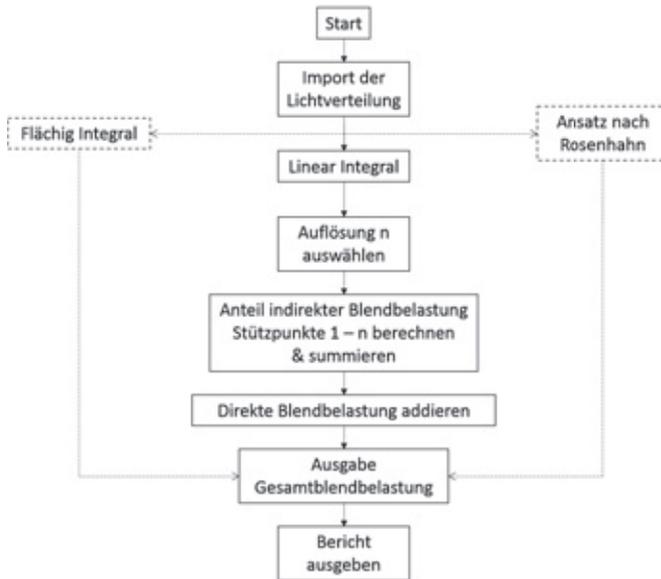


Abb. 4: Vereinfachter Ablaufplan von CAGE 2.0. Geplante Entwicklungsschritte sind gestrichelt dargestellt

Um die simulierten Ergebnisse validieren zu können, sind im weiteren Verlauf Messungen mit realen Schweinwerfern und Oberflächen geplant. Um reproduzierbare Messungen zu garantieren, werden diese unter wiederholbaren Bedingungen erfasst. Dabei kommen dieselben Materialien zum Einsatz, deren Reflexionseigenschaften mit einer Imaging Sphere /8/ vermessen wurden. Die Reflexionseigenschaften von Oberflächen werden durch Bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktionen (BRDF) beschrieben. Die Erfassung der dazu notwendigen Daten bedeuten meist einen erheblichen Messaufwand. Durch den Einsatz der Imaging Sphere kann der Zeitaufwand drastisch reduziert werden.

Zur Validierung der Software werden zunächst zwei Referenzoberflächen untersucht. Dies ist einerseits Moltonstoff, der aufgrund seines diffusen Reflexionsverhaltens eher einer trockenen Fahrbahn gleicht. Dem gegenüber wird eine nasse Fahrbahn durch die Verwendung von Bodenfliesen aus Kunststoff nachgebildet, wie sie auch in der Licht- und Fahrerassistenzhalle (LFH) der IAV zum Einsatz kommen (vgl. Abb. 5 links). Diese stellen eine gute Näherung für die Reflexionseigenschaft einer nassen Fahrbahndeckschicht dar. /9/

Nachdem die mit diesen Referenzoberflächen simulierten Ergebnisse mit Messungen validiert sind, kann mit dem Aufbau einer Datenbank begonnen und zusätzliche Oberflächen untersucht werden.



Abb. 5: Vergleich der resultierenden Lichtverteilungen für Bodenfliese (links) und Moltonstoff (rechts) /10/

4 Zusammenfassung & Ausblick

Durch die Entwicklung von CAGE 2.0 zur Bewertung der indirekten Blendbelastung von Scheinwerfern ist es möglich, diese bereits während des Entwicklungsprozesses auf ihre Blendbelastung zu untersuchen. Die Nachteile kommerziell erhältlicher Lichtsimulationssoftware (Kosten- und Rechenzeitintensivität) werden durch die Spezialisierung reduziert. Durch die Fokussierung der Simulation auf die Reflexlinie (linear integraler Ansatz) wird ein optimales Verhältnis von Rechenaufwand und benötigter Auflösung hergestellt. Gleichzeitig wird bei der Programmierung ein Augenmerk darauf gerichtet, die Software auch zukünftig erweitern zu können. Der zusätzlich geplante Aufbau einer Datenbank von Reflexionseigenschaften von Fahrbahndeckschichten wird es ermöglichen, beliebige Witterungsbedingungen in der Simulation nachzubilden.

Ein weiterer möglicher Entwicklungsschritt ist die nochmalige Erweiterung der Software von linear integraler auf eine flächig integrale Berechnung. Dabei werden zusätzliche Stützpunkte zur Berechnung der Blendbelastung herangezogen. Diese können sich auf beliebigen Positionen auf der Fahrbahn befinden (Abb. 6). Während der linear integrale Ansatz ausreichend sichere Daten während des Entwicklungsprozesses liefert, würde diese Entwicklungsstufe ihre Anwendung in der Phase direkt vor der Erstellung eines Prototypen finden.

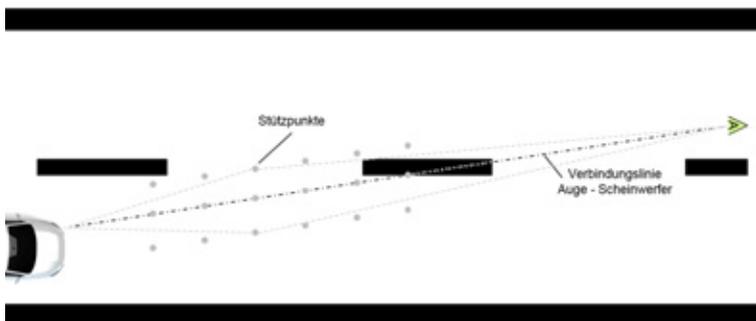


Abb. 6: Mögliche Stützpunkte zur Realisierung eines flächig integralen Ansatzes

Literaturverzeichnis:

- /1/ Insurance Institute for Highway Safety; „Headlight Test and Rating Protocol“, Ruckersville, VA, USA, 2016.
- /2/ J. Fischer, „Adaptive Schlechtwetterlichtverteilung zur Reduzierung der indirekten Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer auf nassen Fahrbahnen,“ in Tagungsband Licht 2014, Den Haag, 2014.
- /3/ B. Kleinert; „Blendungsbewertung von Kfz-Scheinwerfern – Was wird messtechnisch erfasst und was nicht?“, LuxJunior 2013, Dörfeld, 2013.
- /4/ B. Kleinert et al.; „Everybody’s talking about ADB – but what about APB?“ in: Proceedings Vision 2014
- /5/ B. Kleinert; „CAGE – Computer Aided Glare Evaluation of Automotive Headlamps“, ISAL 2015 Proceedings, Darmstadt, 2015.
- /6/ Ch. Werner; „Blendfreie dynamische Abblendlichtverteilung für Kfz-Scheinwerfer – Anforderungen und Validierung“, LuxJunior 2015, Dörfeld
- /7/ E.-O. Rosenhahn, „Entwicklung von lichttechnischen Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer für Schlechtwetterbedingungen“, Darmstadt: Darmstädter Dissertationen, 1999.
- /8/ <http://www.radiantvisionsystems.com>
- /9/ M. Seer; Ermittlung der Reflexionseigenschaften von Straßenoberflächen zur späteren Blendungsbewertung (nach TC4-45); Bachelorarbeit IAV, 2013
- /10/ Bogdanow, S.; Marutzky, M.; Kleinert, B.; Schulze, C.: „Testen am gesamten Lichtsystem“, ATZ 11/2013

Quantifizierung des Blend- und Ablenkpotenzials laserbasierter Scheinwerfersysteme

Helmer, Melanie, Neumann, Cornelius, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Problemstellung und Forschungsfragen

Der Anforderung dem Fahrer möglichst viel Licht zur Verfügung zu stellen um kritische Situationen während der Fahrt rechtzeitig erkennen zu können, steht die Problematik gegenüber neue Scheinwerfersysteme so auszulegen, dass andere Verkehrsteilnehmer nicht geblendet werden. Aus diesem Grund wurde beispielsweise das blendfreie Fernlicht entwickelt, bei dem der Fahrer permanent mit Fernlicht fährt, wobei entgegenkommende und vorausfahrende Fahrzeuge gezielt ausgeblendet werden.

Stand der Wissenschaft/Technik

Die Umsetzung eines solchen Systems ist meist abhängig von der verwendeten Lichtquelle. Seitdem Laser als (Zusatz-)Fernlicht eingesetzt werden, wird versucht, die gesetzlich erlaubte maximale Lichtstärke zugunsten maximaler Reichweite und Sichtweite auszureizen.

Forschungshypothesen und Versuchsaufbau

In einer volldynamischen Probandenstudie wurde evaluiert, ob die psychologische wie auch physiologische Blendung eines laserbasierten blendfreien Fernlichtes wirklich höher ist als die eines blendfreien Fernlichtes auf LED-Basis. Darüber hinaus wurde in einer weiteren volldynamischen Probandenstudie evaluiert inwiefern das Erkennungsmerkmal für den Einsatz einer Laserlichtquelle (blau leuchtende Linie im Scheinwerfer) zu Irritationen, längeren Blickzuwendungsdauern und einer damit verbundenen erhöhten Ablenkung führen kann.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Basierend auf den in den Studien gewonnenen Ergebnissen können Schlussfolgerungen in Hinblick auf das Blend-, Ablenk- und das etwaige Gefahrenpotenzial gezogen werden.

Quantifying the glare and distraction potential of laser based headlamp systems

*Helmer, Melanie
Neumann, Cornelius
Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Light Technology Institute(LTI)
Engesserstraße 13, Bldg. 30.34
76131 Karlsruhe
Phone: 0721/608-46735, Fax: 0721/608-42590
Email: M.Helmer@kit.edu Internet: www.lti.kit.edu*

Research issue

The requirements for new headlamp systems are: The driver will be provided with a maximum of light to identify critical situations as fast as possible. However, using more light could also mean a discomfort glare for other road users especially for oncoming traffic. For this reason, glare-free high beam systems were developed. In this case, the driver drives with their high beams permanently on and the regions with oncoming vehicles are detected and masked.

State of science/technology

The implementation of such a system depends on the light source which is used. Using a laser as light source for an additional high beam or a high beam in general, it's possible to achieve the maximum of the legally permitted illumination to get more visual range and visibility.

Research hypothesis and experimental setup

To quantify the effects of a laser based glare-free high beam on discomfort glare and also on safety aspects, a fully dynamic study was performed in comparison to a LED-based glare-free high beam system. A further fully dynamic study was performed to quantify the distraction potential of an additional blue accent light in combination with daytime running light or positioning light. This blue accent light is used to show the usage of a laser as light source to the customer.

Results in comparison with previous findings

Regarding safety, a critical increase in glare and distraction potential can be excluded based on the current results. However, it should be noted, that a major change of the system parameters could have different effects.

Quantifizierung des Blend- und Ablenkpotentials laserbasierter Scheinwerfersysteme

Helmer, Melanie

Neumann, Cornelius

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Lichttechnisches Institut(LTI)

Engesserstraße 13, Geb. 30.34

76131 Karlsruhe

Telefon: 0721/608-46735, Telefax: 0721/608-42590

Email: M.Helmer@kit.edu Internet: www.lti.kit.edu

Zusammenfassung

Zur Quantifizierung des Blend- und Ablenkpotentials laserbasierter Scheinwerfersysteme wurden zwei volldynamische Probandenstudien durchgeführt, die im Folgenden erläutert werden. In der ersten Studie wurde das Blendpotential eines laserbasierten blendfreien Fernlichts mit einem LED-basierten blendfreien Fernlicht sowie eines laserbasierten Fernlichtes und einem LED-basiertem Abblendlicht verglichen. Das Abblendlicht wurde von den Probanden als am wenigsten blendend bewertet. Die beiden zu testenden blendfreien Fernlichtsysteme wurden in etwa gleich, jedoch geringfügig schlechter als das Abblendlicht bewertet. Um den Einsatz eines Lasers als Lichtquelle im Scheinwerfer für den Nutzer sichtbar zu machen, wird ein zusätzlicher blauer Akzent in Linienform in den Scheinwerfer integriert. Dieser farbliche Akzent wird kombiniert mit dem Tagfahrlicht bzw. Positionslicht und könnte aufgrund der nicht üblichen Farbe für einen Scheinwerfer für andere Verkehrsteilnehmer ablenkend oder irritierend sein. Aus diesem Grund wurde die zweite Studie zum Ablenkpotential laserbasierter Scheinwerfersysteme durchgeführt. Ein erhöhtes Ablenkpotential konnte nicht nachgewiesen werden.

1 Motivation

Die Entwicklung neuer Lichtquellen im Bereich der Fahrzeugscheinwerfer schreitet so schnell voran wie noch nie. Im Fokus der Entwicklung stehen Reichweite, Sichtweite, Ausleuchtung und Komfort immer mit der Maßgabe verknüpft dem Fahrzeugführer mehr Sicherheit bei Fahrten in der Nacht zu bieten. Dem Fahrer soll folglich möglichst viel Licht zur Verfügung gestellt werden um die Fahrbahn optimal auszuleuchten und kritische Situationen rechtzeitig erkennen zu können. Um andere Verkehrsteilnehmer nicht zu blenden, wurden in der Vergangenheit verschiedene Systeme wie das blendfreie Fernlicht entwickelt. Der Fahrer fährt in diesem Fall permanent mit Fernlicht, wobei entgegenkommende und vorausfahrende Fahrzeuge ausgeblendet werden. Bei dem Modul, welches im Folgenden im Hinblick auf ein mögliches Gefahrenpotential untersucht wurde, handelt es sich um ein laserbasiertes blendfreies Fernlicht. Um den Einsatz eines Lasers für den Nutzer zu verdeutlichen, wurde zusätzlich ein linienförmiger und blau leuchtender Akzent in den Scheinwerfer integriert. Auch hier ist von einem möglichen Gefahrenpotential im realen Straßenverkehr auszugehen, der in einer weiteren Studie untersucht wurde.

2 Studie Blendpotential

2.1 Zielstellung und Konzept

Im Vordergrund dieser Untersuchung steht die Quantifizierung des subjektiven Blendpotentials des zu untersuchenden Scheinwerfersystems. Die im Folgenden beschriebene Studie unterteilt sich im Wesentlichen in die folgenden Teile:

- Auswahl kritischer Begegnungssituationen
- Messen der Beleuchtungsstärke für unterschiedliche Begegnungssituationen
- Voldynamische Feldstudie zur Blendbewertung

Im Hauptteil der Studie wird das subjektive Blendempfinden des laserbasierten blendfreien Fernlichtes mit dem eines LED-basierten blendfreien Fernlichtes verglichen. Beide Systeme arbeiten hierbei im adaptiven, blendfreien Modus. In der Studie gilt zu untersuchen, ob es Unterschiede in der subjektiven Blendbewertung beider Systeme gibt und inwiefern die Art der Begegnungssituation eine Rolle spielt. Abschließend kann eine Aussage über ein mögliches Gefahrenpotential getroffen werden.

2.2 Material und Methoden

Als Versuchsträger standen zwei BMW 7er mit jeweils einem LED-basierten und einem laserbasierten blendfreien Fernlicht zur Verfügung. Die Probanden fuhren mehrfach einen Rundkurs auf dem Hockenheimring mit einem Audi A6 Avant mit aktivierter Geschwindigkeitsregelanlage.

Passierte das Probandenfahrzeug die Lichtschranke wurde ein Signal über das Funkmodul an das jeweilige Fahrzeug der jeweiligen Warteposition weitergegeben. Das Fahrzeug beschleunigte auf 60km/h, sodass das blendfreie Fernlicht sicher aktiviert werden konnte. Nach Passieren der vier Sehzeichen bzw. nach jeder Begegnung wurden die Probanden gebeten am rechten Fahrbahnrand anzuhalten, um vier Fragen zur Bewertung der Erkennbarkeit und der Blendbewertung zu beantworten. Zum Abschluss der Testfahrt wurde ein weiterer Fragebogen an die Probanden ausgegeben, der die subjektiven Eindrücke zur Blendung im Straßenverkehr thematisierte.

Bei den Sehobjekten handelte es sich um Fußgängerattrappen mit einer Höhe von 1,77 m und einem Reflexionsgrad von $\rho=0,1$.

Aufgrund der Altersabhängigkeit des menschlichen Wahrnehmungsprozesses wurde ein Mindestalter von 55 Jahren für diese Studie festgelegt. Darüber hinaus wurde bei den 52 auswertbaren Probanden eine vergleichbare visuelle Leistungsfähigkeit vorausgesetzt.

2.3 Evaluation kritischer Begegnungssituationen

Da der Einfluss der physiologischen Blendung auf das Sehleistungsvermögen des Fahrers mit der Dauer der Blendung einhergeht, sind kurze und schnelle Begegnungssituationen von der Auswahl auszuschließen. Folglich sind lang gezogene Kurven und lange Geraden als kritisch zu betrachten.

Zur Messung der Blendbeleuchtungsstärke an Position des Fahrer Auges wurde ein weiteres Versuchsfahrzeug, ein BMW Rechtslenker, genutzt. Die gesetzlich vorgeschriebenen

Maximalwerte für den Messpunkt B50L wurden von beiden Systemen zu keinem Zeitpunkt überschritten, sodass diese als nicht blendend eingestuft werden konnten.

2.4 Quantifizierung der psychologischen Blendung in einer dynamischen Feldstudie

Zur Blendbewertung der beiden Scheinwerfersysteme wurde ein volldynamisches Versuchskonzept entwickelt. Dies erlaubt eine realitätsnahe Umsetzung, aufgrund der Miteinbeziehung der Dynamik beider sich begegnender Fahrzeuge.

Es handelt sich hier um ein Within-Subjects-Design, da alle Probanden den Rundkurs mit allen Begegnungssituationen durchfahren.

Bei erstmaligem Durchfahren des Rundkurses wurde den Probanden ein Ankerreiz dargeboten, indem ihnen in der Situation Kurve zunächst der BMW LED mit Abblendlicht und in der Situation Gerade der BMW mit Laserfernlicht entgegen kam. Alle anderen Situationen wurden randomisiert und mit aktiviertem blendfreien Modus durchgeführt. Die exakte Position der Begegnung musste so gewählt werden, dass der Proband das direkte Umschalten von Abblendlicht auf blendfreies Fernlicht nicht wahrnehmen kann. Jede Situation wurde von jedem Probanden dreimal durchlaufen (pro Runde je 2 Situationen).

2.5 Ergebnisse

Für die Auswertung war ausschließlich die Frage: „Inwiefern haben Sie sich durch die Scheinwerfer des Gegenverkehrs geblendet gefühlt von 1 - sehr stark bis 10 - gar nicht“ interessant. Die graphische Gegenüberstellung der subjektiven Blendbewertung für die jeweilige Begegnungssituation ist Abb. 1 mittels Boxplot dargestellt.

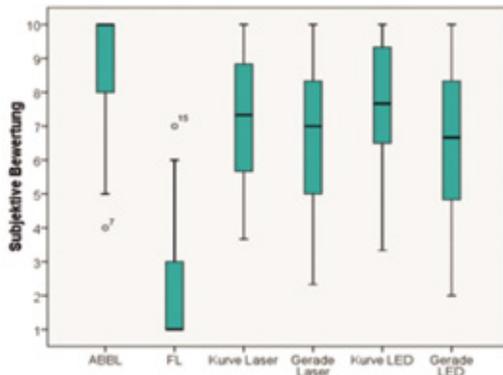


Abb.1: Boxplotdiagramm zur subjektiven Blendbewertung des Gegenverkehrs von ‚1-sehr stark‘ bis ‚10-gar nicht‘ in Abhängigkeit der Lichtfunktion bzw. Begegnungssituation

Aufgrund des Within-Subjects Designs wurde für die statistische Auswertung ein zweiseitiger t-Test herangezogen. Erwartungsgemäß liegen Mittelwert und Median der Blendbewertung für das Abblendlicht im oberen und das gezeigte Fernlicht deutlich im unteren Bereich. Die vier anderen untersuchten Situationen liegen dazwischen, jedoch näher an der Bewertung des Abblendlichts. Der Vergleich zwischen BMW Laser und BMW LED zeigt keine signifikanten Unterschiede ($p=0,149$) und keinen Effekt (standardisierte Differenz:

0,102) nach Cohen. Auch der Vergleich zwischen den beiden getesteten Begegnungssituationen ‚Kurve‘ und ‚Gerade‘ zeigt keine statistischen Unterschiede ($p=0,143$) und nur einen kleinen Effekt (standardisierte Differenz: 0,424) nach Cohen. Die berechneten Werte zeigen, dass sich weder Unterschiede zwischen beiden Scheinwerfersystemen noch zwischen beiden Begegnungssituationen nachweisen lassen.

3 Studie Ablenkpotential

3.1 Zielstellung und Konzept

Im Vordergrund dieser Studie steht die Quantifizierung des visuellen Ablenkpotentials des zu untersuchenden Scheinwerfersystems.

In der Feldstudie wird die Dauer der Fixationen auf den Scheinwerferbereich während der Fahrt mit und ohne Akzentbeleuchtung aufgenommen und miteinander verglichen. Die im Folgenden beschriebene Studie unterteilt sich im Wesentlichen in die folgenden Teile:

- Begutachtung durch Experten zur Bestimmung der kritischen Situationen
- Dynamische Studie zur Bestimmung der Fixationszeiten und Befragung der Probanden
- Befragung von Verkehrsteilnehmern (überwiegend Fußgänger) zur Bestimmung des Ablenkpotentials bei einem geparkten Fahrzeug

3.2 Material und Methoden

Als Versuchsträger stand ein BMW 5er mit einem modifizierten Scheinwerfersystem zur Verfügung, sodass u.a. die Einstellung der verschiedenen Helligkeiten der blauen Akzeptbeleuchtung möglich war.

Die Probanden fuhren einen Rundkurs im öffentlichen Verkehrsraum mit einem Audi A6 Avant mit integriertem Eye-Tracking-System. Während der Versuchsfahrt wurden verschiedene Begegnungssituationen von den Probanden durchfahren, wobei diese so ausgewählt wurden, dass sie auf langen geraden Streckenabschnitten mit geringem Ablenkpotential und geringer Verkehrsdichte (u.a. zur Vermeidung von Kolonnenfahrten) stattfanden. Die Versuchsfahrt beinhaltete auch eine Eingewöhnungszeit von etwa 20 Minuten. Die Probanden wurden vor der Fahrt nicht über den eigentlichen Untersuchungsgegenstand informiert.

Damit ein altersbedingter bzw. erfahrungsabhängiger Einfluss des Blick- und Fahrverhaltens ausgeschlossen werden kann und um die Streubreite gering zu halten, wurde für den Feldversuch eine Altersspanne von 18 bis 25 Jahren (Junge Fahrer mit geringer Fahrerfahrung) festgelegt. Darüber hinaus waren von den teilnehmenden Probanden optometrische Mindestanforderungen zu erfüllen.

Zum Abschluss der Testfahrt wurde ein Fragebogen an die Probanden ausgegeben, der die subjektiven Eindrücke während der Versuchsfahrt thematisierte. Nach Abschluss dieses Fragebogens wurde den Probanden das Versuchsfahrzeug präsentiert. Die Probanden wurden außerdem gebeten einen weiteren Fragebogen auszufüllen, in welchem die Probanden Aussagen über Design, mögliche Irritationen, Ablenkung, usw. machen sollten.

3.3 Expertenbegutachtung

Zur Identifizierung wurden verschiedene Experten herangezogen, welche die Aufgabe hatten, in Abhängigkeit von Entfernung und Helligkeit der blauen Inszenierung das Ablenkpotential basierend auf ihren Erfahrungswerten subjektiv einzuschätzen. Im Vorfeld wurden unter anderem in Abhängigkeit der Umgebungshelligkeit, der Entfernung und des Blickwinkels verschiedene Szenarien definiert, die durch die Experten begutachtet werden sollten. Daraus ergaben sich mögliche kritische Helligkeitsniveaus je nach Situation in Kombination mit Tagfahrlicht (Fahrt bei Tag) oder Positionslicht (Parkendes Fahrzeug bei Nacht).

3.4 Quantifizierung des Ablenkpentials in einer dynamischen Feldstudie

Zur Blendbewertung der beiden Scheinwerfersysteme wurde ein volldynamisches Versuchskonzept im Verkehrsraum entwickelt. Es handelt sich hier um ein Within-Subjects-Design, da alle Probanden den Rundkurs mit allen Begegnungssituationen durchfuhren. Insgesamt wurden 4 unterschiedliche Begegnungssituationen umgesetzt:

- Nur Tagfahrlicht (Referenz); TFL
- Tagfahrlicht und blaue Akzentbeleuchtung mit Helligkeitsniveau eines bereits zugelassenen Scheinwerfersystems; TFL50
- Tagfahrlicht und blaue Akzentbeleuchtung mit Helligkeitsniveau, welches kritisch sein könnte; TFL600
- Ausschließlich blaue Akzentbeleuchtung auf Maximalhelligkeit (Kontrollsituation); oTFL600

Die Reihenfolge der präsentierten Signalbilder erfolgte randomisiert, um Positionseffekte zu vermeiden. Ausgenommen ist hier die Kontrollsituation, die den Probanden immer als letztes präsentiert wurde.

3.5 Quantifizierung des Ablenkpentials eines geparkten Fahrzeugs

Das Fahrzeug wurde am Straßenrand mit Positionslicht sowie mit Positionslicht und der blauen Akzentbeleuchtung in den drei folgenden Helligkeitsniveaus platziert:

- Positionslicht ohne blaue Akzentbeleuchtung (Referenz)
- Positionslicht und blaue Akzentbeleuchtung mit Helligkeitsniveau eines bereits zugelassenen Scheinwerfersystems
- Tagfahrlicht und blaue Akzentbeleuchtung mit Helligkeitsniveau, welches kritisch sein könnte

Die Parkposition wurde längsseitig so ausgewählt, dass sich das Fahrzeug für jede Situation zwischen anderen Fahrzeugen befand und ein freier Blick auf Fahrzeug möglich war. Insgesamt wurden zu jeder Situation 30 passierende Fußgänger befragt, die zufällig ausgewählt wurden.

3.6 Ergebnisse

Die graphische Gegenüberstellung der Fixationszeiten für die jeweilige Begegnungssituation ist in Abb. 2 mittels Boxplots dargestellt.

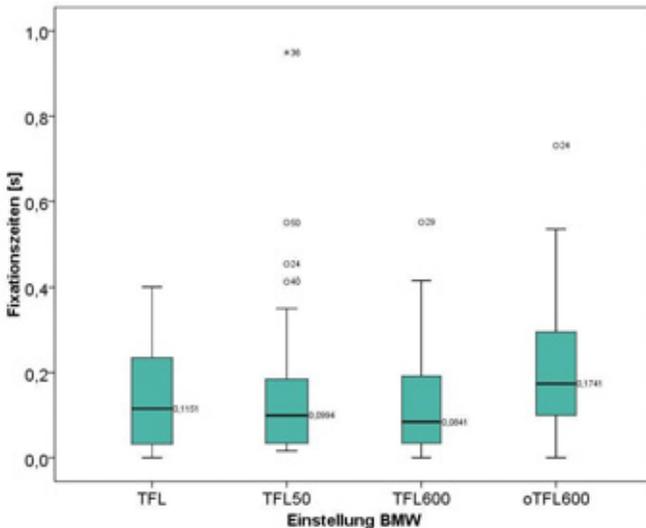


Abb. 2: Darstellung der gemessenen Fixationszeiten als Boxplots für alle simulierten Situationen (TFL - ausschließlich Tagfahrlicht; TFL50 - Tagfahrlicht+blaue Akzentbeleuchtung auf Vergleichsniveau; TFL600 - Tagfahrlicht+blaue Akzentbeleuchtung auf möglichem Niveau; oTFL600 - ausschließlich blaue Akzentbeleuchtung auf kritischem Niveau)

Erwartungsgemäß liegt der Median der Blickzuwendungszeit für die Begegnungssituation „oTFL600“ (bei der ausschließlich die blaue Akzentbeleuchtung gezeigt wurde um die Aufmerksamkeit gezielt auf den Scheinwerfer zu lenken) im Vergleich zu den anderen Situationen deutlich höher. Die statistische Analyse der Daten bestätigt die Annahme. Für die beiden Situationen Tagfahrlicht ohne blaue Akzentbeleuchtung und Tagfahrlicht mit blauer Akzentbeleuchtung auf Vergleichsniveau sich keine Signifikanz ($p=0,557$) und nach Cohen (standardisierte Differenz: 0,106) kein Effekt nachweisen.

Die Antworten des Fragebogens im direkte Anschluss an die Versuchsfahrt zeigte, dass sich nur wenige Probanden erst nach gezielten Fragen zum eigentlichen Untersuchungsgegenstand an das blaue Licht (Situation oTFL600) erinnern konnten. Auch bei der Befragung zum parkenden Fahrzeug in etwa 30% der Probanden die blaue Akzentbeleuchtung wahrgenommen. Der überwiegende Teil der Probanden hat das blaue zusätzliche Licht in beiden Studien als nicht störend empfunden.

4 Zusammenfassung

Basierend auf den Ergebnissen aus beiden Studien kann sowohl eine sicherheitskritische Erhöhung des Blendungspotentials des untersuchten laserbasierten blendfreien Fernlichts als auch eine sicherheitskritische Erhöhung des Ablenkpotentials der zusätzlichen blauen Akzentbeleuchtung im Scheinwerfer ausgeschlossen werden.

Einschränkend ist anzumerken, dass sich die Ergebnisse auf die jeweils untersuchten Aspekte und Systemparameter beziehen. Eine direkte Übertragbarkeit zu anderen Systemen ist in jedem Fall nicht ohne weiteres möglich und individuell zu prüfen.

Remote-Laser-Lichtquelle für das Automobil

Julien Hansen¹, Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker²

¹) L-LAB, Lippstadt, Deutschland, ²) TU Berlin, Berlin, Deutschland

1. Einführung

Die Anforderungen der Automobilhersteller an neuartige Lichtquellen steigen stetig, während die Licht emittierende Fläche immer kleiner werden soll, um neue Designmöglichkeiten eröffnen und gleichzeitig neue Lichtfunktionen generieren zu können. Heutige Beleuchtungseinheiten im Automobil, seien es die Scheinwerfer, als auch ambiante Innenbeleuchtungssysteme bis hin zu den Rückleuchten, werden dezentralisiert verbaut und angesteuert. Somit ist der Bauraum und Aufwand im aktuellen Stand der automobilen Beleuchtungstechnik ein signifikanter zu reduzierender Faktor, indessen neue Lichtfunktionen im Scheinwerfer trotz des geringeren Bauraums zur Verfügung stehen sollen.

2. Zielsetzung

Eines der primären Ziele ist die Bauraum- und Aufwandsreduzierung in Folge der Zentralisierung der Lichtquelle. Ein solches System setzt die Nutzung von Lichtwellenleitern voraus, um das emittierte Licht der zentralisierten Beleuchtungseinheit, in Form eines Lasers, zu den benötigten Positionen im Automobil zu führen. Die Motivation, einen Laser für die Remote-Lichtquelle zu nutzen, liegt in der möglichst effizienten Einkopplung in einen Lichtwellenleiter. Dies ermöglicht designtechnische Vorteile in der Automobilindustrie, da durch geringere Lichtaustrittsflächen gänzlich neue Fahrzeugfronten entwickelt werden können, wodurch den Herstellern ein Alleinstellungsmerkmal zugeordnet werden kann.

3. Lösungsansatz und Realisierungsgrad

Die Umsetzung einer Remote-Lichtquelle kann generell mit drei unterschiedlichen Ansätzen realisiert werden. Zum einen könnte das Licht direkt in dem Lichtwellenleiter erzeugt und somit am Ende der Faser emittiert werden. Für diesen Fall würde eine aktive Faser (beispielsweise Pr^{3+} dotierte Fluoridglasfaser) benötigt werden, welche mit einer Pumpdiode im nahinfraroten oder blauen Spektralbereich gespeist wird. Mit Hilfe von verspiegelten Endflächen der aktiven Faser können die unterschiedlichen optischen Übergänge (unter anderem RGB) zur stimulierten Emission angeregt werden. Ein erster Versuchsaufbau wurde bereits umgesetzt und die simultane, spontane Emission der Faser im roten, grünen und blauen Spektralbereich nachgewiesen. Eine zweite Option wäre die Erzeugung eines „weißen Lasers“, indem ein mit Pr^{3+} -Ionen dotierter Kristall über einen angepassten Resonator zur stimulierten Emission angeregt wird. Da die Übergangswahrscheinlichkeiten der verschiedenen Wellenlängen unterschiedlich ausgeprägt sind, muss die Reflektivität des (dielektrischen) Auskoppelspiegels für jeden Wellenlängenbereich separat angepasst werden. Somit soll verhindert werden, dass eine dieser drei Wellenlängen zu dominant wird und dass diese die angeregten Atome der vorhandenen Besetzungsinversion für sich allein beansprucht. Ein dritter Ansatz wäre die Zusammenführung von mehreren Laserdioden über einen Faserkoppler. Dieser funktioniert wie eine Art optische Weiche, in welcher jede Laserdiode in eine separate Faser mit einem Querschnitt Q_1 eingekoppelt wird. Diese einzelnen Fasern sind in einem optischen Koppler verbaut, indem mehrere Fasern in eine weitere Faser mit dem Querschnitt $Q_2 > Q_1$ übergehen.

Remote-Laser-Light Source in Automotive Lighting

Julien Hansen¹, Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker²

¹) L-LAB, Lippstadt, Deutschland, ²) TU Berlin, Berlin, Deutschland

1. Introduction

The requirements on new headlamps technologies increase steadily, while the light emitting surface should decrease, in order to open up new design opportunities. Current illumination devices in automotive lighting, as for example headlamps, are installed and controlled separately for each unit. This means the light sources are integrated decentralized. Therefore the constructed space in current automotive lighting units needs to be significantly reduced, whereas new lighting functions for headlamps shall be still available.

2. Objective

One of the principle objectives is to reduce the constructed space and the effort due to the centralization of the light source. Such a system supposes the use of glass fibres, in order to guide the laser light from the centralized illumination device to the required positions in the car. The motivation to use a laser for the Remote-Light Source is the efficient coupling of the light into the waveguide. This technology enables advantages for the design, because the small emitting surface allows the automotive manufacturers to build an entire new vehicle front. Hence they could get associated with a unique selling point.

3. Approach and Degree of Realisation

Basically there are three different approaches in order to realise a Remote-Laser-Light Source. One approach would be to generate the white light in an active fibre. This would require a Pr³⁺-doped fluoride glass fibre, which gets pumped by blue or near-infrared emitting laser diodes. When applying a reflective coating on the end surfaces of the fibre, the optical transitions (e.g. RGB) could get stimulated. A first setup has shown that the fibre generates a spontaneous emission of red, green and blue light simultaneously. Another idea would be to realise a "white laser" by using a Pr³⁺-doped crystal, which gets stimulated by a suitable resonator. Due to the fact that the transition probabilities differ depending on the different wavelengths, the reflectivity of the (dielectric) output mirror needs to be adjusted for each wavelength. Hence it should be avoided that one of the wavelengths gets dominant and disposes the whole population inversion. The third approach is the superposition of multiple laser diodes by using a fibre multiplexing element. Therefore each laser diode gets coupled into a single fibre having a diameter of Q_1 . These single fibres are connected to a fibre coupling element, which merges the fibres to a single output fibre with a diameter $Q_2 > Q_1$.

Remote-Laser-Lichtquelle für das Automobil

Julien Hansen¹, Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker²

¹) L-LAB, Lippstadt, Deutschland

julien.hansen@l-lab.de

²) TU Berlin, Berlin, Deutschland

stephan.voelker@tu-berlin.de

Zusammenfassung

Vorgestellt werden drei verschiedene Ansätze, durch welche eine laserbasierte Weißlichtquelle in die automobilen Beleuchtungstechnik integriert werden sollen. Ziel hierbei ist es, eine Remote-Lichtquelle für das Automobil zu entwickeln. Dies beinhaltet eine Entkopplung der Lichtquelle aus dem Scheinwerfer, welche durch die Anwendung von Lichtwellenleitern die Nutzung des Lichts in verschiedenen Bereichen des Automobils ermöglichen soll (Frontscheinwerfer, Rückleuchten, Innenraum). Bislang werden die Lichtquellen für jeden Bereich dezentral verbaut und angesteuert. Die aktuelle Technik benötigt somit einen großen Bauraum für die einzelnen Lichtsysteme. Dieser kann durch eine zentralisierte Remote-Laser-Lichtquelle reduziert werden.

1 Motivation und Zielsetzung

Die Anforderungen der Automobilhersteller an neuartige Lichtquellen steigen stetig. Dabei soll die Licht emittierende Fläche immer kleiner werden, um neue Designmöglichkeiten zu eröffnen. Der Wunsch nach bislang nicht genutzten Lichtquellen führt somit zu einem wichtigen Wettbewerbsaspekt und immer komplexer werdenden Konzepten. Ein aktueller Ansatz ist die Verwendung laserbasierter Technologien im Hauptscheinwerfer. Die Kühlung heutiger laserbasierter Systeme ist aber äußerst aufwendig, der notwendige Bauraum im Vergleich zur LED sehr groß. Aus diesem Grund und aufgrund des für andere Lichtfunktionen geringen Strahlungsflusses kann der Laser bislang nur als Zusatzfernlicht angeboten werden. Ein „Voll-Laser Scheinwerfer“ ist demnach derzeit nicht realisierbar, da nicht ausreichend Lichtstrom im ECE Weißbereich zur Verfügung gestellt werden kann.

Den Laser im automobilen Scheinwerfer zu nutzen bietet allerdings einen evidenten Vorteil, welcher in der effizienten Einkopplung des Lichts in Glasfasern liegt. LEDs und andere inkohärente Lichtquellen können kaum oder nur unter Hinnahme großer Verluste in Lichtwellenleiter eingekoppelt werden, wohingegen eine kohärente Lichtquelle über einfache Fokussierung in eine Glasfaser mit sehr geringen Querschnitten eingespeist werden kann. Da die lichttechnischen Systeme in der Automobilindustrie zunehmend laserbasierte Scheinwerfer nutzen werden, wäre die Nutzung von Laserdioden in Kombination mit Fasern eine ideale Ergänzung bzw. ein Ersatz für die vorhandenen Systeme. Die Motivation eine Laserdiode für die Remote-Lichtquelle zu nutzen, liegt also zunächst in der möglichst effizienten Einkopplung in einen Lichtwellenleiter. Somit ist die Effizienzsteigerung, im Gegensatz zur Einkopplung diffuser Strahlung, ein zentraler Aspekt, der genutzt werden soll. Weiterhin können durch die Nutzung von Laserstrahlung aufgrund der höheren Leuchtdichte einer Laserdiode wesentlich kleinere Lichtaustrittsflächen realisiert werden. Im Zuge dessen kann der benötigte Bauraum durch die Zentralisierung der Lichtquelle stark verringert werden. Dies ermöglicht designtechnische Vorteile, da durch geringere Lichtaustritts-

flächen komplett neue Fahrzeugfronten entwickelt werden können, wodurch Automobilherstellern ein Alleinstellungsmerkmal zugeordnet werden kann.

Grundsätzlich gibt es drei Ansätze, um eine Remote-Laser-Lichtquelle zu realisieren. Das weiße Licht, welches die Lichtverteilung generieren soll, wird in einer aktiven Glasfaser bzw. in einem aktiven Lichtwellenleiter erzeugt. Somit muss lediglich eine Pumpquelle eingekoppelt werden. Eine weitere Option wäre die Kombination dreier, separater Laserdioden mit den drei spektralen Komponenten Rot, Grün und Blau mit Hilfe eines Nx1 Faserkopplers. Ein letzter Ansatz wäre die Einkopplung eines räumlich kohärenten breitbandigen Spektrums in den Lichtwellenleiter. Dieser letzte Ansatz setzt also die Entwicklung eines Weißlichtlasers voraus, der räumlich kohärentes (und möglichst auch polarisiertes) weißes Licht emittiert. Die Polarisation dieses Lasers könnte zusätzlich genutzt werden, um mit Hilfe eines LC-Displays effizient einen hochaufgelösten Scheinwerfer zu realisieren. Diese drei verschiedenen Ansätze werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

2 Umsetzungsmöglichkeiten der Remote-Laser-Lichtquelle

Die skizzierten Umsetzungsmöglichkeiten zur Realisierung einer Remote-Laser-Lichtquelle werden in Abbildung 1 graphisch dargestellt. Zudem sind die Ansätze in den folgenden Kapitel ausführlich beschrieben.

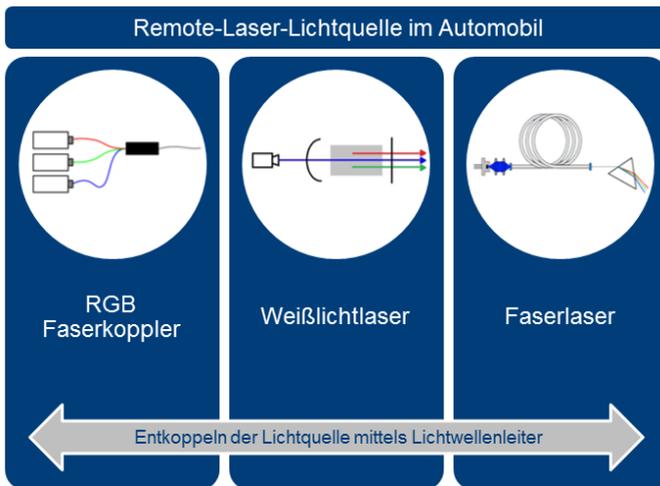


Abbildung 1: Konzepte zur Realisierung der Remote-Laser-Lichtquelle für das Automobil

2.1 RGB Faserkoppler

Durch diese Technologie kann eine Remote-Laser-Lichtquelle umgesetzt werden, welche ausreichend Lichtstrom zur Verfügung stellt, um eine Abblendlichtverteilung mit etwa 1000 lm aus einer runden Emissionsfläche $d_{\text{out}} \approx 200 \mu\text{m}$ zu realisieren. Hierfür sollen mehrere rote, grüne und blaue Laserdioden mittels eines Fasermultiplexers in eine einzelne Ausgangsfaser überführt werden. So kann beispielsweise ein einzelner 9x1 Faserkoppler genutzt werden, um neun unterschiedliche Laserdioden in einer Faser zu überlagern und durch geschickte Wahl der RGB-Komponenten ein ECE Weiß zu emittieren.

Um die spektralen Anteile der Laserdioden für eine bestimmte Farbkoordinate gewichten zu können, wurde ein Programm entwickelt, welches ein Verhältnis für einzelne spektrale Komponenten für eine Wunschkoordinate in der zweidimensionalen CIE1931 Normfarbtafel (für einen Standard 2°-Beobachter) berechnet (siehe Abbildung 2). Ein Beispiel wurde anhand der auf dem Markt kommerziell verfügbaren Laserdioden berechnet.

- Rote LD bei $\lambda_{\text{rot}} = 635 \text{ nm}$ mit einem optischen Strahlungsfluss von $P_{\text{rot}} = 1,8 \text{ W}$.
- Grüne LD bei $\lambda_{\text{grün}} = 520 \text{ nm}$ mit einem optischen Strahlungsfluss von $P_{\text{grün}} = 1 \text{ W}$.
- Blaue LD bei $\lambda_{\text{blau}} = 445 \text{ nm}$ mit einem optischen Strahlungsfluss von $P_{\text{blau}} = 3,5 \text{ W}$.

Werden diese Laserdioden in Kombination mit einem 9x1 Fasermultiplexer angenommen, so müssten vier rote Laserdioden, vier grüne Laserdioden und eine blaue Laserdiode genutzt werden. Dies geht aus vorangegangenen Berechnungen der prozentualen Verteilung von diskreten RGB Spektrallinien hervor, um ein additives Farbmischungsverhältnis zu erreichen, welches möglichst nah an dem ECE Weißbereich liegt. Das resultierende Gesamtspektrum aller Laserdioden mit maximalem Strahlungsfluss wird in Abbildung 3 dargestellt. Um die angegebene Wunschkoordinate im „Unbuntpunkt“ ($x=0,33; y=0,33$) mit dem Gesamtspektrum erreichen zu können, wurde mit Hilfe des Programms eine Neugewichtung des Gesamtspektrums vorgenommen. Das daraus resultierende Zielspektrum wird in Abbildung 4 gezeigt.

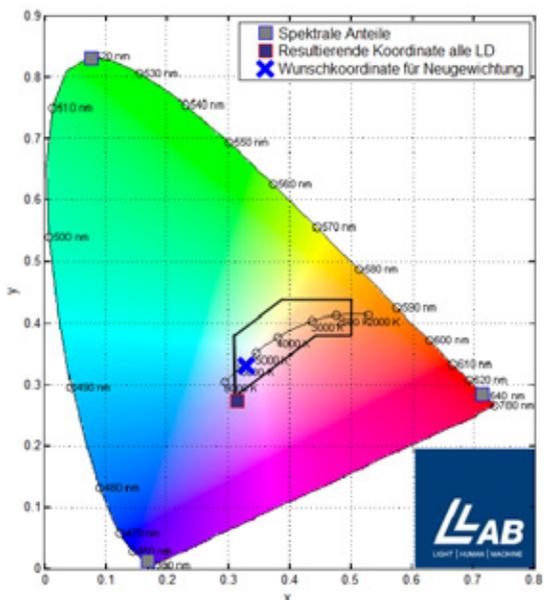


Abbildung 2: CIE1931 Normfarbtafel zeigt die Farbkoordinaten für das resultierende Gesamtspektrum aller Laserdioden und die Wunschkoordinate für die Neugewichtung des Gesamtspektrums

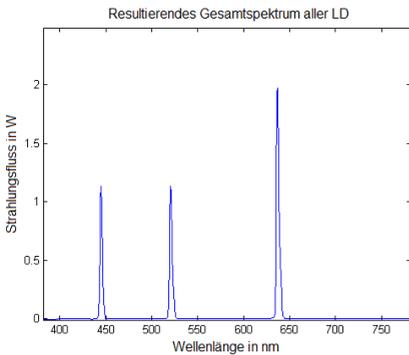


Abbildung 3: Gesamtspektrum aller Laserdioden mit maximalem Strahlungsfluss

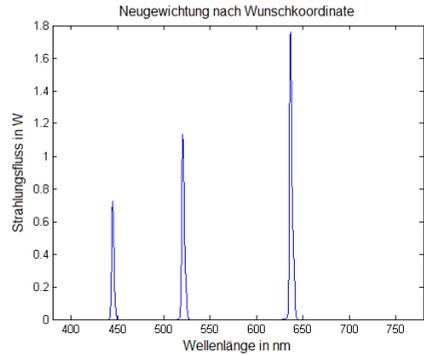


Abbildung 4: Neugewichtung des Spektrums nach angegebener Wunschkoordinate ($x=0,33$; $y=0,33$)

Bei der Nutzung eines 9x1 Faserkopplers mit einer Neugewichtung des Spektrums, wie sie in Abbildung 4 gezeigt wird, könnte somit ein Lichtstrom von etwa 2900 lm aus einer Emissionsfläche von etwa 200 μm erreicht werden (der Wert berücksichtigt bereits die ermittelten Koppelverluste des Fasermultiplexers). Das Potential dieses Systems zur Realisierung einer Remote-Laser-Lichtquelle wird in den kommenden Jahren stetig steigen, da immer leistungsstärkere Laserdioden mit besser werdenden Abstrahlcharakteristiken auf den Markt kommen. Somit kann ein größerer Strahlungsfluss in den Fasermultiplexer eingekoppelt und additiv überlagert werden.

2.2 Festkörper-Weißlichtlaser

Eine effiziente Einkopplung von weißem Licht in eine Glasfaser zur Realisierung der Remote-Lichtquelle setzt einen weißen Laserstrahl voraus, da diffuse Weißlichtquellen nur mit hohen Verlusten in Lichtwellenleiter eingekoppelt werden können.

Dieser Ansatz beschäftigt sich mit der Entwicklung einer räumlich kohärenten Weißlichtlaserquelle. Diese soll auf Basis eines $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ Kristalls (im Folgenden nur als $\text{Pr}:\text{YLF}$ bezeichnet) realisiert werden. Das dreifach positive Ion Pr^{3+} dient als aktives Element, welches mehrere Emissionslinien im roten, grünen und blauen Spektralbereich aufweist (721 nm, 698 nm, 640 nm, 607 nm, 523 nm und 479 nm) [1]. Mit Hilfe dieses aktiven Mediums wurden bereits kompakte grün oder rot emittierende Laser aufgebaut. Bislang emittieren diese Laser allerdings ein schmalbandiges Spektrum auf nahezu einer Wellenlänge - ein monochromatisches Licht. Das mit $\text{Pr}:\text{YLF}$ mögliche Emissionsspektrum soll genutzt werden, um die simultane Emission von RGB aus einem laseraktiven Material zu realisieren. Als optische Pumpquelle können für das Praseodym-Ion unterschiedliche Wellenlängen dienen. Durch geschickte Wahl der Pumplichtquelle im blauen Wellenlängenbereich muss der Weißlichtlaser lediglich grün und rot emittieren. Die nicht absorbierte Pumpstrahlung könnte in Transmissionsrichtung mit der emittierten Strahlung additiv überlagert werden. Schematisch ist dieser Vorgang in Abbildung 5 dargestellt.

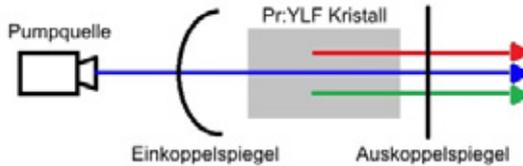


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Festkörper-Weißlichtlasers

Die Auslegung des Resonators spielt für die Realisierung eines Festkörper-Weißlichtlasers eine essenzielle Rolle, da die Verstärkung durch stimulierte Emission für Grün und Rot ungefähr zu gleichen Anteilen umgesetzt werden muss. Dies ergibt sich aus dem Lawineneffekt, welcher für die Verstärkung einer einzelnen Wellenlänge andernfalls vorherrscht, sodass der Laser monochromatisch emittieren würde.

Diese Abstimmung kann in einem Ringresonator-Aufbau mittels eines „Konfigurationsarms“ umgesetzt werden. Mittels dieses zusätzlichen Strahlengangs soll bei dem Laser durch selektive Rückkopplung von roter und grüner Spektrallinie die Verstärkung kontrolliert eingestellt werden. Diese Konfiguration besitzt das Potential, die beiden Farben kollinear zu emittieren, ohne einen weiteren Mischprozess mit zusätzlichen Optiken umzusetzen. [2]

Ohne große Verluste hinnehmen zu müssen, kann nun dieser emittierte Weißlichtstrahl über eine fokussierende Optik in einen Lichtwellenleiter eingekoppelt werden, um somit die Remote-Laser-Lichtquelle zu realisieren.

2.3 Weißlicht-Faserlaser

Eine weitere Realisierungsmöglichkeit der Remote-Laser-Lichtquelle würde in der Nutzung einer aktiven Glasfaser liegen. Bei diesem Ansatz müssten die roten, grünen und blauen spektralen Anteile nicht in die Faser eingekoppelt werden, sondern durch die Einkopplung einer einzelnen Pumpwellenlänge in der Faser erzeugt werden. Das dreifach positiv geladene Pr^{3+} Ion dient für die Fluoridglasfaser als optisch aktives Medium. Aufgrund der verschiedenen optischen Übergänge im Praseodym können unter anderem Rot, Grün und Blau emittiert werden. In vorangegangenen Arbeiten von SALEWSKI [3] und HELLMIG [4] konnte gezeigt werden, dass ein Aufkonversionsfaserlaser auf Basis von Pr^{3+} , Yb^{3+} codotierten Fluoridglasfasern eine dynamische Farbumschaltung der einzelnen optischen Übergänge realisieren kann. Die Farbumschaltung wurde durch die Variation der Luftspaltstärke zwischen Resonatorspiegel und Faserende ermöglicht, durch welche sich eine Änderung der Reflexionseigenschaften des Spiegels einstellt. [4]

Ein solches System soll dahingehend weiterentwickelt werden, dass eine simultane Emission der verschiedenen optischen Übergänge möglich ist. Dieser Ansatz setzt eine neue Konfektionierung der von HELLMIG genutzten Fasern voraus, während zusätzlich der Resonator neu ausgelegt werden muss, da die dynamische Farbumschaltung nicht mehr gewünscht ist. Der Faserlaser soll kontinuierlich grün und rot emittieren, während das blaue Pumplicht teilweise transmittiert wird, um mittels additiver Farbmischung von RGB in den ECE Weißbereich zu gelangen.

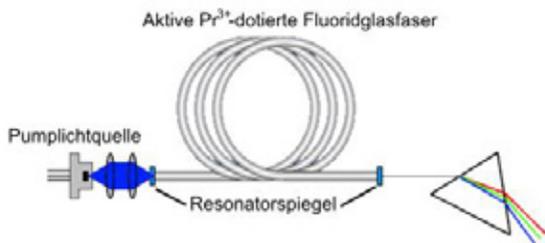


Abbildung 6: Schematische Darstellung eines Weißlicht-Faserlasers (nach SALEWSKI [3])

Die Gewichtung der einzelnen spektralen Anteile kann in diesem System über die Reflektivitäten der Resonatorspiegel sowie über zusätzliche Pumplichtquellen zur Verstärkung selektiver Wellenlängen realisiert werden. Somit ist es mit Hilfe dieses Systems möglich, das weiße Laserlicht direkt in der Faser zu erzeugen und als Remote-Laser-Lichtquelle zu verwenden. Denkbar wäre es ebenfalls, hinter die aktive Faser einen zusätzlichen Lichtwellenleiter zu positionieren, um das generierte Licht an die gewünschten Positionen im Automobil zu führen.

3 Fazit und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass mittels Lichtwellenleiter das Potential besteht, die Lichtquelle vom Scheinwerfer oder von anderen Beleuchtungssystemen im Automobil zu entkoppeln. Die Remote-Laser-Lichtquelle würde eine Platzersparnis im Scheinwerfer mit sich bringen, weshalb komplett neue Designoptionen zur Verfügung stünden. Der Arbeitsaufwand zur Realisierung der Remote-Laser-Lichtquelle ist bei den drei Ansätzen abweichend. Während der RGB Faserkoppler kurzfristig eine adäquate Lösung für die neuartige Lichtquelle im Automobil darstellt, muss für die zwei anderen Systeme noch ein großer Entwicklungsaufwand betrieben werden. Es wird derzeit an den Umsetzungen aller drei Systeme im Labor gearbeitet, weshalb bislang noch keine Ergebnisse für einen experimentellen Laboraufbau veröffentlicht werden können.

4 Quellenverzeichnis

- [1] M. Strotkamp (2013): „Kompakte, grün emittierende Laser auf Basis von Pr:YLF“, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- [2] F. Siebe (1999): „Aufbau und Charakterisierung eines Zwei-Farben Dauerstrich Ti:Saphir Lasers“, Diplomarbeit, Physikalisches Institut, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main
- [3] S. Salewski (2005): “Mehrfarbig emittierende, diodenerregte Aufkonversions-Laser auf Basis Pr, Yb-dotierter Fluoridglasfasern”, Dissertation, Fachbereich Physik, Universität Hamburg
- [4] O. Hellmig (2010): „Steuerung und Effizienzerhöhung von Praseodym und Erbium dotierten Fluoridglas-Aufkonversionsfaserlasern“, Dissertation, Fachbereich Physik, Universität Hamburg

Neue Methode zur Simulation von Volumenstreuung – Anwendungsfall: Nebel und Regen im Straßenverkehr

*Michael Marutzky, Benedikt Kleinert, Sven Bogdanow,
Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (IAV) GmbH*

Problemstellung

IAV hat in der Vergangenheit messtechnische und simulative Methoden entwickelt, die durch Kfz-Scheinwerfer verursachte Blendung festzustellen und zu bewerten. Dabei werden äußere Einflüsse wie zum Beispiel regennasse Fahrbahnen berücksichtigt. Der folgende Beitrag befasst sich mit der simulativen Bewertung der im Nebel und Regen auftretenden Lichtstreuung, die zur Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führt. Herkömmliche Lichtsimulationsprogramme nutzen Ray-Tracing-Verfahren, welche die Brechung, Reflexion und Streuung an Übergängen zwischen Medien gut abbilden. Beim vorliegenden Thema handelt es sich allerdings um eine Volumenstreuung mit Vielfachstreuung im Medium. Daher wird hier eine neue physikalisch fundierte Methode zur Berechnung von Beleuchtungsstärkeverteilungen bei Volumenstreuung vorgestellt, die kein Ray-Tracing nutzt.

Ziel

Ziel ist die Berechnung räumlicher Beleuchtungsstärkeverteilungen bei Auftreten von Volumen-(Vielfach)-Streuung, insbesondere bei Nebel und Regen. Die Berechnung soll physikalisch begründet und exakt, ohne Hilfskonstruktionen auskommen und innerhalb von Minuten bis Stunden durchführbar sein. Die vorgestellte Methode soll frühzeitig im Entwicklungsprozess zur Optimierung blendfreier Scheinwerfersysteme dienen.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Herkömmliche Ray-Tracing-Verfahren können Volumen-(Vielfach)-streuung ohne hohen Rechenaufwand schlecht abbilden. In der Praxis werden oft Hilfskonstruktionen wie streuende Flächen, die das streuende Volumen ersetzen, genutzt. Dieses ist physikalisch nicht fundiert. Bei der entwickelten Bewertungsmethode wird die Streuung des Lichts im Impulsraum betrachtet. Im Impulsraum ähnelt die Streuung über die Lichtlaufzeit einem Diffusionsvorgang und ist formal durch die Diffusionsgleichung berechenbar. Aus der Rücktransformation in den Realraum resultiert die Beleuchtungsstärkeverteilung. Somit beruht die Berechnung auf grundlegenden physikalischen Prinzipien ohne zusätzliche Modelle.

Realisierungsgrad

Aus dem Lichtstärkeverteilungskörper, hier gegeben durch ein ies-File, wird die Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Fahrbahn, einem Testschirm und am Auge des entgegenkommenden Fahrers im Passivvorgang berechnet. Dies geschieht in Abhängigkeit von der Sichtweite, also der Dichte des Nebels bzw. Regens. Somit ist eine Optimierung der Lichtverteilung der Scheinwerfer an die jeweiligen Sichtbedingungen möglich.

Die gegenwärtig programmierte Umsetzung der Methode rechnet auf einem herkömmlichen Arbeits-PC mit Intel 7-Kern Prozessor. Die Bewertung eines ies-Files mit 10^6 Messpunkten dauert ca. eine Stunde.

New method for the simulation of volume scattering – application: fog and rain in road traffic

Michael Marutzky, Benedikt Kleinert, Sven Bogdanow, Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (IAV) GmbH

Issue

IAV is developing metrological and simulative methods for the evaluation of glare caused by headlamps. These methods also consider environmental conditions like a wet road which is leading to strong indirect glare illuminances. In this contribution, a new simulative method for determination of multiple light scattering in volumes is presented which we apply in the stated context for the calculation of glare illumination in fog and rain. Most programs for light simulation are using raytracing methods. Raytracing is suitable for the consideration of reflexion and scattering at interfaces between different media very well, but the treatment of multiple scattering inside a volume is rather difficult. Often, artificial interfaces are modelled which are replacing the optical properties of a volume which is physically not correct. Therefore a new method for the calculation of multiple volume scattering which does not use raytracing but is fast and physically substantiated will be presented.

Aim

The calculation of the spatial illuminance distribution in case of volume scattering, in particular due to fog and rain. The calculation should be physically substantiated and work without any artificial models and be performed in minutes or at least hours. Finally, a tool should be created for the optimization of headlamps in adverse weather situations in regard to glare and perceptibility very early in the development process before the first prototypes are built.

Description of the innovation/»best practice«

The new method is using the momentum space. In momentum space the scattering process is similar to a diffusion process and thus can be described formal by the diffusion equation. The spatial illumination distribution results from back transformation into the real space. Therefore, the presented method is physically substantiated and works without any artificial models in comparison to conventional raytracing methods.

Level of realization

The illuminance distributions from the headlamp's light intensity distribution which was given as ies-file was calculated: on the road, on a test screen, and during a passing situation on a sensor mounted on an oncoming car. This was done in dependence of the density of the fog respectively the visibility range. Consequently, an optimization of the headlamps light distributions with respect to visibility conditions is possible.

The calculation period is quite short and takes approximately one hour on a conventional working PC with Intel 7-core processor for the evaluation of an ies-file with 10^6 measurement values. Therefore results can be generated cost-effectively within a short time.

Neue Methode zur Simulation von Volumenstreuung – Anwendungsfall: Nebel und Regen im Straßenverkehr

*Michael Marutzky, Benedikt Kleinert, Sven Bogdanow
Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (IAV) GmbH
Rockwellstraße 3, 38518 Gifhorn, Deutschland*

Zusammenfassung

Lichtsimulationen erlauben es, die photometrische Performance eines Scheinwerfers bereits vor dem Aufbau von Prototypen zu bewerten. Bei diesen meist Ray-Tracing-basierten Berechnungen werden in der Regel Brechung, Reflexion und Streuung an den Grenzflächen zwischen zwei Medien betrachtet. In Medien wie Nebel findet allerdings eine Streuung im Volumen statt. Dieses ist mit Ray-Tracing schwer zu fassen. Häufig werden künstliche Ersatzflächen angewandt, die die optischen Eigenschaften des streuenden Volumens modellieren. Das ist physikalisch nicht exakt. Wir zeigen eine physikalisch fundierte, alternative Methode, die ohne Hilfskonstruktionen auskommt und schnell ist. Als Anwendungsbeispiel werden räumliche Lichtverteilungen eines Abblendlichts in Abhängigkeit von der Nebeldichte kalkuliert, mit dem Ziel, Erkennbarkeit zu erhöhen und Blendung zu reduzieren.

1 Einleitung

Das übergeordnete Ziel unserer Arbeit ist, Fahrzeugbeleuchtung in Versuch und Simulation umfassend zu bewerten um Erkennbarkeiten zu maximieren, Blendungen zu minimieren und so zur Steigerung der Verkehrssicherheit beizutragen. Dabei müssen die jeweiligen Umfeldbedingungen berücksichtigt werden.

So entwickelten wir mit CAGE ein Tool, das die direkte und die bei nasser Straße auftretende indirekte Blendbelastung berechnet, die das Scheinwerfersystem am Fahrzeug bei einem Passivvorgang bei dem entgegenkommenden Fahrer verursacht. Das geschieht simulativ, so dass gegebenenfalls noch sehr früh im Entwicklungsprozess vor dem Aufbau seriennaher Prototypen optimiert werden kann /1/. In /2/ stellten wir eine Methode vor, um den Verlauf der Erkennbarkeitslinien in Abhängigkeit vom Scheinwerfersystem und der Straßenbeschaffenheit zu bestimmen. Auch hier können nasse Straßen als Umfeldparameter berücksichtigt werden. Die Entwicklung messtechnischer Methoden zur Bewertung von Scheinwerfern am Fahrzeug berichteten wir z.B. in /3/.

Als weitere äußere Bedingung soll in diesem Beitrag zunächst simulativ der Einfluss von Nebel und Regen auf Sichtbarkeit und Blendung erfasst werden. Hierbei stößt man auf die Schwierigkeit, dass eine Zerstreung des Lichts nicht an einer Grenzfläche zwischen zwei Medien stattfindet, sondern kontinuierlich im Volumen. Somit ist das Nachverfolgen der Strahlen, also das Ray-Tracing, erschwert. An anderer Stelle wird dieses Problem gelöst, indem künstlich Flächen eingeführt werden, die das Verhalten des streuenden Volumens modellieren.

Hier präsentieren wir eine Lösungsmöglichkeit, die ohne Hilfskonstruktionen auskommt und auf physikalischen Prinzipien beruht. Der Rechenaufwand dabei ist relativ gering und kann auch auf gewöhnlichen Arbeitsrechnern erfolgen.

Die vorgestellte Methode ist allgemeingültig und kann auf beliebige Strahlungsarten und beliebige homogene, streuende Medien übertragen werden. Hier allerdings betrachten wir die Anwendung „Scheinwerferlicht bei Nebel und Regen im Straßenverkehr“, um unserem oben geschilderten, übergeordneten Ziel zu dienen.

2 Theorie

Die Betrachtung wird unter folgenden physikalischen Voraussetzungen gemacht:

- Die Zerstreuung des Lichts im Nebel erfolgt durch elastische Streuung (z.B. Mie-Streuung), d.h. es gibt keine Resonanzen oder Absorptionen. Für sichtbare Wellenlängen ist dieses auch in Wassernebel der Fall. Sollte ein Medium oder ein Wellenlängenbereich betrachtet werden, für die Absorptionsbanden auftreten, muss diese Behandlung wellenlängenabhängig gemacht werden und es muss zusätzlich zur Streuung die Dissipation berücksichtigt werden.
- Das Medium, d.h. der Nebel ist isotrop, was sicherlich real der Fall ist. In ihm breitet sich das Licht mit der wellenlängenabhängigen, effektiven Materiallichtgeschwindigkeit $c_N(\lambda)$ aus. Mit „effektiv“ ist gemeint, dass man quasi ein effektives Medium aus Luft und Wassertropfen hat.
- Unter der Voraussetzung von isotroper elastischer Streuung ist der Impuls und Wellenvektor des Lichts $\vec{p} = \hbar \vec{k}$ immer parallel zur Ausbreitungsrichtung des Lichts. Der Betrag von \vec{p} ist zeitlich konstant. Der Wellenvektor hängt mit der Wellenlänge zusammen: $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$. Die gesamte sich zeitlich und räumlich ausdehnende Lichtmenge ist konstant.
- Die Betrachtung wird aus dem Scheinwerferbezugssystem gemacht.

Unter diesen Voraussetzungen kann die Beleuchtungsstärke für jeden Punkt $(r_p, \theta_p, \vartheta_p)$ im streuenden Medium mit

$$E(r_p, \theta_p, \vartheta_p) = \int_{\theta, \vartheta} \frac{I(\theta, \vartheta)}{r_p^2} \bar{n}(t, d(\theta_p, \vartheta_p, \theta, \vartheta)) d\theta d\vartheta \quad (1)$$

berechnet werden. $I(\theta, \vartheta)$ ist der Lichtstärkeverteilungskörper, \bar{n} eine Gaußverteilung, die von der Nebeldichte abhängt, d der Winkelabstand zwischen (θ_p, ϑ_p) und (θ, ϑ) und t die Lichtlaufzeit zum Punkt $(r_p, \theta_p, \vartheta_p)$. Da die Herleitung dieser Gleichung aufwändig ist, werden die Anwendung und die Präsentation der Ergebnisse vorgezogen und die mathematische Herleitung im letzten Kapitel präsentiert. Dort befinden sich auch die notwendigen Stellungnahmen zur Wellenlängenabhängigkeit des Streuprozesses, die in (1) implizit enthalten sind.

3 Anwendung und Ergebnisse

Die vorgestellte Theorie ist durchaus allgemeingültig. Die Anwendung ist hier aber die Bewertung von Scheinwerfern bei schlechter Sicht in Hinblick auf Blendung und Erkennbarkeit um letzten Endes Scheinwerfer für Schlechtwetter-Situationen optimieren zu können. In Abbildung 1 wurde für verschiedene Nebeldichten α die Abblendlichtverteilung eines Scheinwerfers in Anlehnung an die photometrischen Anforderungen der ECE-Regularien am 25m-Messschirm dargestellt. Zusätzlich sind die Hell-Dunkel-Grenze sowie der Messpunkt B50L

angedeutet. Letzterer stellt in den ECE-Regularien einen wichtigen Messpunkt zur Bewertung von Gegenverkehrblendung dar. Erwartungsgemäß führt zunehmende Streuung dazu, dass zunehmend Licht aus dem hellen zentralen Bereich in den Außenbereich gelangt, wodurch die Hell-Dunkel-Grenze aufweicht und die Beleuchtungsstärke am Punkt B50L ansteigt.

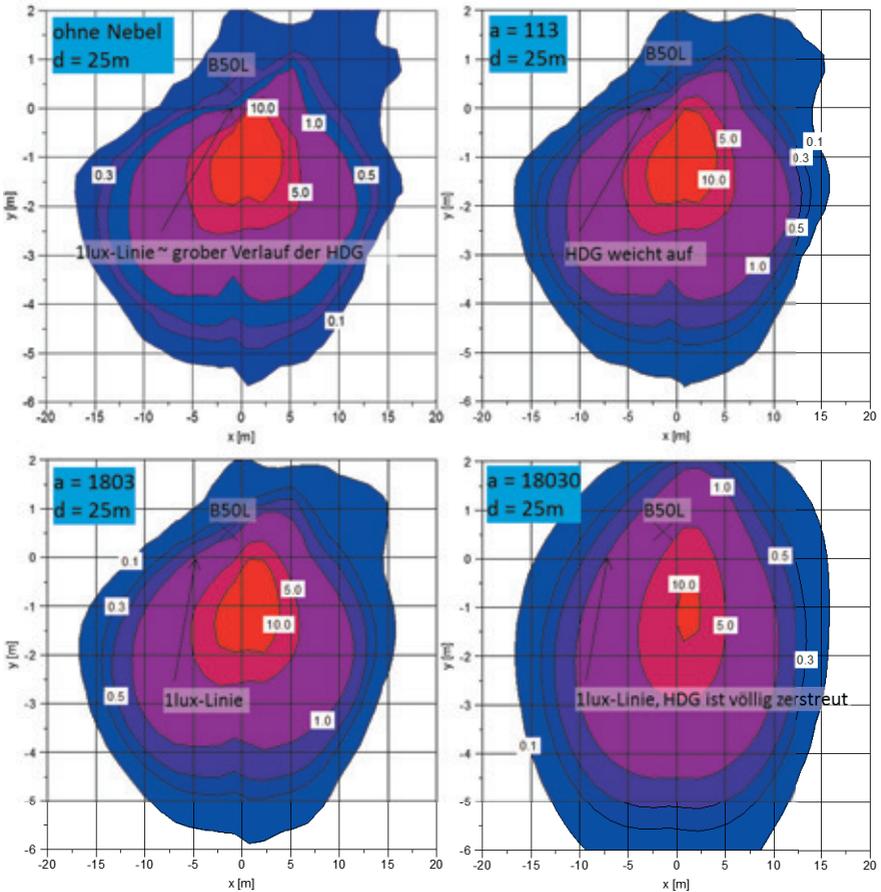


Abb. 1: Mit Hilfe des vorgestellten Verfahrens berechnete Beleuchtungsstärkeverteilung am Messschirm in 25m Arbeitsabstand mit farblich codierten Isolux-Bereichen. Mit zunehmender Nebeldichte a wird Licht aus dem Zentralbereich herausgestreut. Dadurch weicht die Hell-Dunkel-Grenze (HDG) auf und die Beleuchtungsstärke im Punkt B50L nimmt zu. Die Beschriftung der Linien ist in lux.

Als weiteres Anwendungsbeispiel wird die Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Straße mit Scheinwerfer in einer Anbauhöhe von 0,65m berechnet, wiederum unter Einfluss von Nebel (Abbildung 2). Betrachtet man in Abbildung 2 exemplarisch die 1 lux-Linie, fällt auf, dass diese mit zunehmender Nebeldichte an den Scheinwerfer heranwandert und sich in den Bereich der Gegenfahrbahn verbreitert. Des weiteren löst sich die HDG, wie bereits in Abbildung 1 gezeigt, zunehmend auf.

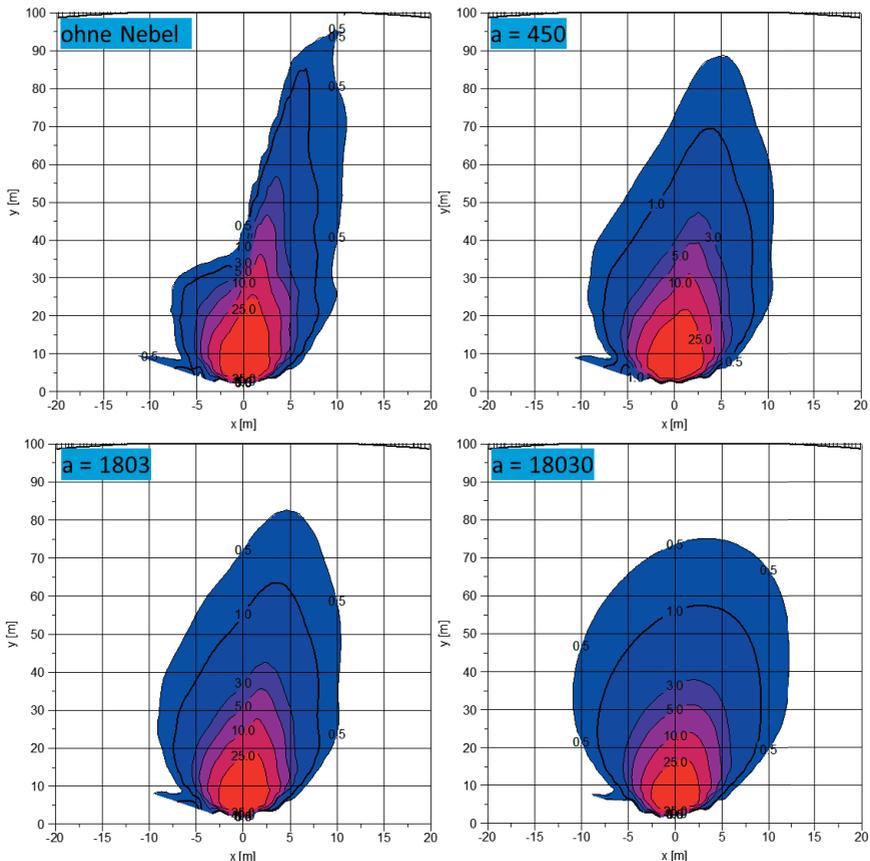


Abb. 2: Die berechnete Beleuchtungsstärkeverteilung eines Abblendlichtscheinwerfers auf der virtuellen Straße bei unterschiedlichen Nebeldichten und einer angenommenen Scheinwerferanbauhöhe von 0,65m. Die Beschriftung der Linien ist in lux.

4 Diskussion und Ausblick

Die präsentierten ersten Ergebnisse sind vielversprechend und geeignet, um Beleuchtungsstärkeverteilungen bei Auftreten von Volumenstreuung, z.B. im Nebel, zu berechnen. Die vorgestellte Methode wird nach weiterer Ausreifung in unser Blendungsbewertungstool CAGE integriert, um der simulativen Bewertung von Scheinwerferlichtverteilungen in Schlechtwettersituationen zu dienen. Damit ist eine Optimierung des optischen Konzeptes frühzeitig im Entwicklungsprozess möglich.

Die vorgestellte Methode betrachtet die Volumenstreuung, z.B. im Nebel, als statistischen Prozess, beruht auf physikalischen Prinzipien und kommt ohne Hilfskonstrukte aus. Sie ist zudem schnell, denn die gezeigten Lichtverteilungen wurden in dieser ersten experimentellen Umsetzung jeweils auf einem gewöhnlichen Arbeits-PC (Intel i7) in der Größenordnung

von einer Stunde berechnet. Dabei wurde das Integral aus Formel (1) punktweise berechnet, noch ohne algorithmische Optimierung oder Anpassung an Rechenarchitekturen. Es ist zu erwarten, dass eine ausgereifere Umsetzung noch kürzere Rechenzeiten erzielt.

Auf der lichttechnischen Seite ist der gegenwärtige Stand unserer Arbeit, die noch abstrakte Größe a , die mathematisch eine Halbwertsbreite und physikalisch die einer Streurate (Einheit rad^2/s) darstellt. Diese gilt es experimentell mit der Sichtweite in Beziehung zu setzen. Dabei ist eine Abhängigkeit von der Art des Nebels oder des Regens zu erwarten (insbesondere die Verteilung der Tröpfchengröße). Darauf folgend wird die Methode auf die Berechnung von Leuchtdichteverteilungen erweitert, da die Erkennbarkeit eines Objekts von seinem Kontrast zum Umfeld abhängt, der sich wiederum aus Leuchtdichten berechnet. Dazu muss künftig zusätzlich die Abschwächung des Lichtes bei seinem Rücklauf zum Auge berechnet werden.

5 Mathematische Herleitung

Rigoros muss, wie geschildert, die Behandlung wellenlängenabhängig gemacht werden. In der Tat ist Streuung ein dispersiver Prozess. Da allerdings im Nebel eine starke Durchmischung aller Wellenlängen stattfindet, ist die Dispersion nicht erkennbar. Somit nutzen wir die photometrischen Größen wie etwa die Lichtstärke I , die gewichtete Integrationen der spektralen radiometrischen Größen darstellen und führen später die Herleitung im Gedanken eines „mittleren“ Impulses und einer „mittleren“ Lichtgeschwindigkeit zu Ende. Dies vereinfacht die Berechnung, die Herleitung ist allerdings prinzipiell auch unter Berücksichtigung der Wellenlängenabhängigkeit möglich.

Wir gehen von der, bei automotiven Lichtsimulationen gängigen, Näherung des Scheinwerfers als Punktlichtquelle aus. Wir schauen auf alle Lichtstrahlen n_0 einer Wellenlänge λ , die sich in eine Richtung (θ, ϑ) ausbreiten. Im Impulsraum befinden sich alle diese Lichtstrahlen im Punkt $\vec{p}_{\lambda, \theta, \vartheta} = \hbar \vec{k}_{\lambda, \theta, \vartheta}$ und zwar ohne Streuung und Absorption für alle Zeiten t . Wenn Streuung einsetzt, werden einige Lichtstrahlen aus ihrer Richtung bzw. ihrem Punkt im Impulsraum herausgestreut, mit der Zeit immer mehr. Da keine Absorption auftritt, bleibt der Betrag von $|\vec{k}|$ konstant, d.h. alle Lichtstrahlen befinden sich im Impulsraum auf einer Kugel mit Radius $|\vec{k}|$. Quasi diffundieren, getrieben durch Streuung, im Impulsraum mit der Zeit alle Lichtstrahlen aus dem ursprünglichen Punkt über die gesamte Kugeloberfläche. Das gleicht der Diffusion eines Stoffes in einem Medium, scheinbar getrieben durch ein Konzentrationsgefälle, mikroskopisch jedoch durch Streuung unter Molekülen verursacht oder zur Diffusion von Wärme in einem Medium, scheinbar getrieben durch einen Temperaturgradient, mikroskopisch aber ebenfalls als Streuprozess unter Quasiteilchen verursacht. Somit kann der hier betrachtete Lichtstreuungsprozess im Impulsraum nach dem 2. Fick'schen Gesetz analog der Diffusions- bzw. Wärmeleitungsgleichung beschrieben werden: $\partial_t n = \text{const} \partial_x^2 n$. Die Lösung auf der Kugeloberfläche ist in etwa die Gaußverteilung in zwei Dimensionen:

$$n(\alpha_{Imp}) = n_0 \frac{1}{4\pi a t} e^{-\frac{\alpha_{Imp}^2}{4a t}} \quad (2)$$

Dabei ist $n(\alpha_{Imp})$ die Anzahl der Lichtstrahlen, die nach der Lichtlaufzeit t sich im Winkel von α_{Imp} gegenüber der anfänglichen Ausbreitungsrichtung im Impulsraum befinden. Die Konstante a beschreibt die Stärke der Streuung und ist daher ein Maß für die Nebeldichte bzw. die Sichtweite.

Gleichung (2) beschreibt die zeitliche und räumliche Verteilung des Lichts im Impulsraum. Für die Betrachtung von Beleuchtungsstärkeverteilungen im Straßenverkehr muss die Verteilung in den realen Ortsraum übertragen werden. Dazu wird der Wellenvektor in zwei orthogonale Komponenten zerlegt: $k_{\perp} = |\vec{k}| \sin \alpha_{Imp}$ sowie $k_{\parallel} = |\vec{k}| \cos \alpha_{Imp}$ mit $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$. Diese werden als Basisvektoren des Impulsraums betrachtet. Die des Ortsraums ergeben sich aus $k_{\perp, \parallel} e_{\perp, \parallel} = 2\pi$, was aus der abstrakten aber allgemeingültigen Fouriertransformation folgt. Der Winkel im Ortsraum folgt aus $\tan \alpha_{Orts} = \frac{e_{\perp}}{e_{\parallel}}$. Zusammengefügt bekommt man für die Winkelkoordinate im realen Ortsraum: $\alpha_{Orts} = \arctan \cot \alpha_{Imp}$. Während im Impulsraum die radiale Komponente $|\vec{k}|$ zeitlich unverändert bleibt, breitet sie sich im Radialraum mit der effektiven Materiallichtgeschwindigkeit $c_N(\lambda)$ aus: $|\vec{r}| = c_N(\lambda) t$.

Soweit kann man jetzt bei gegebener Nebeldichte a und der Anfangsintensität n_0 für jeden Punkt $(|\vec{r}|, \alpha_{Orts})$ im Realraum mit zugehöriger Laufzeit $t = |\vec{r}|/c_N(\lambda)$ mit (1) die Intensität $n(|\vec{r}|, \alpha_{Orts})$ bzw. $n(t, \alpha_{Orts})$ angeben.

Dieser Argumentation kann man entgegenhalten, dass diese nur für die Lichtstrahlen gilt, die auf kürzestem Weg zu $(|\vec{r}|, \alpha_{Orts})$ gelangen. Aber auch für Lichtstrahlen mit einer größeren Laufzeit als t gilt (1). Man hat dann eine Überlagerung mehrerer Gaußfunktionen mit unterschiedlichen t , doch die Überlagerung mehrerer Gaußfunktionen ergibt wieder eine Gaußfunktion wie (2), z.B. mit a^* anstatt a . Der genaue Zusammenhang zwischen a^* und der Sichtweite muss an anderer Stelle theoretisch betrachtet oder experimentell „kalibriert“ werden. Dies ist Gegenstand unserer laufenden Untersuchung.

Kommen wir nun zur Betrachtung der Beleuchtungsstärkeverteilung. Die obige Herleitung gilt eigentlich für Lichtstrahlen einer Wellenlänge. Um auf eine photometrische Größe zu kommen muss (1) mit seiner impliziten Wellenlängenabhängigkeit im sichtbaren Wellenlängenbereich mit der Gewichtungsfunktion $V(\lambda)$ abintegriert werden. Wie zuvor beschrieben gilt (1) dann für einen mittleren Impuls und eine mittlere Materiallichtgeschwindigkeit. Für die Beleuchtungsstärke gilt somit $E \sim \bar{n}(t, \alpha_{Orts})/|\vec{r}|^2$. In der automobilen Lichttechnik ist es gebräuchlich, den Scheinwerfer als Punktlichtquelle zu betrachten und durch den Lichtstärkeverteilungskörper (LVK) $I(\theta, \vartheta)$ zu beschreiben. Der betrachtete Punkt P im realen Ortsraum habe die Koordinaten $(r_P, \theta_P, \vartheta_P)$. Dann berechnet sich ohne Nebelstreuung die Beleuchtungsstärke in P zu

$$E(r_P, \theta_P, \vartheta_P) = \frac{I(\theta_P, \vartheta_P)}{r_P^2} \quad (3)$$

In dem Fall, das Volumenstreuung auftritt, wird Licht aus den anderen Elementen von $I(\theta, \vartheta)$ in P mit eingestreu und zwar mit einer Wahrscheinlichkeit $\bar{n}(t, \alpha_{Orts})$:

$$E(r_P, \theta_P, \vartheta_P) = \int_{\theta, \vartheta} \frac{I(\theta, \vartheta)}{r_P^2} \bar{n}(t, d(\theta_P, \vartheta_P, \theta, \vartheta)) d\theta d\vartheta \quad (\text{vgl. 1}).$$

An die Stelle von α_{Orts} trat der Winkelabstand $d(\theta_P, \vartheta_P, \theta, \vartheta)$ zwischen (θ_P, ϑ_P) und (θ, ϑ) .

/1/: B. Kleinert et al., Proceedings 12th ISAL, Darmstadt (2015)

/2/: M. Marutzky et al., Proceedings 11th ISAL, Darmstadt (2013)

/3/: M. Marutzky et al., CIE Experts Symposium, Wien (2014)

Entwicklung eines Versuchstandes zur ortsaufgelösten Leuchtdichtemessung von Fahrradscheinwerfern nach DIN 33958

Ingo Herzog, Oliver Dannberg, Richard Roeder, Benjamin Rudolf, Alexander Behr, Christoph Schierz / TU Ilmenau

Problemstellung und Forschungsfragen

Für die Vermessung von Fahrradscheinwerfern existieren bisher Versuchsstände mit punktuellen Beleuchtungsstärkemessgeräten. Da die punktuelle Messung zeitaufwändig ist, sollte ein transportabler, schnell aufzubauender Messstand mit einer Leuchtdichtemesskamera (LMK) entwickelt werden. Dieser ermöglicht es, das gesamte Leuchtdichtebild eines Fahrradscheinwerfers in 10 m Entfernung ortsaufgelöst aufzunehmen und für eine spätere Auswertung zu speichern.

Stand der Wissenschaft/Technik

Nach DIN 33958:2013 werden neun Messpunkte und eine Messregion zur Charakterisierung der Beleuchtungsstärkeverteilung und der Bestimmung der Zulässigkeit des Scheinwerfers im Bereich der StVZO benutzt. Die einzelnen Messpunkte dürfen in 10 m Entfernung eine maximale Ausdehnung von 65 mm x 65 mm haben. Diese sind über eine Fläche von 4,09 m² (2,80 m x 1,46 m) annähernd gleichmäßig verteilt. Die gesamte Lichtverteilung des Scheinwerfers wird bei dieser Charakterisierung völlig außer Acht gelassen.

Forschungshypothesen

Mit der Leuchtdichtemessung mittels LMK ist eine deutlich genauere und aussagekräftigere Charakterisierung der Beleuchtungsstärke- bzw. Leuchtdichteverteilung möglich, da nicht nur die Messwerte der einzelnen Felder ermittelt werden, sondern die Werte der gesamten Lichtverteilung.

Versuchsaufbau

Der entwickelte Versuchsaufbau besteht im Wesentlichen aus einer LMK, einer definierten Arretierung für beliebige Fahrradscheinwerfer und einer beliebigen diffus reflektierenden Messwand mit bekanntem Reflexionsgrad. Darüber hinaus wurden in der Auswertesoftware die in DIN 33958 geforderten zehn Messfelder implementiert, um die Zulässigkeit des Fahrradscheinwerfers im Bereich der StVZO zu beurteilen.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

In dem Messverfahren können nun alle Messwerte gleichzeitig ermittelt werden. In der Auswertesoftware wurden alle zehn Messfelder eingefügt, so dass in relativ kurzer Zeit alle Regionen gleichzeitig ausgewertet werden können. Die Umrechnung der ermittelten Leuchtdichten in die Beleuchtungsstärken, welche von der DIN 33958 verwendet werden, ist unter Berücksichtigung des Reflexionsgrades der Wand oder Leinwand möglich. Somit ist eine Kompatibilität zu den bisherigen Zulassungsbedingungen gegeben. Der neue Versuchsaufbau wurde für unterschiedliche Fahrradscheinwerfer mit Hochdruckentladungslampen oder LED-Lampen getestet.

Entwicklung eines Versuchstandes zur orts aufgelösten Leuchtdichtemessung von Fahrradscheinwerfern nach DIN 33958

Ingo Herzog, Oliver Dannberg, Richard Roeder, Benjamin Rudolf, Alexander Behr, Christoph Schierz / TU Ilmenau

1. Einleitung

Durch die fortschreitende Entwicklung der LED werden Fahrradscheinwerfer immer heller. Waren bei Scheinwerfern mit Glühlampen als Leuchtmittel im hellsten Punkt noch 20 lux Beleuchtungsstärke (gemessen in 10 m Entfernung zum Scheinwerfer) üblich, sind heute mit den modernen Leuchtmitteln 40-50 lux oder höher keine Seltenheit.

Nach DIN 33958:2013 werden neun Messpunkte und eine Messzone zu der Charakterisierung des Leuchtbildes und der Bestimmung zur Zulässigkeit des Scheinwerfers im Bereich der StVZO benutzt. Die einzelnen Messpunkte dürfen in 10 m Entfernung eine maximale Fläche von 65 mm x 65 mm haben. Der Aufbau wird in 10 m Entfernung vor der zu untersuchenden Leuchte senkrecht aufgebaut und der hellste Punkt des Leuchtdichtefeldes sollte im horizontalen und vertikalen Schnittpunkt (H-V) liegen.

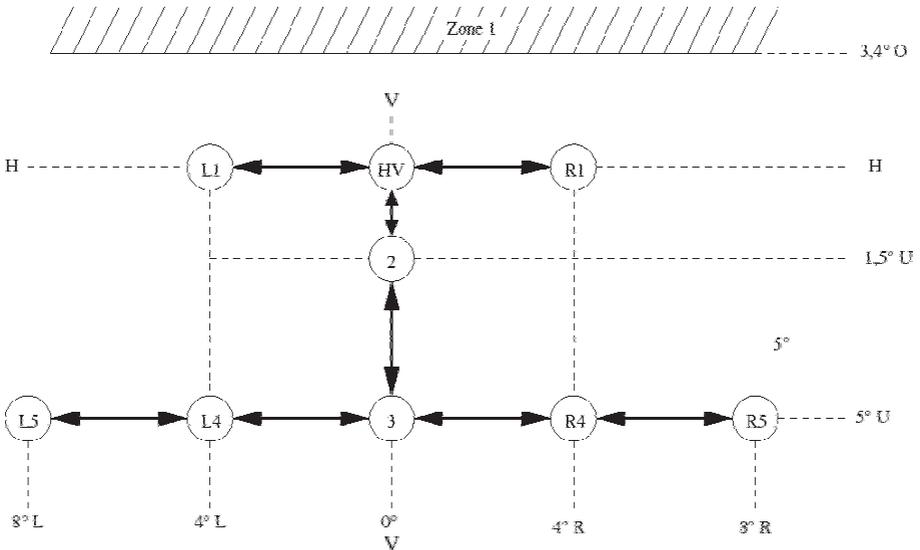


Abbildung 1: Messpunkte nach DIN 33958:2013 zur Bewertung eines Fahrradscheinwerfers

Den größten zu untersuchenden Bereich gibt die Zone 1 an, die $3,4^\circ$ oberhalb des Punktes H-V liegt. Diese Zone bestimmt die Hell-Dunkel-Grenze und in diesem Bereich darf eine Beleuchtungsstärke von 2 lux nicht überschritten werden. Alle weiteren Messpunkte sind symmetrisch horizontal in 4° - und 8° -Schritten und vertikal in $1,5^\circ$ - bzw. 5° -Schritten um den Punkt H-V angeordnet. Nach DIN 33958:2013 soll in dem Punkt H-V die maximale Beleuchtungsstärke erreicht werden. Die anderen Punkte dürfen ein Minimum nicht unterschreiten und müssen in einem bestimmten Verhältnis zum Maximalwert stehen. Diese zehn Messflächen sind über einen Bereich von $4,09 \text{ m}^2$ ($2,80 \text{ m} \times 1,46 \text{ m}$) annähernd gleichmäßig verteilt. Die gesamte Lichtverteilung des Scheinwerfers wird bei dieser Charakterisierung völlig außer Acht gelassen.

Üblicherweise werden diese zehn Messflächen mit Luxmetern mit kreisförmiger Empfängerfläche charakterisiert. Je nach Verfügbarkeit werden die zehn Messpunkte gleichzeitig (bei 10 vorhandenen gleichen Luxmetern) oder nacheinander ermittelt.



Abbildung 2: Gesamtaufbau des Geräteträgers

Mit der Leuchtdichtemessung mittels LMK (Leuchtdichtemesskamera) ist eine deutlich genauere und aussagekräftigere Charakterisierung der Beleuchtungsstärke- bzw. Leuchtdichteverteilung möglich, da nicht nur die Messwerte der einzelnen Felder ermittelt werden, sondern auch die Werte der gesamten Lichtverteilung. Dies zeigt auch einen weiteren Vorteil des Systems, da nun alle Messwerte gleichzeitig ermittelt werden können und nicht nacheinander.

Ein weiteres Ziel der Konstruktion sollte ein einfacher standardisierter Aufbau auch in nicht speziell für die Messung von Fahrradscheinwerfern vorbereiteten Versuchsräumen sein. So ist mit unserem Versuchsaufbau eine Bewertung von Scheinwerfern in Räumen möglich, die mindestens 11 m Länge, 5 m Breite und eine weiße und matte Fläche besitzen. Dies können weiß gestrichene Wände oder einige Leinwände sein. Von vornherein war es ein Ziel, die Konstruktion in möglichst kurzer Zeit aufbauen zu können und trotzdem die Fehlerrate beim Aufbau durch Standardisierung so gering wie möglich zu halten.

2. Aufbau

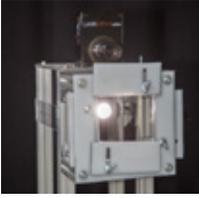


Abbildung 3:
Anordnung von Kamera
und Scheinwerfer im
Geräteträger

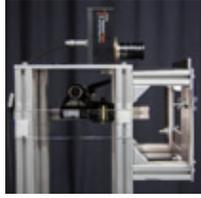


Abbildung 4:
Seitenansicht des
Geräteträgers

Der Messstand ist so aufgebaut, dass er leicht zu transportieren ist. Dazu sind die zur Stabilisation nötigen Ausleger klappbar konstruiert. Die zu untersuchende Fahrradleuchte wird in 1,40 m Höhe auf einem Aluminiumrohr befestigt. Die Montage erfolgt „über Kopf“. Dies hat den Vorteil, dass es im oberen Bereich der Wand mehr Platz zur Darstellung des Leuchtdichtebildes gibt. Weiterhin hat somit die Leuchtdichtemesskamera, welche oberhalb der Fahrradleuchte montiert ist, weniger Winkerversatz zur zu bewertenden Fläche. Die LMK wird über einen Anschlag in einer Position fixiert.

3. Messmethode

In der Auswertesoftware sind alle zehn Messfelder über eine Maske eingefügt, so dass in relativ kurzer Zeit alle Regionen gleichzeitig ausgewertet werden können. Dazu stehen alle in der Software möglichen Funktionen zur Verfügung. Üblicherweise und vor allem für die Anforderungen der DIN 33958:2013 von Bedeutung sind die Grauwertstatistiken, die den Maximal-, den Minimal- und den Mittelwert ausgeben.

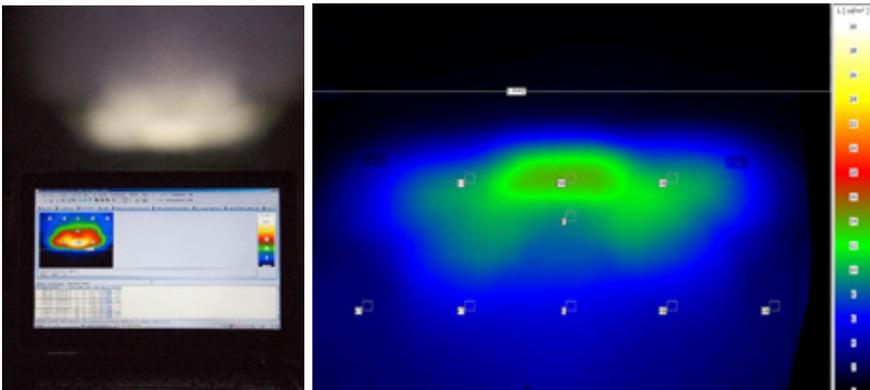


Abbildung 4: links: Vergleich zwischen Falschfarbenbild und realem Leuchtdichtebild
rechts: eingebettete Maske der Messregionen in das Falschfarbenbild

Die Umrechnung der Leuchtdichte in die Beleuchtungsstärke, die von der DIN 33958:2013 verwendet wird, ist unter Berücksichtigung des Reflexionsgrades der Wand oder Leinwand möglich. Dieser muss dafür natürlich im Vorfeld ermittelt werden. Die Umrechnung geschieht mit der Formel:

$$E_v = \frac{L_v * \pi * \Omega_0}{\rho}$$

Die Konstruktion wird mit fünf im Handel erhältlichen Fahrradleuchten getestet, welche alle eine Zulassung für den Bereich der StVZO haben. Es werden bewusst unterschiedliche Lichtsysteme ausgewählt. Ein Scheinwerfer besitzt eine Gasentladungslampe, alle anderen haben LEDs als Lichtquellen. Bei den LED-Scheinwerfern ist ein Vertreter dabei, der mittels Linsenprojektion arbeitet. Außerdem gibt es eine Fahrradleuchte, die zusätzlich ein sogenanntes Offroadlicht eingebaut hat. Diese Funktion darf nicht im Straßenverkehr eingesetzt werden.

Alle diese Scheinwerfer zeigen ein völlig unterschiedliches Leuchtbild, obwohl sie alle die DIN 33958:2013 erfüllen.

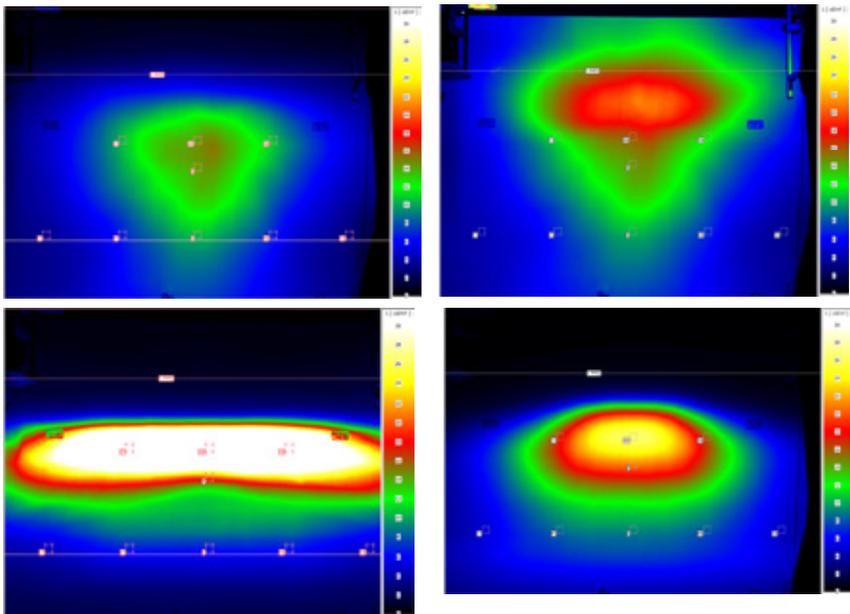


Abbildung 6: links der Scheinwerfer mit Gasentladungslampe, rechts mit LED und Linsenprojektion

Auswirkung der thermischen Sanierung der Gebäudehülle auf die Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht

Roman Alexander Jakobiak, daylighting.de

Problemstellung und Forschungsfragen

Die energetische Sanierung von Fassaden wirkt sich auf die Tageslichtversorgung der Innenräume in einem Gebäude aus. Der Grund hierfür sind der Austausch bzw. die Änderung von Bauteilen, die die Tageslichtbeleuchtung wesentlich beeinflussen.

Stand der Wissenschaft/Technik

Obwohl bekannt ist, dass sich die thermische Sanierung von Gebäuden auf die Tageslichtbeleuchtung auswirkt, wurde dieser Zusammenhang bislang kaum systematisch untersucht.

Versuchsaufbau

Untersucht wurden Sanierungsprojekte aus den in IEA SHC Task 47 und Task 50 betrachteten Fallstudien. Als Kenngrößen zur Einschätzung der Änderung des Tageslichtniveaus durch die Sanierung wurden die effektive Fensterfläche und der Tageslichtquotient vor und nach Sanierung herangezogen.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

- In allen Projekten, in denen der Fensterflächenanteil nicht erhöht wurde, führte die Sanierung der Fassade zu einer erheblichen Minderung des Tageslichtniveaus, diese lag im Mittel bei 28 %.
- In 15 von 18 Fällen war eine ausreichende Tageslichtversorgung mit einem Tageslichtquotienten $> 2\%$ nach der Fassadensanierung nicht gegeben.
- In fünf von 18 Fällen war das Erreichen der Mindesthelligkeit, das für eine Nutzung als Aufenthaltsraum erforderlich ist, nach Sanierung bereits kritisch.
- Die maßgebliche Einflussgröße bei der Minderung des Tageslichtniveaus im Innenraum ist der im Vergleich zum Zustand vor Sanierung im Mittel um 22 % geringere Lichttransmissionsgrad der Verglasung.
- Durch große ungeteilte Glasflächen und schlanke Rahmenprofile kann der Rahmenanteil an der Fensterfläche vermindert werden, hierdurch kann die Minderung des Tageslichtniveaus in geringem Umfang kompensiert werden.
- Durch eine Vergrößerung der Fensterfläche kann eine ausreichende Tageslichtversorgung auch nach einer Fassadensanierung sichergestellt werden.

Impact of the thermal renovation of façades on daylight levels in buildings

Roman Alexander Jakobiak, *daylighting.de*

Research issue

The thermal refurbishment of façades affects the provision of daylight to building interiors. This is due to the replacement or modification of components, which significantly influence daylighting.

State of science/technology

Although it is known that the thermal refurbishment of buildings affects daylighting, this relationship has not yet been adequately studied.

Experimental setup

A selection of 14 buildings from the case studies of IEA-SHC Task 47 and Task 50 served as building sample. For 18 selected spaces in these buildings the *effective window to floor area ratio* and the *daylight factor* in the center of the floor area was determined before and after renovation.

Results in comparison with previous findings

- In all projects in which the window area was not increased, the renovation of the façade led to a substantial reduction in the daylight levels by 28 % in average.
- In 15 of 18 cases, an adequate daylight supply characterized by a daylight factor $> 2 \%$ was not ensured after renovation.
- In five out of 18 cases, reaching the minimum requirement of lightness was critical after refurbishment.
- The most important influencing variable was the visible transmission of the glazing which after renovation was on average 22 % lower compared to the situation before renovation.
- Large undivided glass areas and slim frame profiles contribute to reducing the frame portion compared to the window before renovation, thus the reduction of daylight levels can be compensated to a limited extent.
- By enlarging the window area, sufficient daylight supply can be ensured after a thermal renovation of the façade.

Auswirkung der thermischen Sanierung der Gebäudehülle auf die Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht

*Roman Alexander Jakobiak,
daylighting.de
Helmholtzstraße 13-14, 10587 Berlin*

Zusammenfassung

In einer Reihe von Gebäuden wurde die Tageslichtbeleuchtung in Innenräumen vor und nach Sanierung der Fassade untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass die thermische Sanierung der Fassade in der Regel eine deutliche Minderung des Tageslichtniveaus im Innenraum bewirkt. Die normativ geforderte Mindesthelligkeit wurde nach Sanierung in einzelnen Projekten nicht mehr erreicht. Dieser Beitrag zeigt die Einflussgrößen und stellt einen Zusammenhang zwischen der Sanierungsstrategie mit der durch sie bewirkten Minderung des Tageslichtniveaus her.

1 Einleitung / Bedeutung des Themas

Die energetische Sanierung des Gebäudebestandes gehört zu den Zielen der Bundesregierung. Die thermische Fassadensanierung ist dabei eine Maßnahme, die in vielen staatlichen Programmen seit Jahrzehnten gefördert und im Rahmen der Energieeinsparverordnung gefordert wird. Die Auswirkung der Fassadensanierung auf die Tageslichtbeleuchtung in Gebäuden wurde in der Vergangenheit jedoch nur selten betrachtet. Hier wird der Einfluss der Fassadensanierung auf die Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht anhand der Untersuchung von insgesamt 14 Gebäuden vorgestellt.

2 Methodik der Untersuchung

Die Beurteilung der Auswirkung der Fassadensanierung auf die Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht wird anhand eines typischen Raumes in dem zu beurteilenden Gebäude vorgenommen. Als typisch gilt dabei ein Raum, der in Bezug auf die Nutzung, den Raumzuschnitt, die Orientierung sowie die Ausstattung mit Fenstern und Tageslichtsystemen repräsentativ für das Gebäude ist. Für diesen ausgewählten Raum wurden dann die zuvor zusammen gestellten beleuchtungsbezogenen Eigenschaften erfasst [Kalz 2015].

2.1 Verwendete Kenngrößen

Die zur Beurteilung heran zu ziehenden Kenngrößen sollen sowohl einen relativen Vergleich vorher / nachher, als auch eine absolute Einordnung des Tageslichtniveaus ermöglichen. Die Auswirkung der einzelnen Sanierungsmaßnahmen auf die Tageslichtbeleuchtung sollte ablesbar sein.

Zum Vergleich vorher / nachher und zur Einschätzung der Auswirkung einzelner Sanierungsmaßnahmen auf die Tageslichtbeleuchtung wird die Kenngröße der effektiven Fensterfläche im Bestand und nach Sanierung herangezogen. Dabei wird die effektive Fenster-

fläche auf die Grundfläche des Raumes bezogen. Hierdurch ergibt sich eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Projekten.

Die effektive Fensterfläche A_{eff} wird hier entsprechend Gl. 1 definiert.

$$A_{\text{eff}} = A_F \cdot \tau_{D65} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_e \quad \text{Gl. 1}$$

dabei sind

A_F	die Rohbau-Fensterfläche
τ_{D65}	der Lichttransmissionsgrad der Verglasung
k_1	der Minderungsfaktor für Rahmen und Sprossen
k_2	der Minderungsfaktor für Verschmutzung
k_3	der Korrekturfaktor für nicht senkrechten Lichteinfall
k_e	der Minderungsfaktor für die Lichtschachtwirkung der Fensterlaibung

Die Verbauung und die Himmelsorientierung werden nicht berücksichtigt, da sie durch die Sanierung nicht beeinflusst werden. Die auf die Nutzfläche bezogene effektive Fensterfläche ist keine neue Bewertungsgröße, sie wurde als effektive Aperturfläche/NGF z. B. auch in den Querschnittsuntersuchungen des SolarBau:Monitor Programms verwendet [Voss 2001].

Für eine qualitative Aussage über das Tageslichtniveau wird der Tageslichtquotient herangezogen. Der Tageslichtquotient ist die mit weitem Abstand am meisten genutzte Kenngröße zur Charakterisierung der Tageslichtbeleuchtung. Der Tageslichtquotient berücksichtigt neben der Transparenz der Fenstersysteme zusätzlich die Fensterlage, die Raumproportionen, die Reflexionsgrade der Raumflächen, sowie die Verbauung. Er ermöglicht es, das durch die Öffnungen in einem Raum gegebene Tageslichtpotenzial bezogen auf einen statischen Himmelszustand zu charakterisieren. Der Tageslichtquotient wird auch zur Korrelation mit dem Niveau der Tageslichtversorgung verwendet [DIN V 18599-4:2011-12]. Zur Berechnung des Tageslichtquotienten siehe [DIN 5034-3:2007-2].

Im Unterschied zu der bauteilbezogenen Maßzahl der effektiven Fensterfläche ist der Tageslichtquotient eine Kenngröße, die sich auf den zu beurteilenden Raum als Ganzes bezieht. Der Tageslichtquotient ist dabei jeweils für einen Nachweisort konkret zu ermitteln. Im Rahmen der Querschnittsanalyse wurde der Tageslichtquotient in Raummitte in 0,85 m über dem Fußboden ermittelt. Als Voraussetzung für eine ausreichende Beleuchtung mit Tageslicht empfiehlt [DIN 5034-1:2011-7] für diesen Nachweisort einen Tageslichtquotient von wenigstens 2 %.

Die beiden statischen Kenngrößen *effektive Fensterfläche* und *Tageslichtquotient* wurden gewählt, da sie eine tageslichttechnische Beurteilung der baulichen Eigenschaften des Gebäudes ermöglichen. Auf eine die Nutzung von Sonnenschutzsystemen mit einbeziehende Kenngröße wie z. B. die *relative Nutzbelichtung* wurde bewusst verzichtet, da es hier nicht darum ging, den realen Gebäudebetrieb zu bewerten.

2.2 Herangezogene Gebäude

Für diese Untersuchung wurden Sanierungsbeispiele aus den in IEA-SHC Task 47 *Solar Renovation of Non-Residential Buildings* und IEA-SHC Task 50 *Advanced Lighting Solutions for Retrofitting Buildings* untersuchten Fallstudien ausgewählt, in denen die Fassade saniert wurde. Insgesamt wurden 14 Gebäude mit 18 ausgewählten Räumen betrachtet. Siehe hierzu Tab. 1. Sechs der ausgewählten Gebäude stehen unter Denkmalschutz. In fünf Gebäuden wurde die vorhandene Fassade ausgebaut und eine neue Fassade wurde eingebaut. In zwei Gebäuden wurden Dachoberlichter erstmals neu eingebaut. In sechs der ausgewählten Gebäude wurde die vorhandene Außenwand gedämmt und neue Fenster wurden eingebaut. In einem der unter Denkmalschutz stehenden Gebäude wurden lediglich neue Fenster eingebaut. Die energetische Sanierung der meisten Beispielgebäude wurde im Rahmen von Forschungsprogrammen planerisch begleitet und evaluiert, insofern handelt es sich um Projekte, bei denen von einem hohen energetischen Standard auszugehen ist.

Tab. 1: Überblick über die für die Untersuchung herangezogenen Gebäude,
*) denkmalgeschütztes Gebäude

	Gebäudebezeichnung	Errichtung	Sanierung	Art der Sanierung
1	AT, Bruck, Büro	1964	2006	Fassade neu
2	BE, Brüssel, Büro*	1934	2010	Innen Fassadenebene ergänzt
3	NO, Oslo, Büro	1980	2013	Fassade neu
4	DE, BW, Produktion	1984	2014	Einbau neuer Dachoberlichter
5	AT, Graz, Kloster*	1239	2013	Dämmung Fassade, Fenster neu
6	DE, Berlin, Studentendorf	1959	2012	Dämmung Fassade, Fenster neu
7	DE, Berlin, Wohnung*	1956	2012	Dämmung Fassade, Fenster neu
8	AT, Schwanenstadt, Schule	1970	2007	Fassade neu
9	DE, Detmold, Berufsschule	1950	2015	Fassade neu
10	DE, Olbersdorf, Schule*	1929	2011	Dämmung Fassade, Fenster neu, Einbau neuer Dachoberlichter
11	IT, Cesena, Schule	1968	2013	Dämmung Fassade, Fenster neu
12	NO, Oslo, Schule*	1888	1990	Fenster neu
13	DE, Ulm, Kindergarten*	1966	2012	Dämmung Fassade, Fenster neu
14	DK, Kopenhagen, Kindergarten	1971	2010	Dämmung Fassade, Fenster neu

3 Ergebnisse

In nahezu allen Projekten sinkt die effektive Transparenz des Fenstersystems, das ist das dimensionslose Produkt aller in Gl. 1 angegebenen Minderungsfaktoren und des Lichttransmissionsgrades der Verglasung. Betrug sie vor Sanierung im Mittel 42 %, so lag sie nach Sanierung nur noch bei 32 %. Den größten Anteil an der Minderung der effektiven Transparenz des Fenstersystems hat dabei der Lichttransmissionsgrad der Verglasung, er lag nach der Sanierung im Mittel um 22 % unter dem Wert vor Sanierung.

Bei einer geringeren Transparenz des Fenstersystems kann durch eine größere Fensterfläche erreicht werden, dass das Tageslichtniveau bei der Sanierung nicht vermindert wird. Wie Tab. 2 zeigt, konnte das Verhältnis der effektiven Fensterfläche zur Grundfläche lediglich durch den Einbau einer neuen Fassade mit höherem Fensterflächenanteil (FFA) oder durch den Einbau neuer Dachoberlichter erhöht werden. Nur der Einbau neuer Dachoberlichter führte dabei im Mittel zu einer Erhöhung des Tageslichtquotienten.

Die Wärmedämmung der Außenwand und der Einbau neuer Fenster (Tab. 2, Zeile 2) führten im Mittel zu einer Minderung des Verhältnisses des effektiven Fensterflächenanteils zur Grundfläche von 23 % und zu einer Minderung des Tageslichtquotienten in ähnlicher Größenordnung. Die Veränderung des Minderungsfaktors für Verspattung bewegte sich zwischen -11 % und +6 % und betrug im Mittel -3 %.

Tab. 2: Durch die Fassadensanierung bewirkte Änderung von Kenngrößen der Tageslichtbeleuchtung in Prozent; in Klammern ist die Anzahl der ausgewerteten Beispiele angegeben; $A_{\text{Wirf}}/A_{\text{Floor}}$: Verhältnis der Fensterfläche zur Grundfläche; k_1 : Minderungsfaktor für Rahmen und Sprossen; τ_{D65} : Lichttransmissionsgrad der Verglasung; k_2 : Minderungsfaktor für Verschmutzung; k_e : Minderungsfaktor für die Lichtschachtwirkung der Fensterlaibung; $A_{\text{eff-Wirf}}/A_{\text{Floor}}$: Verhältnis der effektiven Fensterfläche zur Grundfläche; D: Tageslichtquotient

Zeile	Sanierungsstrategie	$A_{\text{Wirf}}/A_{\text{Floor}}$	k_1	τ_{D65}	k_2	k_e	$A_{\text{eff-Wirf}}/A_{\text{Floor}}$	D
1	Alle Projekte (18)	+22%	+4%	-22%	-1%	-3%	-9%	-2%
2	Dämmung Fassade, Fenster neu (8)	-1%	-3%	-17%	0%	-2%	-23%	-24%
3	Fenster neu (1)	0%	0%	-5%	0%	0%	-5%	-5%
4	Dachoberlichter neu (3)	+136%	+10%	-36%	-3%	-1%	+55%	+164%
5	Fassade neu, alle (6)	+18%	+12%	-27%	0%	-4%	-14%	-24%
6	Fassade neu, FFA erhöht (3)	+61%	+6%	-31%	0%	-2%	+12%	-2%
7	Fassade neu, FFA geringer (3)	-25%	+19%	-23%	0%	-7%	-39%	-46%

Der erstmalige Einbau neuer Dachoberlichter (Tab. 2, Zeile 4) führte erwartungsgemäß zu einem erheblichen Anstieg des Tageslichtquotienten. Dass der hier als flächengewichteter Mittelwert angegebene Lichttransmissionsgrad der Verglasung nach Sanierung um 36 % geringer war als vor Sanierung, ist auch in dem geringeren Lichttransmissionsgrad lichtstreuender Dachoberlichtsysteme begründet. Die Minderung durch Verspattung war durch die neuen Dachoberlichter nach Sanierung geringer als vorher.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Ergebnisse wurden bei Gebäuden, in denen eine neue vertikale Fassade (Tab. 2, Zeilen 5 bis 7) eingebaut wurde Fälle, in denen der Fensterflächenanteil erhöht wurde, von solchen Fällen unterschieden, in denen er vermindert wurde. Aufgrund der zumeist größeren Glasformate war der Sprossenanteil der neuen Fassade geringer als im Bestand, die Minderung durch Verspattung ging im Mittel um 12 % zurück. Die zum Teil erhebliche Vergrößerung des Fensterflächenanteils konnte die Minderung der effektiven Transparenz des Fenstersystems jedoch allenfalls kompensieren, so dass das Niveau des Tageslichtquotienten durch die Sanierung kaum verändert wurde. Ohne Vergrößerung der Fensterfläche bewirkte der Einbau einer neuen Fassade im Mittel annähernd eine Halbierung des Tageslichtniveaus, der Tageslichtquotient ging um 46 % zurück. Da die neue Fassade in der Regel vor die bestehende Tragstruktur mon-

tiert wurde, war die Gesamttiefe der Fassade nach Sanierung erheblich größer, die Minderung des Tageslichts durch die Laibungstiefe steigt hierdurch um 7 %. Die Verkleinerung der Fenster von im Mittel 25 % trug ebenfalls zu dieser starken Minderung des Tageslichtniveaus im Innenraum bei.

Abb. 1 stellt den Tageslichtquotienten D vor und nach Sanierung dar. Die auf der vertikalen Achse abgetragenen Tageslichtquotienten nach Sanierung wurden durch eine farbliche Hinterlegung interpretiert. Bei Tageslichtquotienten > 2 % ist von ausreichender Tageslichtversorgung auszugehen [DIN 5034-1:2011-7], daher wurde dieser Bereich grün hinterlegt. Drei Projekte fallen in diese Kategorie, dieses sind die beiden Schulsporthallen und eine Produktionshalle, in der Dachoberlichter neu eingebaut wurden. Dieses sind alle samt Projekte, in denen die Sanierung genutzt wurde, um die Fensterfläche zu vergrößern.

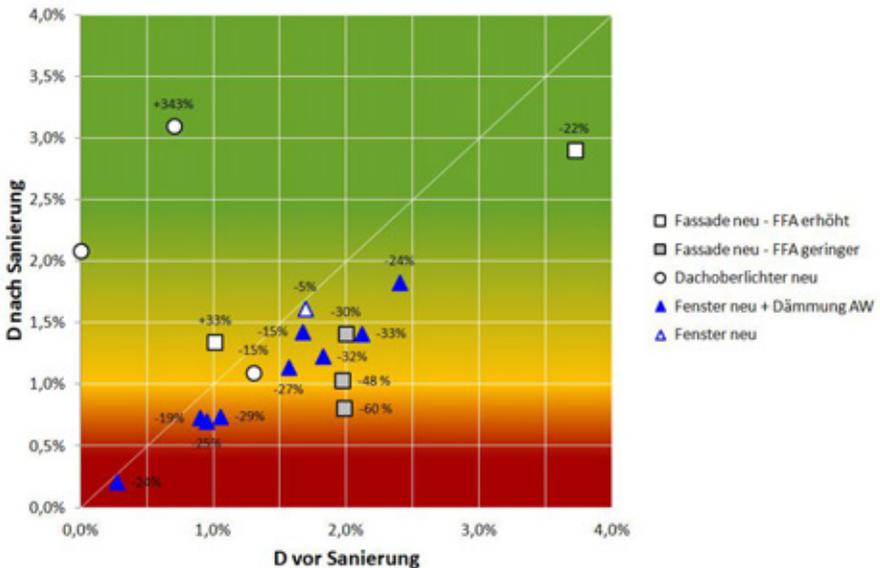


Abb. 1: Tageslichtquotient D vor und nach Sanierung. Die durch die Fassadensanierung bewirkte relative Änderung des Tageslichtniveaus ist jeweils neben den Datenpunkt eingetragen. Es werden verschieden Sanierungsstrategien unterschieden: Einbau einer neuen Fassaden mit im Vergleich zur Bestandsfassade höherem oder geringeren Fensterflächenanteil (FFA); erstmaliger Einbau neuer Dachoberlichter; Einbau neuer Fenster mit bzw. ohne Dämmung der Außenwand (AW).

Insgesamt 10 Fälle weisen nach Sanierung einen Tageslichtquotienten zwischen 1 % und 2 % auf. Hier kann davon ausgegangen werden, dass die Mindesthelligkeit [DIN 5034-1:2011-7] noch gegeben ist, im Sinne einer Tageslichtversorgung jedoch ein höheres Niveau des Tageslichtquotienten wünschenswert wäre. In dieser Gruppe wurde der Tageslichtquotient durch die Fassadensanierung im Mittel um 20 % gemindert.

In fünf Fällen betrug der Tageslichtquotient in Raummitte nach Sanierung weniger als 1 %. Für diese Räume ist eine Nutzung als Aufenthaltsraum bereits als kritisch zu beurteilen. In einem Fall sank der Tageslichtquotient von 2 % vor Sanierung auf 0,8 % nach Sanierung.

Hier hat die Sanierung dazu geführt, dass ein vormals ausreichend mit Tageslicht versorgter Raum nach Vollenden der thermischen Fassadensanierung nicht mehr für eine Nutzung als Aufenthaltsraum geeignet ist.

3.1 Fazit

- In allen Projekten, in denen der Fensterflächenanteil nicht erhöht wurde, führte die Sanierung der Fassade zu einer erheblichen Minderung des Tageslichtniveaus, diese lag im Mittel bei 28 %.
- In 15 von 18 Fällen war eine ausreichende Tageslichtversorgung mit einem Tageslichtquotienten > 2 % nach der Fassadensanierung nicht gegeben.
- In fünf von 18 Fällen war das Erreichen der Mindesthelligkeit, das für eine Nutzung als Aufenthaltsraum erforderlich ist, nach Sanierung bereits kritisch.
- Die maßgebliche Einflussgröße bei der Minderung des Tageslichtniveaus im Innenraum ist der im Vergleich zum Zustand vor Sanierung im Mittel um 22 % geringere Lichttransmissionsgrad der Verglasung.
- Durch große ungeteilte Glasflächen und schlanke Rahmenprofile kann der Rahmenanteil an der Fensterfläche vermindert werden, hierdurch kann die Minderung des Tageslichtniveaus in geringem Umfang kompensiert werden.
- Durch eine Vergrößerung der Fensterfläche kann eine ausreichende Tageslichtversorgung auch nach einer Fassadensanierung sichergestellt werden.

Referenzen

[DIN 5034-1:2011-7] Tageslicht in Innenräumen — Teil 1: Allgemeine Anforderungen

[DIN 5034-3:2007-2] Tageslicht in Innenräumen — Teil 3: Berechnung

[DIN V 18599-4:2011-12] Energetische Bewertung von Gebäuden — Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung

[Gentile 2016] Gentile N et al; A toolbox to evaluate non-residential lighting and daylighting retrofit in practice; Energy and Buildings 123 (2016) 151–161

[Kalz 2015] Kalz D et al; ASSESSMENT OF TECHNICAL SOLUTION AND OPERATIONAL MANEGEMENT; IEA SHC Report: T.47.C. June 2015

[Voss 2001] Voss K; Löhnert G; Wagner A; SolarBau:Monitor - Energieeffizienz und Solarenergienutzung im Nichtwohnungsbau - Konzepte und Bauten; Karlsruhe 2001

Die diesem Beitrag zugrundeliegende Forschung wurde durch Mittel des Bundesministeriums für Wirtschaft ermöglicht. Dank gebührt den Projektpartnern in IEA-SHC-Task 47, die die zur Auswertung erforderlichen Informationen zur Verfügung stellten.

Der Lighting Retrofit Adviser des IEA-SHC Task 50

Jan de Boer¹), Simon Wössner¹), Marc Fontoyront²), Martine Knoop³), Bernard Paule⁴), Jérôme Kaempf⁵) und Marie-Claude Dubois⁶)

1) Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart , Germany 2) Danish Building Research Institute (SBI), Copenhagen, Denmark

3) Technische Universität (TU) Berlin, Germany 4) Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland 5) Estia SA, Lausanne, Switzerland 6) Lund University, Lund, Sweden

Problemstellung

Zielsetzung des IEA-SHC Task 50: "Advanced Lighting Solutions for Retrofitting Buildings" der International Energy Agency (Laufzeit 1/2013 bis 12/2015) war es, die Sanierung von Beleuchtungsanlagen (Tageslichttechnik, elektrische Beleuchtung und Lichtmanagement) im Nichtwohnbau mit Hilfe innovativer, aber praxisnaher Ansätze, die auf eine Vielzahl typischer bestehender Gebäude angewendet werden können, zu unterstützen. An dem Projekt waren insgesamt 18 Partnereinrichtungen aus 11 Ländern beteiligt.

Ziel

Einer der Schwerpunkte des Projektes war die Entwicklung eines elektronischen, interaktiven Sanierungsratgebers, des „*Lighting Retrofit Advisers*“ mit Lösungsvorschlägen, Entscheidungshilfen und Designwerkzeugen, basierend auf den Arbeitsergebnissen der vier Subtasks (ST A *Market and Policies*, ST B *Daylighting and Electric Lighting Solutions*, ST C *Method and Tools*, ST D *Case Studies*).

Beschreibung der Innovation / »best practice«

Der „*Lighting Retrofit Adviser*“ besteht aus einem Informations- und Berechnungsteil. Im Informationsteil wird auf zahlreiche Sanierungsfragestellungen jeweils abgestimmt auf unterschiedliche Zielgruppen eingegangen. Unter anderem stehen Module zum Benchmarking, zur Portfolioanalyse, zu Sanierungstechniken (45+ aufbereitete Techniken), zu Tools (10+) und zu Fallstudien (20+) zur Verfügung.

Der Berechnungsteil ermöglicht mit einem „*On site Optimizer*“ die schnelle energetische und wirtschaftliche Bewertung von Beleuchtungsanlagen im Bestand, dies direkt vor Ort im Gebäude. Das System führt - grafisch interaktiv – durch die Aufnahme der Bestandsanlage und der wichtigsten Raum- und Nutzungsparameter. Hierauf basierend werden automatisch Sanierungsvorschläge ermittelt und energetisch und wirtschaftlich (z. B. Amortisationszeiten und Kapitalwerte) verglichen. Der Berechnungsteil ermöglicht des Weiteren eine detailliert aber schnell rechnende Bewertung der Tageslichtversorgung in Räumen als Funktion verschiedener Sonnen- und Blendschutzlösungen („*CFS Express*“).

Das System wurde als Multiplattformlösung mit Verfügbarkeit auf Desktoprechner und den drei führenden mobilen Plattformen (Android, IOS, Windows Mobile) entwickelt. Der *Lighting Retrofit Adviser* ist in Deutsch, Englisch und Französisch frei verfügbar.

Realisierungsgrad

Die Arbeiten werden im Frühjahr 2016 abgeschlossen.

The Lighting Retrofit Adviser of IEA-SHC Task 50

*Jan de Boer*¹⁾, *Simon Wössner*¹⁾, *Marc Fontoyront*²⁾, *Martine Knoop*³⁾, *Bernard Paule*⁴⁾, *Jérôme Kaempf*⁵⁾ und *Marie-Claude Dubois*⁶⁾

1) Fraunhofer Institute for Building Physics, Stuttgart; 2) Danish Building Research Institute (SBI), Copenhagen, Denmark; 3) Technische Universität (TU) Berlin, Germany; 4) Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland; 5) Estia SA, Lausanne, Switzerland; 6) Lund University, Lund, Sweden

Issue

With a small volume of new buildings, major lighting energy savings can only be realized by retrofitting the existing building stock. Many countries face the same situation: About 75 % of the lighting installations are considered to be out of date (older than 25 years). Compared to existing installations, the majority of new solutions allow a significant increase in efficiency – easily by a factor of three or more – going along with highly interesting payback times. However, lighting refurbishments are still lagging behind compared to what is economically and technically possible and feasible.

Aim

With the activities in IEA Task 50, „Advanced Lighting Solutions for Retrofitting Buildings“ it was aimed at improving the lighting refurbishment process in non-residential buildings in order to unleash energy saving potentials while at the same time improving lighting quality. One of the key outcomes of the project is the “Lighting Retrofit Adviser” (LRA).

Description of the innovation / »best practice«

The "Lighting Retrofit Adviser" is an integrative, comprehensive, multi-platform (desktop / mobile) tool for stakeholders involved in lighting retrofits:

- Authorities can find information on regulation and certification approaches for lighting retrofits.
- Investors can inform themselves on the economic boundary conditions of bringing new lighting systems into practice.
- Designers / consultants can make use of for instance an "On-Site Optimizer" that allows to develop retrofit concepts directly on site, while drawing from a knowledge data-base of 35+ retrofit techniques (daylight, electric lighting and lighting controls) and 20+ case studies.

The LRA consists of two categories of altogether 12 components organized in an “information part” and a “calculation & rating part”.

Level of realization

Finished. The tool is available under <http://task50.iea-shc.org/> and www.lightingretrofitadviser.com for different platforms: Desktop- - Webbased, Android, IOS, Windows Phone. Beside an English, also a Chinese, French, German and Portugese Version will be available.

The Lighting Retrofit Adviser of IEA-SHC Task 50

*Jan de Boer*¹⁾, *Simon Wössner*¹⁾, *Marc Fontoynt*²⁾, *Martine Knoop*³⁾, *Bernard Paule*⁴⁾, *Jérôme Kaempf*⁵⁾ und *Marie-Claude Dubois*⁶⁾

1) Fraunhofer Institute for Building Physics, Stuttgart; 2) Danish Building Research Institute (SBI), Copenhagen, Denmark; 3) Technische Universität (TU) Berlin, Germany; 4) Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland; 5) Estia SA, Lausanne, Switzerland; 6) Lund University, Lund, Sweden

Summary

The "Lighting Retrofit Adviser" is an integrative, comprehensive, multi-platform (desktop / mobile) tool for stakeholders involved in lighting retrofits and draws on the main results of the different subtasks of IEA-SHC Task 50.

1 A product of IEA-SHC Task 50 „ Advanced Lighting Solutions for Retrofitting Buildings “

With the activities in Task 50 it was aimed at improving the lighting refurbishment process in non-residential buildings in order to unleash energy saving potentials while at the same time improving lighting quality.

The overall objective was to accelerate retrofitting of daylighting and electric lighting solutions in the non-domestic sector using cost effective, best-practice approaches, which can be used on a wide range of typical existing buildings. This included the following activities:

- Develop a sound overview of the lighting retrofit market
- Trigger discussion, initiate revision and enhancement of local and national regulations, certifications and loan programs
- Increase robustness of daylight and electric lighting retrofit approaches technically, ecologically and economically
- Increase understanding of lighting retrofit processes by providing adequate tools for different stakeholders
- Demonstrate state-of-the-art lighting retrofits
- Develop as a joint activity an electronic interactive source book including design inspirations, design advice, decision tools and design tools (Fig. 1)

18 institutes, universities and private companies from 12 countries contributed to the task. The Lighting Retrofit Adviser (LRA) provides access to the results of the project.

2 Target groups of the Lighting Retrofit Adviser

The "Lighting Retrofit Adviser" is an integrative, comprehensive, multi-platform (desktop / mobile) tool for stakeholders involved in lighting retrofits (the introduction page is shown in Fig. 2):

- Authorities can find information on regulation and certification approaches for lighting retrofits.

- Investors can inform themselves on the economic boundary conditions of bringing new lighting systems into practice.
- Designers / consultants can make use of for instance an "On-Site Optimizer" that allows to develop retrofit concepts directly on site, while drawing from a knowledge data-base of 35+ retrofit techniques (daylight, electric lighting and lighting controls) and 20+ case studies.

The LRA consists of two categories of components organized in an "information part" and a "calculation & rating part". Fig. 2 gives an overview on the different components.

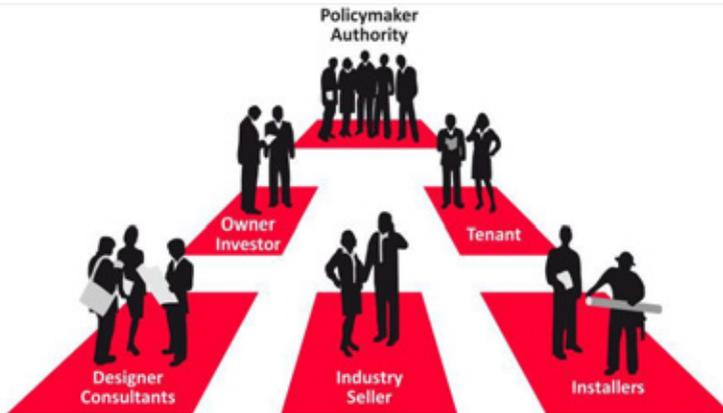


Fig. 1: Electronic Source Book "Lighting Retrofit Adviser". Introduction page (upper image). Stakeholder related access to the tool (lower image).



Fig. 2: Components of the IEA-SHC Task 50 Lighting Retrofit Adviser.

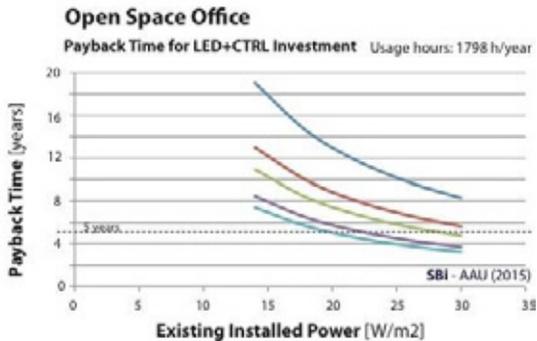


Fig. 3: The LRA illustrates payback time for typical open spaces offices as function of energy price. The same representations were generated for personal offices, manufacturing halls and wholesale / retail.

3 Information part

The following “information components” are contained in the tool:

- Low hanging fruits: With the significant boost in efficiency in lighting in many cases a direct replacement of old installations is at little payback times an interesting op-

tion to consider. For typical applications like offices, schools, industry warehouses / retail total cost of ownership (TCO) analysis (Fig. 3) are presented and discussed.

- Technology Viewer (Fig. 4): More than 35 technologies in the field of electric lighting, daylight, light management and relating to measures in the building interior are described and rated according to a set of criteria on energy efficiency, lighting quality and thermal benefits. The technology viewer allows to compare different technologies on a direct one to one basis.

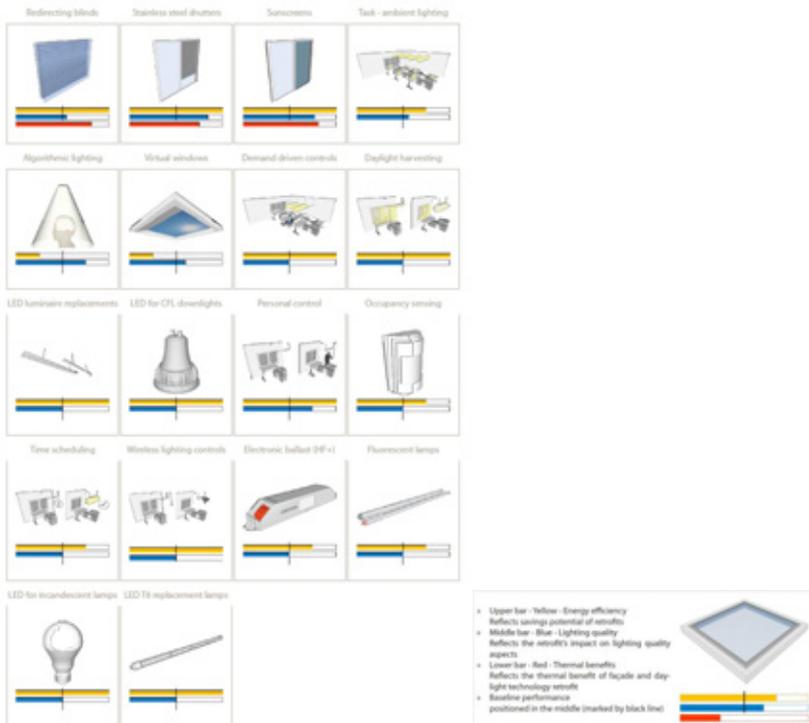


Fig. 4: Selection of altogether 38 featured technologies. A quick rating system for technologies is applied, complementing the detailed rating in a source book and the Lighting Retrofit Adviser.

 AUSTRIA  Bartenbach R&D office, Adfrans electric/daylighting retrofit	 BELGIUM  EBEL, Linseltie, Waver Daylighting and T8 to LED	 BELGIUM  EBEL, Sint-Sievens-Woluwe, Lovenberg Halogen to LED	 BRAZIL  Tribunal of Justice (TJP-1), Brasilia Shading devices	 BRAZIL  Ministry of Environment (MMA), Brasilia Shading devices and T12 to T8
 BRAZIL  Ministry of Energy (MME), Brasilia Shading, T12 to T5, daylight controls	 CHINA  The National Library of China, Beijing Shading, T12 to T5, daylight controls	 DENMARK  Horsens Town Hall, Horsens Fluorescent 2700K to LED 6000K + controls	 DENMARK  Aarhus University Dental School Clinic T8 3000K to T5 4000K, and daylight controls	 DENMARK  Swimming pool and bath Spant, Aarhus Historical building, LED and fluorescent
 FINLAND  Aalto University office, Espoo T8 to LED with daylight controls	 GERMANY  Friedrich-Föhl School, Oberndorf Daylighting systems and controls	 GERMANY  EIT Market, Coburg HMI to LED lighting	 GERMANY  Dietrich Boshoeffler College, Detmold Facade renovation and T5 to LED	 GERMANY  Flat, Berlin Incandescent to LED bulbs
 GERMANY  Student Village Schlachensee, Berlin Glazing, shadings and incandescent to LED	 GERMANY  Production hall Baden-Württemberg Retrofit, T8 to LED and controls	 GERMANY  Logistic hall T8 to LED and daylight linked controls	 GERMANY  Uhdandschule School, Stuttgart-Rat T8 to T5 and combined controls	 JAPAN  Tates Technical Center Fluorescent to LED
 NORWAY  Powerhouse Kjerbo, Oslo Building retrofit to zero emission building	 SWEDEN  Architectural School A-hus, Lund Renovation of interior to higher reflectances	 SWEDEN  WSP Headquarters, Stockholm Enhanced reflectances, T8 to T5 and controls	 SWEDEN  High school, Helsingborg T5 pendants to indirect LED	
Colour Key for building types				
Industry	Retail	Office	Housing	Sport
Education				

Fig. 5: Lighting retrofits in a total of 24 non-residential buildings case studies have been studied in detail and are documented in the LRA.

- Case Study Viewer: More than 20 lighting retrofit case studies in different latitudes and climatic zones covering offices, education facilities, manufacturing halls, whole sale stores, spa, etc. are presented. All case studies were assessed according to newly developed monitoring protocol which covers the aspects: costs, lighting energy use, lighting environment and user perspectives. Several figures and data tables support the presentation, refer to Fig. 5.
- FAQs: Collection of frequently asked questions and answers on “general questions on lighting retrofits”, “lighting quality”, “lighting control / users’ behavior”.
- Collection of tools / list of metrics: These components compare different tools and metrics used / or suited for application in lighting retrofits.
- Publications & reports: Holds brief descriptions and full text version of the task reports.
- Survey: A large survey among more than 1000 practitioners on tools and methods in lighting retrofits was conducted. The results of this survey are found in this component.

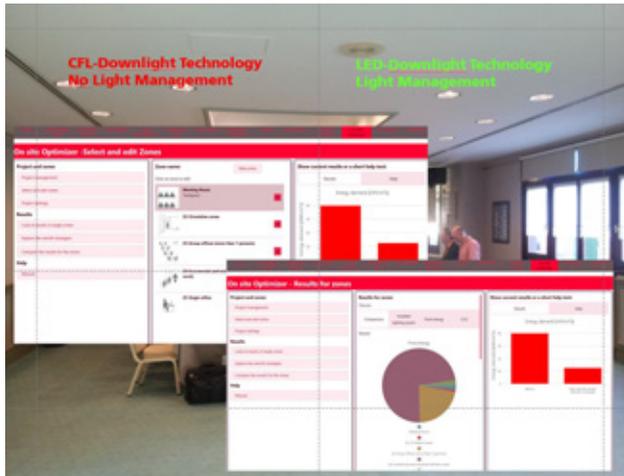


Fig. 6: On site assessment of a meeting room with one of the components of the Lighting Retrofit Adviser.

4 Calculation part

The following “calculations” are contained in the tool:

- Benchmarking: Compare installed power and energy consumption for lighting purposes of your building to typical values.
- Portfolio Analysis: Analyze a portfolio of several buildings and compare it to typical consumptions of comparable portfolios.
- On-site Optimizer (Fig. 6): Lighting is decentralized in buildings. Often there is no detailed information available on the energy performance, operation hours and in the end on the economics of the lighting installations. This component allows the on-site assessment for a direct analysis of potentials (energy, CO₂-emissions, economics). To support further development of retrofit options, it automatically generates retrofit proposals.
- CFS Express: The “CFS Express” allows to analyze the impact of different complex fenestration systems (sun shading, glare protection) on natural illumination of spaces and energy demand for lighting. It delivers hourly values. It can be chosen from worldwide 19 representative locations (geographic site, and climatic data). The underlying algorithm has been optimized such, that the calculation can be performed in a few seconds (compared to hours in former calculation schemes).

5 Availability / Dissemination

The tool is available under <http://task50.iea-shc.org/> and www.lightingretrofitadviser.com for different platforms: Desktop- - Webbased, Android, IOS, Windows Phone. Beside an English, also a Chinese, French, German and Portuguese Version will be available.

Nutzerzufriedenheit mit LED-Beleuchtung in Schulen

Edith Holländer, Karin Schakib-Ekbatan, Annette Roser, Stefanie Löcherer, Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES), Tran Quoc Khanh, Max Wagner, TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik

Problemstellung und Forschungsfragen

Das vorherrschende Leuchtmittel in deutschen Schulen sind immer noch Leuchtstoffröhren, nur 4% der Klassenräume sind mit energieeffizienter LED-Beleuchtung ausgestattet. Laut einer aktuellen Studie entfallen 67% des Stromverbrauchs in Schulen auf die Beleuchtung. Aus diesem Grund besteht ein großes Energieeinsparpotenzial in der Umrüstung von Schulen auf LED-Beleuchtung. Die vorliegende herstellernunabhängige Studie hat die subjektive Bewertung von konventioneller Beleuchtung und LED-Beleuchtung in Klassenräumen durch eine Vorher-/Nachher-Befragung untersucht.

Stand der Wissenschaft/Technik

Vorteile der LED-Beleuchtung: Hohe Energieeffizienz, hohe Wirtschaftlichkeit, lange Lebensdauer, weniger Wartungskosten, weniger Müll, robust, flexibel einsetzbar, hohe Lichtqualität, keine UV- und Infrarotstrahlung, gute Farbwiedergabe, je nach System dimmbar. Durch den Einsatz von sinnvoll abgestimmten Steuerungsmöglichkeiten kann die Handhabung der Beleuchtung erleichtert und der Energieverbrauch weiter gesenkt werden.

Forschungshypothesen

H1: Die Lichtverhältnisse im Raum werden nach der Umrüstung positiver bewertet als vor der Umrüstung.

H2: Der Anteil berichteter Beschwerden (z.B. Kopfschmerzen, Konzentrationsschwierigkeiten) von den Schülern verändert sich durch die LED-Umrüstung nicht.

H3: Die LED- Umrüstung wird im Unterricht aufgegriffen und die Schüler sind ausreichend darüber informiert.

Versuchsaufbau

Im Zeitraum Februar bis Oktober 2014 wurden 33 Schulen bei der Umrüstung auf LED wissenschaftlich begleitet. 4.300 Schüler sowie 165 Lehrkräfte wurden zur subjektiven Zufriedenheit mit der Beleuchtungssituation vor und nach der Umrüstung schriftlich befragt. Ergänzend wurden exemplarisch objektive Daten durch Messungen erhoben.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Im Ergebnis wurde die LED-Beleuchtung subjektiv besser bewertet als die konventionelle Beleuchtung. Außerdem konnte kein Einfluss der Beleuchtung auf die berichteten Beschwerden festgestellt werden. Die Thematik wird jedoch selten im Unterricht aufgegriffen. Die vorliegende Studie bestätigt die Ergebnisse der Pilotstudie zur LED-Umrüstung im Rahmen des KomLicht-Projektes in Trier auf der Grundlage einer breiten Datenbasis.

User satisfaction with LED-lighting in schools

Edith Holländer, Karin Schakib-Ekbatan, Annette Roser, Stefanie Löcherer, Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES), Tran Quoc Khanh, Max Wagner, TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik

Research issue

Artificial lighting in German schools is still coming primarily from fluorescent tubes. Just 4% of the classrooms are equipped with energy efficient LED lighting. According to a recent study 67% of electricity consumption is used for lighting showing the huge energy saving potential in replacing lighting in schools by LED. This paper presents the results of a manufacturer independent study looking at the users' perception of conventional lighting and LED lighting in classrooms based on pre-post-surveys.

State of technology

Advantages attributed to LED lighting are: high energy efficiency, high profitability, long life, low maintenance cost, less waste, robustness, flexible usage, high lighting quality, no UV and infrared radiation, good colour rendering and dimmability. Carefully tuned control facilitates the handling of the lighting and improves energy efficiency even more.

Research hypothesis

H1: Lighting conditions in the classroom are rated more positive after LED retrofitting than before.

H2: Percentage of reported complaints (e.g. headache, concentration problems) from students is not affected by LED retrofitting.

H3: LED retrofitting is a topic in class and students are sufficiently informed about LED.

Experimental setup

The retrofitting process from conventional lighting to LED lighting was scientifically monitored in 33 schools from February to October 2014. 4,300 students and 165 teachers have been asked by paper and pencil questionnaire about their subjective evaluation of lighting conditions before and after LED retrofitting. Additionally exemplary objective data was collected.

Results in comparison with previous findings

The study shows that LED lighting in classrooms was rated more positively than conventional lighting. Moreover lighting conditions had no influence on reported complaints. But the retrofitting process was not taken up and used in teaching. In general the results of a pilot study for LED retrofitting in a school in Trier (KomLicht project) could be confirmed by means of this broad data base.

User satisfaction with LED-lighting in schools

Edith Holländer, Karin Schakib-Ekbatan, Annette Roser, Stefanie Löcherer
Institute for Ressource Efficiency and Energy Strategies (IREES),
Schönfeldstr. 8, 76131 Karlsruhe, www.irees.de

Tran Quoc Khanh, Max Wagner,
TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik
S2|09 14, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt

Summary

The retrofitting process from conventional lighting to LED lighting was scientifically monitored in 33 schools from February to October 2014. Therefore 4,300 students and 165 teachers have been asked by paper and pencil questionnaire about their subjective evaluation of lighting conditions before and after LED retrofitting. The results of the study give important insight into the effects of LED refurbishments in schools and on how they change the perception of indoor quality in classrooms. The study shows that LED lighting in classrooms was rated more positively than conventional lighting, although lighting conditions had no influence on reported complaints. The retrofitting process, however, was not taken up and used in teaching.

1 Introduction

Artificial lighting in German schools is still coming primarily from fluorescent tubes. According to a recent study (Schlommann et al. 2015) just 4 % of the classrooms are equipped with energy efficient LED lighting. As figure 1 shows 67% of the electricity consumed within school buildings is (still) used for lighting. This shows that there is a huge energy saving potential in replacing lighting in schools by LED (Light Emitting Diodes). This paper presents the results of a manufacturer independent study looking at the users' perception of conventional lighting and LED lighting in classrooms based on pre-post-surveys.

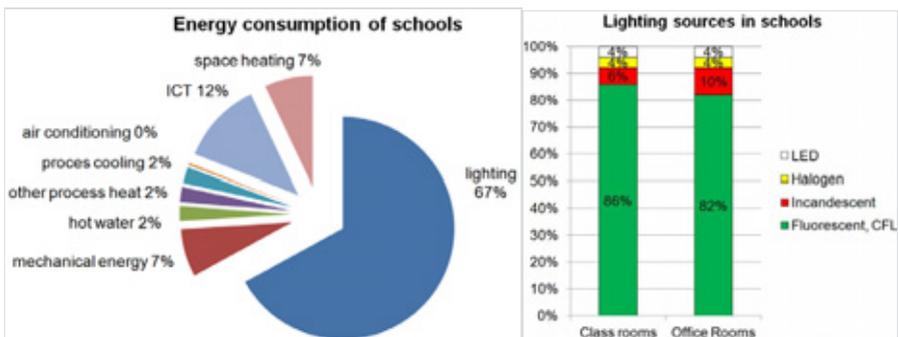


Fig. 1: Results from the energy consumption study with 87 schools (Schlommann et al. 2015)

2 State of technology

Lighting in schools is differentiated from other buildings: 1) Besides general EU standards and directives there are directives aiming at the level of illumination in classrooms in particular; the "DIN EN-Norm 12 464-1" sets a minimum of 300 lx for classrooms and 500 lx for special classrooms (e.g. for scientific experiments) measured on the tables 2) Lighting needs to be flexible for the different usage contexts of classrooms (e.g. writing, working groups, reading the blackboard, watching a film) 3) Assembly halls, gyms and corridors require a specific special lighting design.

Advantages attributed to LED lighting are: high energy efficiency and therefore less energy consumption (saving of costs and CO₂ emissions), long life span (up to 50,000 h; Chang et al. 2012) and therefore little maintenance requirements and less waste, robustness and dimmability, flexible usage, high profitability, high lighting quality and good colour rendering, no UV and infrared radiation. Carefully tuned control facilitates the handling of the lighting and improves energy efficiency even more.

Disadvantages attributed to LED lighting are: (still) high investment costs, the use of rare earths for electronics, the unprofitability of recycling, rebound effect (Schleich et al. 2014), and light pollution. Additionally, some producers create products so that the bulb cannot be changed (planned obsolescence).

LED technology is improving at a fast rate and the LED industry is therefore growing (Kelly and Duff 2015). As there are more and more concerns of potential users against the technology this paper provides useful guidance to those who are thinking about the use of LED light in schools.

3 Focus of research and underpinning hypothesis

To obtain the necessary basis for a broad market launch of this climate-friendly technology, given obstacles to its diffusion have to be overcome. In the case of Germany, Federal Ministries in the sectors of education and environment support climate projects in social, cultural and public institutions in particular. From a societal point of view the energetic modernization of schools and other educational establishments is particularly important, because they represent spaces where social values are formed and conveyed.

The condition, equipment and design of school lighting can significantly influence students' health, performance and overall well-being (Barrett et al. 2015). Keeping in mind that students and teachers spend the majority of their weekdays in classrooms, the environmental design of the workspace is of utmost importance. Especially the visual qualities are some of the most critical aspects to consider when designing school buildings, because "children depend heavily on sight in the learning process" (Baker and Bernstein 2012: 10).

Whereas there are already numerous studies about the influence of light on the performance of schoolchildren (Wessolowski et al. 2014; Barrett et al. 2015) surprisingly few investigations address the satisfaction and well-being of students and teachers regarding to lighting in particular (Silvester and Konstantinou 2010). This study targeted this research gap by focusing on the question whether the subjectively reported physical and psychological satisfaction of students is influenced by the introduction of LED lighting technology.

The target group in the research project were students from grade 5 to grade 12 (10-18 years old) and their teachers. The research object was the class room in which the re-

spondents were sitting as well as their opinion and activities with regards to energy saving. Our main research questions were: Do the students and teachers perceive the new lighting situation to be better than the old one? How do students and teachers cope with the automatic control mechanisms of, for example, lighting or ventilation? Do teachers integrate the topic of energy efficiency and technological innovation into their lessons (window of opportunity)? Do the students discuss the topic at home and behave more energy efficiently in their everyday life after the school refurbishment (spill-over effect)?

The main research question (H_0 hypothesis) was, given the above mentioned benefits of this new technology, that there will be an improvement on overall felt satisfaction of students in their classroom. The H_1 hypothesis which we want to challenge is therefore that LEDs negatively influence satisfaction, as was already often subject to debate. To address this hypothesis in particular with operated measures hypothesis can be expressed more concrete as:

H1: Lighting conditions in the classroom are rated more positive after LED retrofitting than before.

H2: Percentage of reported complaints (e.g. headache, concentration problems) from students is not affected by LED retrofitting.

H3: LED retrofitting is a topic in class and students are sufficiently informed about LED.

4 Methods and Data

The German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB) has financed the LED refurbishment of public buildings within the “LED-Leitmarktinitiative” since 2008. In the framework of the “Kommunalrichtlinie 2013” classrooms in about 56 schools have been equipped with LED. The retrofitting process from conventional lighting to LED lighting was scientifically monitored in 33 schools in 9 federal states of Germany from February to October 2014. The school types ranged from lower secondary school up to vocational school. 4,354 students in 160 different classrooms and 165 teachers have been asked by paper and pencil questionnaire about their subjective evaluation of lighting conditions before and after LED retrofitting. This resulted in a large data sample with high statistic power (Baruch and Holtom 2008). Additionally, exemplary objective data was collected.

Insights from a pilot study were used to develop a standard questionnaire for teachers and students tailored to the classroom situation. The old lighting situation was taken as a reference point to compare the LED-refurbished lighting situation with. If the refurbishment had taken place prior to the survey, retrospective questions were asked about the old lighting situation.

5 Results

The study shows that the ambience of LED lighting in classrooms was rated more positively than conventional lighting in several aspects (Hypotheses 1 confirmed). On a scale of 1 (very good) to 6 (very bad) the old lighting was rated about one point worse than LED lighting in average (satisfactory vs. good; Fig. 2). After refurbishment, the illumination of tables and blackboards is perceived better, as well as the general appearance of the ceiling

lights. The amount of daylight and protection against glare didn't change much as in most cases only the lamps were replaced. Students and teachers all in all felt more comfortable in refurbished classrooms but they expressed the wish to have a more requirement-optimised light control and less automatic control. In general the results of a pilot study for LED retrofitting in a school in Trier (KomLicht project) could be confirmed by means of this broad data base.

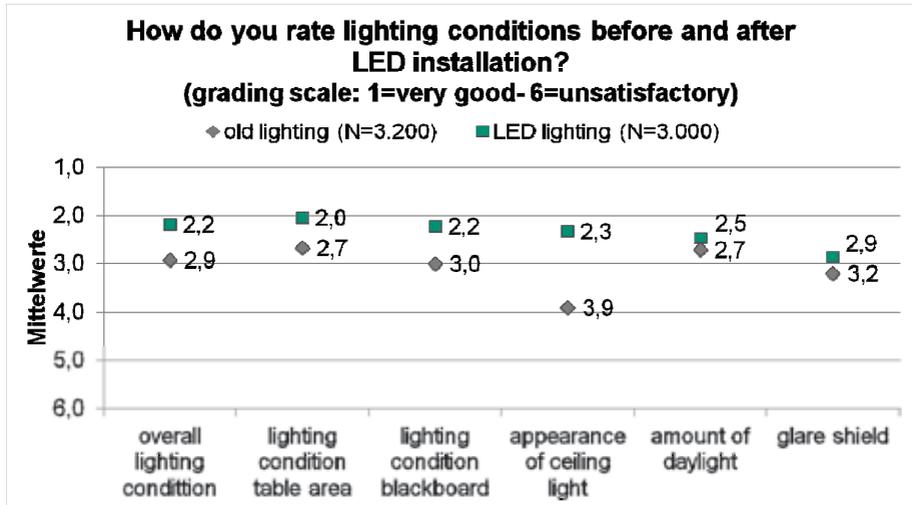


Fig. 2: Subjective assessment of ambience of light in classroom before and after refurbishment. (Own results)

For the subjective assessment of a room's lighting condition further (room) factors are crucial, especially if they are negatively assessed. Asked for these room factors, more than 40 % of the students expressed poor air quality being the main problem before and after refurbishment. Other factors mentioned by the respondents in the classrooms were "too noisy" and "too cold". Before refurbishment some students assessed the room as being "too dark" in contradiction of being "too bright" after refurbishment. It should be stressed that the old lighting situations very often suffered of messy and broken lamps not fulfilling the EU standards any more, as additional measurements showed.

Complaints about concentration problems, tiredness, eyestrain or headache do not vary significantly before and after refurbishment. This indicates that LED-lighting has no effect on such complaints (Hypotheses 2 confirmed).

As the refurbishment of a classroom is ideal in order to bring the LED topic into the lessons, it was asked if this was discussed. Only 25 % of the students, however, answered "yes" (Hypotheses 3 rejected). When asked about the reasons for that, teachers told us that substantial teaching material on this topic is missing. Due to this, the project team developed, together with the Independent Institute for Environmental Issues (UfU) and financed by the German Federal Ministry of Education and Research, teaching material for

this purpose (“LED lighting – Function, Impact, Perception”; it can be freely downloaded here: <http://www.irees.de/irees-de/LED-Lehrmaterial>).

6 Discussion

The purpose of the studies was to obtain resilient results on the acceptance of new energy related technologies in the building sector. The results provide guidance for politicians, decision-makers, school administrators and planners. LED-retrofitting has a large, but often untapped potential to be used for educational purposes and promotion of energy efficient lighting outside the school building.

Steidle et al. (2014) conceptualize lighting conditions as an environmental resource. If they fit to the requirements in terms of cognitive, emotional and social task demands, task performance is facilitated and mental resources conserved. Additionally, if user’s expectations, preferences and needs are met by the lighting conditions, satisfaction, well-being and performance are increased as well. Those factors are especially important in times of “knowledge work” as in the case of schools. Another interesting effect described by the authors is, that the more positive the subjective evaluation of lighting, the more positively is the overall evaluation of the room appearance which increases emotional well-being and task engagement (Veitch et al. 2013).

Rapid developments in LED technology challenge investors to choose the right lighting. Lighting design is therefore crucial before investing in LED. Several standards and directives of LED design can help to compare the (Kelly and Duff 2015). In addition all important stakeholders have to be involved in the planning process in order to have the best benefit: school directors, teachers, facility manager, and specialist planners. It is recommended not to install a fully automated lighting control and have as much daylight integrated into the room concept.

For further information, please visit: <http://www.irees.de/irees-de/LED-Schulstudie>.

References

- Baker, Lindsay; Bernstein, Harvey (2012): The Impact of School Buildings on Student Health and Performance. A Call for Research. Report. McGraw-Hill Research Foundation. Available online: http://www.ncef.org/pubs/010715.McGrawHill_ImpactOnHealth.pdf, checked on 6/13/2016.
- Barrett, Peter; Davies, Fay; Zhang, Yufan; Barrett, Lucinda (2015): The impact of classroom design on pupils' learning: Final results of a holistic, multi-level analysis. In: *Building and Environment* 89, S. 118–133.
- Baruch, Y.; Holtom, B. C. (2008): Survey response rate levels and trends in organizational research. In: *Human Relations* 61 (8), S. 1139–1160.
- Chang, Moon-Hwan; Das, Diganta; Varde, P. V.; Pecht, Michael (2012): Light emitting diodes reliability review. In: *Microelectronics Reliability* 52 (5), S. 762–782.
- Kelly, Kevin; Duff, James Thomas (2015): Lighting Design in Europe: Aligning the Demands for Lower Energy Usage with Better Quality. In: *JCEA* 9 (3), S. 283–290.
- Schleich, Joachim; Mills, Bradford; Dütschke, Elisabeth (2014): A Brighter Future? Quantifying the Rebound Effect in Energy Efficient Lighting. With contribution of Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (72). Available online: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421514002638?np=y>, checked on 4/13/2015.
- Schlomann, Barbara; Wolfarth, Katharina; Kleeberger, Heinrich; Hardi, Lukas; Geiger, Bernd; Pich, Antje et al. (2015): Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013. Schlussbericht. Im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- Silvester, Jo; Konstantinou, Efrosyni (2010): Lighting, Well-being and Performance at Work: A review of the literatur. Report. City University London; Philips International. Available online: <http://openaccess.city.ac.uk/443/>, checked on 6/29/2015.
- Steidle, Anna; Werth, Lioba; Boer, Jan De; Sedlbauer, Klaus (2014): How to create sustainable light for users? Psychological mechanisms underlying lighting effects. In: *Proceedings Experiencing light 2014 : international conference on the effects of light on well-being, Eindhoven, The Netherlands, 10-11 November, 2014*, S. 78–81.
- Veitch, J. A.; Stokkermans, M. G. M.; Newsham, G. R. (2013): Linking Lighting Appraisals to Work Behaviors. In: *Environment and Behavior* 45 (2), S. 198–214.
- Wessolowski, Nino; Koenig, Heiko; Schulte-Markwort, Michael; Barkmann, Claus (2014): The effect of variable light on the fidgetiness and social behavior of pupils in school. In: *Journal of Environmental Psychology* 39, S. 101–108.

Visualisierung von Lichtlösungen

*B.A. Gregor Gärtner, Prof. Dr.-Ing. Paul W. Schmits
HAWK (Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst) Hildesheim*

Problemstellung

Was gibt es für Möglichkeiten Licht darzustellen? Gibt es eine beste/perfekte Lichtdarstellung? Als Lighting Designer beschreibt man seine Idee von Licht & Raum in Bezug auf den Menschen. Bis Ideen umgesetzt werden, müssen viele Dinge mit anderen Beteiligten geklärt und veranschaulicht werden. Wir kommunizieren neben der Sprache (60%) hauptsächlich über Bilder (40%), um unsere Ideen & Gedanken zu visualisieren. Selten machen wir uns Gedanken, warum und wie wir bestimmte Bilder erzeugen. Oft mangelt es am Wissen über die Möglichkeiten, die es gibt Licht darzustellen. Hier setzt dieser Beitrag an.

Ziel

Ziel ist es eine Übersicht zu gestalten. Dabei besteht der Anspruch darin, den größtmöglichen Überblick von Lichtvisualisierungsmöglichkeiten bzw. Techniken zu geben. Der Fokus liegt darauf, ein nachhaltiges System zu entwickeln, in das man jegliche Darstellungsform der Lichtvisualisierung auch im Nachhinein einsortieren kann. Es berücksichtigt dabei die aktuellen und zukünftigen Möglichkeiten, Licht darzustellen. Das Ordnungssystem wird als Prozess verstanden, was sich im Laufe der Zeit noch an einigen Stellen anpassen und verändern, beziehungsweise weiterentwickeln kann.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Im gesamten Lichtbereich gibt es noch keine weitreichende Übersicht, über Lichtdarstellungen mit Bildbeispielen. Das Überblicksystem, welches aus fünf Überkategorien besteht, ist als Vorreiter im gesamten europäischen Lichtbereich zu betrachten. Einzig die Firma Erco hat sich auf ihrer Website mit dem Thema der Lichtvisualisierung im kleineren Maßstab bereits auseinandersetzt und diese anhand weniger Bildbeispiele dargestellt.

Realisierungsgrad

Im Rahmen meiner Bachelorabschlussarbeit wurde das Grundgerüst des Systems gestaltet, sowie aussagekräftiges Bildmaterial zu jeweiligen Kategorien gesammelt. Momentan wird die Übersicht weiter vervollständigt und weiterentwickelt. In naher Zukunft sind Forschungen im Bereich Virtual Reality und Visualisierung von Lichtlösungen geplant. Am Ende des Masterstudiums ist eine Veröffentlichung in gedruckter und digitaler Form geplant.

Visualization of lighting solutions

*Gregor Gärtner, Prof. Dr.-Ing. Paul W. Schmits
HAWK (University of Applied Sciences and Arts) Hildesheim*

Issue

What are the possibilities of representing light? Is there a best / perfect way of representing light? As a lighting designer the own idea of light and space in relation to other humans is being described. Until these ideas are realized, many things need to be clarified with other participants and have to be illustrated. In addition to the language (60%) we mainly communicate through images (40%) to visualize our ideas and thoughts. Rarely we worry why and how we create certain images. Often there is a lack in knowledge of the possibilities that exist to represent light. This essay is intended to provide a possible solution for this problem

Aim

The aim is to create the best possible overview of light visualization capabilities and techniques. The focus is on developing a sustainable system in which one can categorize any kind of representation of light visualization, also in retrospect. It includes current and future options of light representations. The classification system is understood as a process, which can adapt and change over time and allows enhancements of certain aspects.

Description of the innovation/»best practice«

In the professional field of lighting, there is no far-reaching overview of light representations with image examples. The classification system, which consists of five main categories is to be regarded as a pioneer system in the European field of professional lighting. The issue of light visualization has only been dealt with so far by the company Erco, as can be seen on their website. They created an overview of light visualization, but only with a few picture examples.

Level of realization

In my bachelor thesis (Examiner: Prof. Dr. Paul W. Schmits and Dipl. Ing Edwin Smida) the basic structure of the system was designed and powerful imagery were found to describe the categories. Currently, the system is further supplemented and developed. Future research in the field of virtual reality and visualization of lighting solutions is being considered. At the end of the master program one publication in printed and digital form is planned.

Visualisierung von Lichtlösungen

Gregor Gärtner, Prof. Dr.-Ing. Paul W. Schmits
HAWK (Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst) Hildesheim,
Renatastraße.11, 31134 Hildesheim

Zusammenfassung

Eine Skizze, ein Rendering, ein Modell oder eine Beleuchtungsstärketabelle...? Was gibt es für Möglichkeiten Licht darzustellen? Möchte man Licht visualisieren, muss man sich zuerst die Fragen stellen, wie und was man genau darstellen möchte. Oft scheitert es daran, dass man keinen Überblick über die vorhandenen Möglichkeiten hat. Es wird im Folgenden ein eigens entwickeltes Ordnungssystem vorgestellt, welches einen größtmöglichen Überblick geben soll Licht darzustellen. Der Fokus liegt darauf ein nachhaltiges System zu entwickeln, in das man jegliche aktuelle und zukünftige Visualisierungstechniken einsortieren kann. Das System soll dabei als Inspirationsquelle für eigene Arbeiten dienen und ist bewusst frei von einer Wertung gehalten.

1 Problemstellung



Abb. 1: Mischdarstellungen Berliner Kindl Brauerei | Gregor Gärtner

Was gibt es für Möglichkeiten Licht darzustellen? Gibt es eine beste/perfekte Lichtdarstellung? Als Lighting Designer beschreibt man seine Idee von Licht & Raum in Bezug auf den Menschen. Bis Ideen umgesetzt werden, müssen viele Dinge mit anderen Beteiligten geklärt und veranschaulicht werden. Wir kommunizieren neben der Sprache (60%) hauptsächlich über Bilder (40%), um unsere Ideen & Gedanken zu visualisieren. Selten machen wir uns Gedanken, warum und wie wir bestimmte Bilder erzeugen. Oft mangelt es am Wissen über die Möglichkeiten, die es gibt Licht darzustellen. Hier setzt dieser Beitrag an. Ziel ist es eine Übersicht zu gestalten. Dabei besteht der Anspruch darin, den größtmöglichen Überblick von Lichtvisualisierungsmöglichkeiten bzw. Techniken zu geben. Der Fokus liegt darauf, ein nachhaltiges System zu entwickeln, in das man jegliche Darstellungsform der Lichtvisualisierung auch im Nachhinein einsortieren kann. Es berücksichtigt dabei die aktuellen und zukünftigen Möglichkeiten, Licht darzustellen. Das Ordnungssystem wird als Prozess verstanden, was sich im Laufe der Zeit noch an einigen Stellen anpassen und verändern, beziehungsweise weiterentwickeln kann. Im gesamten Lichtbereich gibt es noch keine weitreichende Übersicht, über Lichtdarstellungen mit Bildbeispielen. Das Überblicksystem, welches aus fünf Überkategorien besteht, ist als Vorreiter im gesamten europäischen Lichtbereich zu betrachten. Einzig die Firma Erco hat sich auf ihrer Website mit dem Thema der Lichtvisualisierung im kleineren Maßstab bereits auseinandersetzt und diese anhand weniger Bildbeispiele dargestellt.



Abb. 2 Lichtvisualisierung von ERCO | <http://www.erco.com/guide/designing-with-light/visualisierung-light-2652/de/> (16.07.2015, nicht mehr verfügbar)

Das Überblicksystem, welches man auf der Website von ERCO vorfand, ist ein in sich geschlossenes System. Es war übersichtlich aufgebaut und einfach verständlich. Es wurden verschiedene Visualisierungstechniken anhand von drei Überkategorien gezeigt. Teilweise wurden Vor- und Nachteile, sowie spezielle Informationen genannt. Es wurde mit Aus-

nahme der Kategorie Zeichnung, nicht mehr als ein visuelles Beispiel angeführt, so dass mitunter nur ein Bild der Kategorie als Beispiel diene. Die Vielfalt der verschiedenen Kategorien und Techniken in sich, kann so nicht sehr gut wiedergegeben werden. Das System ist dennoch in sich schlüssig gewesen und bot einen Einblick über die möglichen Lichtvisualisierungsformen.

2 Das Ordnungssystem

Das folgende, eigens entwickelte Ordnungssystem ist ein weiterer Lösungsversuch, das Thema Überblickssysteme von Lichtvisualisierungen im Lighting Design Kontext darzustellen. Dabei besteht der Anspruch darin, den größtmöglichen Überblick von Lichtvisualisierungsmöglichkeiten bzw.-techniken zu geben. Der Fokus liegt darauf, ein nachhaltiges System zu entwickeln, in das man jegliche Darstellungsform der Lichtvisualisierung auch nachträglich einsortieren kann. Es berücksichtigt dabei die aktuellen und zukünftigen Möglichkeiten, Licht darzustellen. Es wird ein großer Wert auf Bildbeispiele gelegt, um die verschiedenen Visualisierungen möglichst aussagekräftig zu veranschaulichen. Das Ordnungssystem ist als Prozess zu verstehen, was sich im Laufe der Zeit noch an Stellen anpassen und verändern wird und soll. Es erfolgt weitestgehend noch keine Wertung der Darstellungstechniken, sondern nur ein Überblick über mögliche Darstellungsformen. Diese sollen vor allem als Inspirationsquelle dienen. Grundsätzlich richtet sich der Aufbau des Ordnungssystems nach der Erstellung oder/und nach der Wiedergabe der Darstellungen. Wenn die Möglichkeit besteht, eine Darstellung sowohl in der einen, als auch der anderen Technik zu erstellen, so wird stets die Variante verwendet, die am meisten genutzt wird, unserem technischen Fortschritt entspricht oder im allgemeinen Sprachgebrauch gemeint ist. Das Ordnungssystem basiert auf zwei Grundbegriffen und deren dimensionaler Anmutung. Somit wird im Folgenden »real«, »virtuell«, in sich wiederum in zweidimensional und dreidimensional, sowie deren Mischdarstellung unterschieden.

»Real« bedeutet »in der Wirklichkeit vorhanden«. Es besteht in der Wirklichkeit, man kann es anfassen, es ist physisch, greifbar, gegenständlich oder materiell. »Virtuell« bedeutet »nicht echt, nicht in Wirklichkeit vorhanden, aber echt erscheinend« Es handelt sich also um eine Nachbildung der Realität, die den Anschein erweckt, real zu sein. »Zweidimensional« bedeutet »in zwei Dimensionen angelegt oder wiedergegeben, flächig«, »Dreidimensional« bedeutet »in drei Dimensionen angelegt oder wiedergegeben, räumlich« Aus diesen Begriffen ergeben sich folgende fünf Überkategorien.

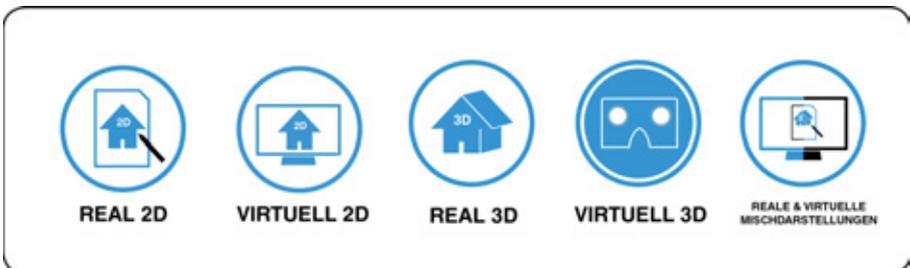


Abb. 3: Die fünf Überkategorien des Ordnungssystems

2.1 Real 2D (Händische Darstellungen)

Die erste Überkategorie »Real 2D« beinhaltet jegliche Darstellungsform, die zweidimensional mit der Hand erstellt wird. Es wird unter Umständen mit »realen« Materialien gearbeitet, die man anfassen und haptisch erleben kann. Man arbeitet dabei direkt auf einem Medium mit verschiedenen Techniken und Werkzeugen. In unserer heutigen Zeit ist es mittlerweile möglich, auch mit Hilfe eines »Grafik Tablets« am Rechner Zeichnungen bzw. Skizzen digital zu erstellen. Der Vorgang bleibt jedoch eine händische Übersetzung mit Ungenauigkeiten des Erstellers und realer Informationsangabe.



Abb. 4: Kategorie: Real 2D | Berliner Kindl Brauerei als Zeichnung | Gregor Gärtner

2.2 Virtuell 2D (Rechner erzeugte Darstellungen)

Die zweite Überkategorie »Virtuell 2D«, beinhaltet alle Lichtdarstellungsformen, die künstlich am Rechner entstehen. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um zweidimensionale Bilder, wie Ansichten, Schnitte, Grundrisse etc. oder dreidimensionale Bilder, wie z.B. Perspektiven handelt. Es sind alles nur zweidimensionale Darstellungen, da diese flach an einem Bildschirm entstehen oder/und mit Hilfe eines Bildschirms beziehungsweise eines Projektors flächig wiedergegeben werden. Dadurch, dass wir unser Umfeld bzw. unsere Peripherie permanent bewusst oder unterbewusst wahrnehmen, können wir in den virtuell erstellten Raum nie komplett eintauchen.



Abb. 5: Kategorie: Virtuell 2D | Berliner Kindl Brauerei als Rendering & Falschfarbendarstellung | Gregor Gärtner | Felix Ewald | Meggy Rentsch

2.3 Real 3D (Physische, modellhafte Darstellungen)

Die dritte Kategorie ist »Real 3D«, sie beinhaltet alle dreidimensionalen realen, physischen, greifbaren Darstellungstechniken. Dazu gehören in erster Linie Modelle, die die Form, Beschaffenheit, Maßverhältnisse veranschaulichende Ausführung eines vorhandenen oder noch zu schaffenden Gegenstandes in einem bestimmten (meistens verkleinernden) Maßstab darstellen. Es wird dreidimensional mit realen Materialien und Licht gearbeitet. Dabei gibt es verschiedene Ausarbeitungsqualitäten und Maßstäbe.

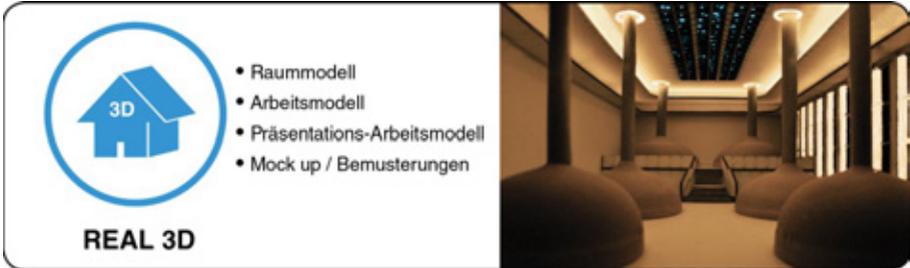


Abb. 6: Kategorie: Real 3D | Berliner Kindl Brauerei als Modell (Foto: Langzeitbelichtung, Phosphoreszierende Farbe) | Gregor Gärtner

2.4 Virtuell 3D (Peripherie umfassende, Rechner gestützte Wiedergabe)

Die vierte Kategorie »Virtuell 3D« beinhaltet keine eigenen Darstellungstechniken, sondern Wiedergabelösungen, die im Unterschied zur Kategorie »Virtuell 2D« das Umfeld, die Peripherie miteinschließen bzw. den Nutzer von der Außenwelt abschotten. Beim Nutzer kann sich dadurch schneller das Gefühl einstellen, sich wirklich in dem virtuellen Raum zu befinden. Weiterhin beinhaltet es mögliche zukünftige Verfahren zur Visualisierung von Lichtlösungen.

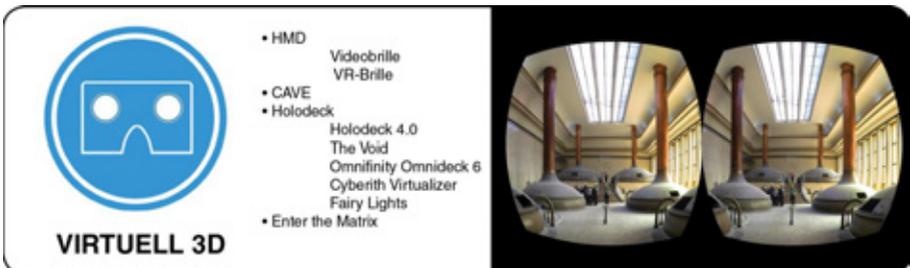


Abb. 7: Kategorie: Virtuell 3D | Berliner Kindl Brauerei Sicht einer VR-Brille | Gregor Gärtner

2.5 Reale und virtuelle Mischdarstellungen (Kombinierte Darstellungen)

Die fünfte und letzte Kategorie »**Reale und Virtuelle Mischdarstellungen**« beinhaltet Kombinationen aus den vier vorherigen Kategorien. Es handelt sich um Mischdarstellungen, die entweder in verschiedenen Verfahren erstellt wurden, oder in der Wiedergabe auf verschiedene Techniken zurückgreifen.



Abb. 8: Kategorie: Reale & Virtuelle Mischdarstellungen | Berliner Kindl Brauerei als Zeichnung/Foto/Photoshop| Gregor Gärtner

Softwaregestützte Lichtgestaltung und Wirtschaftlichkeitsanalyse eines Beleuchtungssystems am Fallbeispiel Welfenschloss Herzberg

Sabrina Hoppstock, Ulrich Fischer-Hirchert, Hochschule Harz
ufischerhirchert@hs-harz.de Friedrichstr. 57. 38855 Wernigerode

Problemstellung

Moderne, energieeffiziente Beleuchtung und deren Auswirkungen und Einsatzmöglichkeiten sind ein aktuelles Thema und bieten ein breites Gebiet der Forschung. Thema dieser Fallstudie ist es, ein Beleuchtungskonzept anhand eines Fallbeispiels vorzustellen, das die Wirtschaftlichkeit und Darstellung moderner Beleuchtung im Vergleich zur existierenden Beleuchtung aufzeigt. Ziel

Das Lichtkonzept soll dabei so entwickelt werden, dass die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten des Rittersaals in einem Lichtkonzept vereinigt werden und entsprechende Effekte erzielt werden. Dabei steht sowohl die geringe Beleuchtungsstärke im Mittelpunkt, als auch die deutlich zu hohen Strom- und Betriebskosten der veralteten Beleuchtung. Als Ausstellungsort vieler Exponate muss der Rittersaal den Beleuchtungskriterien eines Museums angepasst werden und auch den Anforderungen einer Arbeitsplatzbeleuchtung entsprechen, da im Saal regelmäßig Ratssitzungen stattfinden. Neben einer Simulation mittels der Software DIALux werden auch die Ergebnisse einer Wirtschaftlichkeitsanalyse der existierenden Technologie im Vergleich zu dem neuen Beleuchtungskonzept vorgestellt.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Die vielfältige Nutzung des Rittersaals stellt den Beleuchtungsplaner vor eine große Herausforderung, denn es gilt ein Konzept zu entwickeln, dass alle Möglichkeiten der Nutzung durch eine einzige Beleuchtung vereinigt. Dabei sind gewisse Kriterien einzuhalten, wie die Beleuchtung der Ratssitzung mit mindestens 500 Lux im Arbeitsbereich als auch das Erschaffen einer attraktiven Atmosphäre für die Event-Dinner, die Konzerte und für die Ausstellung der Exponate.

Realisierungsgrad

Das Beleuchtungskonzept wurde abgeschlossen und vorgestellt. Das Konzept befindet sich derzeit in der Umsetzungsphase.



Szenario Ratssitzung



Szenario Konzert



Szenario Eventgastronomie

Lighting design and efficiency analysis for the lighting system of the Herzberg castle based on software

*B. Eng. Sabrina Hoppstock, Prof. Dr. Ulrich Fischer-Hirchert
Hochschule Harz – University of Applied Sciences,
Friedrichstr. 57, 38855 Wernigerode, Germany*

Problem

Innovative, energy-efficient lighting and their effects and application possibilities are a topical subject and offer a wide area of research. Subject of this case study is to introduce a lighting concept, which illustrates the economic efficiency and representation of modern lighting in comparison to the existing lighting of the object.

Motivation

The light concept should be developed in a way, to combine the varied possibilities of utilization of the knight's hall in one light draft and suitable effects for every utilization should be achieved. An important part of the draft is to improve the low density of light as well as the goal to decrease the high electricity costs and operating costs of the outdated lighting.

As an exhibition venue of many exhibits, the knight's hall has to be adapted on the lighting criteria of a museum and also correspond to the demands of a workplace lighting because regularly council meetings take place in the hall. Alongside a simulation with the software DIALux, the results of an economic efficiency analysis of the existing technology in comparison to the new lighting draft are presented.

Description of the innovation /»best practice«

The varied use of the knight's hall presents a big challenge for the lighting planner, because it is necessary, to combine all different kinds of utilization in one lighting draft. Besides, certain criteria are to be kept, for example the lighting of the council meeting with at least 500 lux in the field of work as well as creating an attractive atmosphere for the event dinners, the concerts and for the exhibition of the exhibits.

Implementation

The concept is finished and introduced. The lighting concepts is currently in the implementation phase.

Verkaufsbeleuchtung 4.0: Multifunktionales Leuchtenkonzept

Barfuß, M., FH Südwestfalen; Kirsten, M. Bära GmbH & Co. KG

Problemstellung

LED-Leuchten haben sich in der Verkaufsraumbeleuchtung zwar weitgehend durchgesetzt, schöpfen ihr Potential jedoch bei weitem nicht aus. Gleichzeitig ist die Existenz europäischer Leuchtenhersteller durch starke Konkurrenz aus Fernost gefährdet und das Online-Geschäft bedroht den Einzelhandel, einen wichtigen Kunden der Lichtbranche.

Stand der Technik

Im Rahmen der LED-Technologie wurden Leuchten entwickelt, die allen Anforderungen der Verkaufsraumbeleuchtung gerecht werden. Dabei handelt es sich beleuchtungstechnisch aber um statische Lösungen, bei denen Lichtspektrum und Lichtstärkeverteilung gemäß der Beleuchtungsaufgabe festgelegt sind und nur durch Leuchtentausch verändert werden können.

Entwicklungsziel

Die Leuchte der Zukunft soll die zu beleuchtenden Produkte im Verkaufsbereich über Sensorik erkennen und Lichtspektren warenspezifisch zur Verfügung stellen, der Betreiber soll flexibel über die Lichtstärkeverteilung den Charakter der Verkaufseinrichtung verändern können. Des Weiteren dient die Leuchte zur Informationserfassung für den Verkaufserfolg bestimmter Waren und Warengruppen. Damit wird sie sowohl den Anforderungen nach Verkaufsförderung als auch der Datenerfassung über ihre Wirksamkeit gerecht. Mit geringem zusätzlichem Aufwand an Sensorik, Software und Elektronik in den Leuchten könnte so ein erheblicher Mehrwert und damit ein Wettbewerbsvorteil gegenüber Fernost geschaffen werden.

Versuchsaufbau

Die Ergebnisse der ZIM-Förderprojekte „HIREFLED“ und „EMPL“ haben bereits erste Lösungen aufgezeigt. Weitere Forschungsprojekte werden derzeit bearbeitet. Der aktuelle Stand dieser Projekte wird vorgestellt.

Fazit / Verbesserungen

Im Vortrag werden Wege und Möglichkeiten aufgezeigt, die in den Entwicklungszielen aufgezeigten Aufgabenstellungen zu realisieren und damit die durch die LED-Technologie neuen beleuchtungstechnischen Möglichkeiten zu nutzen.

Retail Lighting 4.0: Multifunctional Luminaires

Barfuß, M., FH Südwestfalen; Kirsten, M. Bära GmbH & Co. KG

Problem

LED luminaires have been state of the art in retail lighting for some time now. However regarding their enormous possibilities, they still underachieve by far. At the same time the existence of the European lighting industry is endangered by strong competition from the Far East and in addition the retail industry, one of their important customers, is threatened by online stores.

State of the Art

Implementing LED technology we developed luminaires meeting all the requirements of retail lighting. All those luminaires, however, were static solutions thoroughly matched to the customer's demand. The spectrum as well as the luminous intensity distribution were fixed and could only be varied by exchanging the luminaire.

Development Objectives

In retail lighting a future luminaire should recognize the products to be illuminated using built-in sensors and then provide suitable product specific light spectra. Furthermore the operator should be able to modify the character of a retail area by electronically changing the luminous intensity distribution of the corresponding luminaires. Besides a future luminaire is supposed to collect sales data of certain products and groups of products. Thus it meets the requirements of sales promotion simultaneously validating its efficiency by the means of data acquisition. With low extra investment in sensors, software and electronics a considerable additional value and thus a big competitive advantage could be created towards the Far East.

Experiment Set-up

The results of the projects "HIREFLED" and "EMPL" funded by the German federal ministries of education and research as well as of economy and energy have already indicated the first solutions. Further research projects are worked on at present. The current status of these will be presented.

Results / Improvements

This presentation shows ways to realize the development objectives and how to take advantage of the technical possibilities given by the LED technology.

Verkaufsbeleuchtung 4.0: Multifunktionales Leuchtenkonzept

*Prof. Meike Barfuß, Fachhochschule Südwestfalen Haldener Straße 182, 58095 Hagen
Dr. Martin Kirsten, BÄRO GmbH & Co. KG Wolfstall 54 -56, 42799 Leichlingen*

Zusammenfassung /Summary

Der Beitrag berichtet von den Ergebnissen zweier Forschungsförderprojekte, die sich mit noch nicht genutzten Möglichkeiten der LED – Technologie befassen. Es werden Möglichkeiten aufgezeigt, mit LED – Technologie universell nutzbare Lichtquellen zu entwickeln.

1 Verkaufsraumbelichtung 4.0 – Ein multifunktionales Leuchtenkonzept

1.1 Problemstellung und Stand der Technik

Wenn sich Verkaufseinrichtungen auch zukünftig gegenüber dem Online-Handel behaupten wollen heißt die Lösung dafür „Erlebniseinkauf“. Grundlage dafür ist unter anderem eine völlig flexible Beleuchtungstechnik.

Mit Einführung der LED–Technologie werden Leuchten entwickelt, die vielen aktuellen Anforderungen an die Beleuchtungsqualität und neuen Kundenanforderungen an die Lichttechnik gerecht werden:

- Hohe Energieeffizienz (Systemlichtausbeute) und damit massive Energieeinsparung
- Lebensdauer der Leuchtensystemtechnik bis zu 50.000 Stunden und damit eine Betriebsfähigkeit in Verkaufseinrichtungen bis zu 8 Jahren.
- Flexible Lichtfarben, die die Steuerung der Farbtemperatur im Bereich von Kerzen- bis Tageslicht ermöglichen, farbiges Licht eingeschlossen.

Damit ist es inzwischen möglich geworden, alle Funktionen der klassischen Lichttechnik durch LED-Lichtquellen und deren Steuerung zu ersetzen und flexibel zu gestalten. Das bedeutet aber nicht, dass alle Möglichkeiten der LED-Technologie bereits umgesetzt wären.

Lösungen in LED-Technik orientieren sich zur Zeit immer noch bis auf wenige Ausnahmen (Lichtfarbensteuerung, elektronische Systemsteuerungstechnik) an der klassischen Beleuchtungstechnik, dies gilt auch für das Design der Leuchten. Es handelt sich immer noch um weitestgehend statische Beleuchtungslösungen, insbesondere was die erzeugten Lichtspektren und die Lichtstärkeverteilung der Leuchten betrifft.

1.2 Entwicklungsziele

In zwei Forschungsförderprojekten des zentralen Innovationsprogrammes ZIM konnte aufgezeigt werden, welche Möglichkeiten die LED-Technologie für die Zukunft bietet.

Im Teilvorhaben „Hochintegriertes multifunktionales Systemdesign“ des ZIM-Projektes „HIREFLED“ wurden folgende Möglichkeiten der LED-Technologie in Funktionsmustern realisiert:

- Unter Nutzung der charakteristischen LED-Lichtausstrahlung in einen Halbraum konnte gezeigt werden, dass LED-Reflektoren mit reflexionsverstärkten Oberflächen Wirkungsgrade größer 90% erreichen können.
- Mit dem Funktionsmuster einer 4-Kanal-LED-Array-Leuchte konnten flexible Lichtspektrern erzeugt werden, die über Mikroprozessortechnik je nach Bedarf der zu beleuchtenden Lebensmittelfrischeprodukte aufgerufen werden konnten.
- Über eine entsprechende Sensortechnik war das Funktionsmuster in der Lage, die Warengruppen „Fleisch und Fleischerzeugnisse“ und „Back- und Konditoreiwaren“ zu unterscheiden und das dafür vorgesehene Lichtspektrum über das 4-Kanal-LED-Array zu erzeugen.

Die erzeugten LED-Lichtspektrern für Lebensmittelfrischebeleuchtung entsprachen in ihrer Qualität denen der klassischen Lichttechnik, was in einer Abmusterungsuntersuchung mit Ware nachgewiesen werden konnte.

Das zweite ZIM-Forschungsförderprojekt „Entwicklung einer elektronisch gesteuerten energiesparenden Multichip-Platinenleuchte“ hatte das Ziel, das Funktionsmuster einer 6-Kanal-LED-Lichtmaschine zu entwickeln und zu untersuchen, ob hiermit beliebige Lichtspektrern erzeugt werden können.

Abbildung 1 zeigt das Blockschaltbild der an der FH Südwestfalen in Hagen entwickelten Lösung.

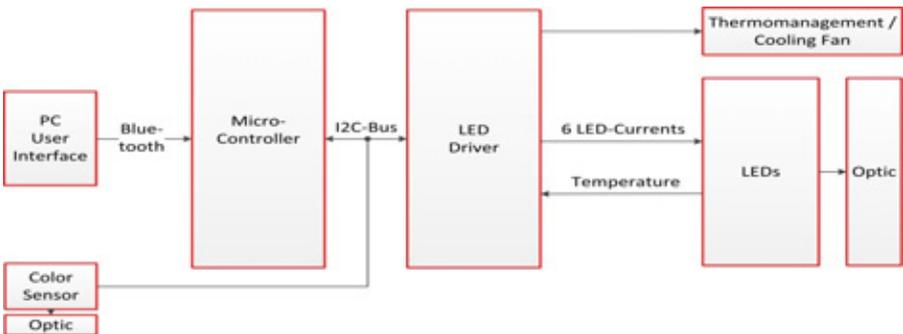


Abb. 1: Blockschaltbild 6-Kanal-Leuchte

Die 6 verwendeten LED-Typen waren als Ergebnis von Forschungsarbeiten der TU Darmstadt vorgegeben. Zur Steuerung der Lichtmaschine wurde eine Software entwickelt, die das Einstellen der LED-Lichtströme über PWM- und analoge Signale für jeden einzelnen Kanal ermöglicht. Zusätzlich beinhaltet die Software eine Spektrern-Verwaltung. Diese ermöglicht dem Benutzer die entwickelten und eingestellten Lichtspektrern zu speichern und zu einem späteren Zeitpunkt wieder hochzuladen.

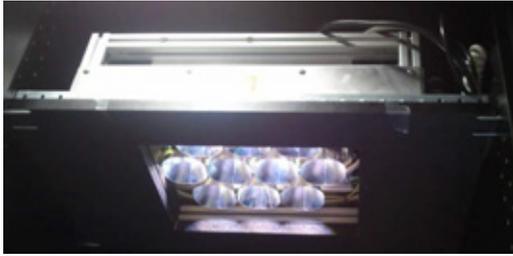


Abb. 2: Aufbau der Lichtmaschine Blockschaltbild 6-Kanal-Leuchte

Abbildung 2 zeigt die aufgebaute Laborlichtmaschine mit den zehn eingebauten 6-Kanal-LED-Platinen sowie den dazu gehörigen Reflektoren. Die 100 LED wurden auf den zehn identischen Platinen gleichmäßig verteilt.

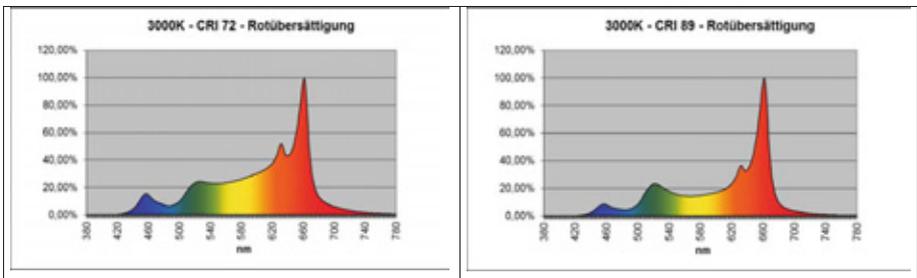
Abbildung 3 zeigt einen Blick auf die modifizierte Lichtmaschine mit nur sieben der zehn LED-Platinen und die streuenden, reflexionsverstärkten und segmentierten Reflektoren, die dafür sorgen, dass das unterschiedlich farbige Licht der 6-LED-Kanäle in Weißlicht gemischt wird.

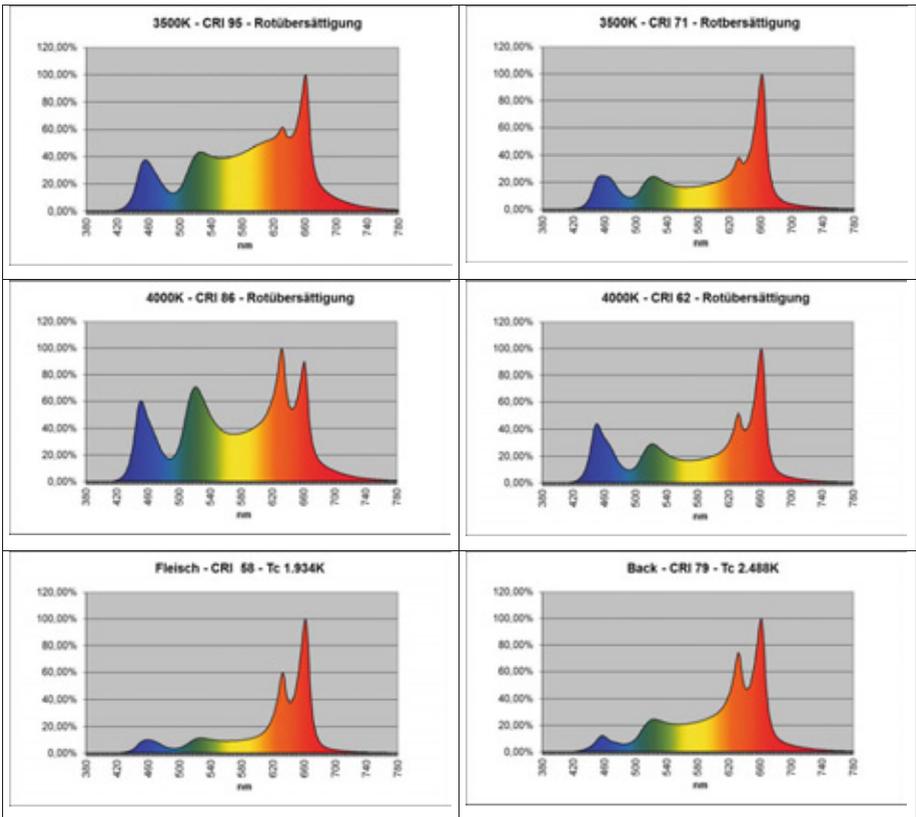


Abb. 3: LED-Platinen und Reflektoren

Im Lichtlabor der TU Darmstadt wurden die von der Laborlichtmaschine erzeugten Lichtfarben und Spektren vermessen. Es zeigte sich, dass die theoretisch berechneten Lichtspektren und deren Weißpunkte mit denen der Lichtmaschine übereinstimmten.

Beispiele der erzeugten Lichtspektren bei unterschiedlich vorgegebenen Weißlichtfarben zeigt Abbildung 4.





Es wurden inzwischen zirka 60 Lichtspektren erzeugt, die den Lichtspektren der klassischen Lampentechnik in Bezug auf Farbsättigung von Weißlichtspektren deutlich überlegen sind. Es wurden Weißlichtspektren mit einem CRI > 90 mit Farbübersättigungen der Farben „Rot“, „Blau“, „Grün“ und „Gelb“ bei ähnlichsten Farbtemperaturen von 3000K, 3500K und 4000k erzeugt. Weiterhin erlaubte die Lichtmaschine die Erzeugung von Weißlicht mit CRI-Werten von 80 bis 90, bei denen die Farbübersättigung der Farben „Rot“, „Blau“, „Grün“ und „Gelb“ bei ähnlichsten Farbtemperaturen von 3000K, 3500K und 4000K noch weiter erhöht werden konnte. Aktuelle Forschungsarbeiten im Fachgebiet „Licht“ der TU Darmstadt zeigen, dass bei Abmusterungsbewertungen diese Lichtarten in Bezug auf allgemeines Gefallen, Natürlichkeit und Lebendigkeit besser abschneiden als die leicht übersättigten Weißlichtfarben mit CRI > 90. Im Lichtlabor der Firma BÄRO wurden durch Nutzung der Lichtmaschine auch weiße Spezial-Lichtfarben für die Beleuchtung von Lebensmittelfrischeprodukten entwickelt (siehe Abbildung 4).

1.3 Ergebnisse

Das Funktionsmuster wurde zu einer verkleinerten Lichtmaschine in Form einer betriebsfähigen, in der geometrischen Größe einer üblichen Deckeneinbauleuchte weiterentwi-

ckelt. In den letzten Projektwochen erfolgten auch Ansätze, wie die gesättigten Weißlichtspektren über eine entsprechende Sensorik oder über eine DALI-Steuerung entsprechend der Situation vor Ort angesteuert werden können.

Projektergebnisse sind im Einzelnen:

- Entwicklung und Bau zweier Funktionsmuster von 6-Kanal-Lichtmaschinen und der Nachweis, dass damit beliebige Lichtspektren erzeugbar sind, die denen der klassischen Lichtquellentechnik überlegen sind.
- Entwicklung und Bau einer verkleinerten 6-Kanal-LED-Lichtmaschine in der Größenordnung einer üblichen Deckeneinbauleuchte.
- Entwicklung von Lichtspektren für die Lebensmittelfrischebeleuchtung mit vermindertem Warenschädigungspotential als Grundlage für die Entwicklung statischer LED-Array-Lösungen auf der Basis von LED-Leuchtstoffen.

Die zweite 6-Kanal-Lichtmaschine wird von der TU Darmstadt für die Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Lichtfarben- und Farbwiedergabe genutzt. Zielstellung ist hier die Festlegung eines neuen, nach menschlichen Empfindungen funktionierenden Farbbewertungssystems.

1.4 Ausblick

Die LED-Leuchten der Zukunft werden den folgenden Funktionen und neuen Kundenanforderungen gerecht werden müssen:

- Erzeugung elektronisch steuerbarer Lichtspektren nach den Vorstellungen des Betreibers
- Variable, elektronisch steuerbare Lichtstärkeverteilungen und Ausstrahlungswinkel
- Einsatz von Sensorik in den Leuchten, die diese selbstständig steuern und an die Vor-Ort-Situationen anpasst.
- Leuchten, die als Informationssammelsysteme arbeiten und dem Betreiber Informationen über die Wirksamkeit verkaufsfördernder Maßnahmen, Kundenakzeptanz und Kaufverhalten zur Verfügung stellen.
- Vernetzung der Leuchten und Beleuchtung mit der Gebäudeautomation.

In den bearbeiteten Forschungsprojekten wurden die Grundlagen für diese zukünftigen Entwicklungen geschaffen. Die LED-Technologie wird in Zukunft dazu führen, dass nicht nur die grundlegenden Funktionen einer Leuchte wie Lichtstärkeverteilung und Lichtspektrum steuerbar sind, sondern durch Sensorik und Datenerfassungssysteme eine Multifunktionalität entsteht.



Applikationsnahe Charakterisierung von Hochleistungs-LEDs für Projektionsanwendungen

Benjamin Schulz, OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Durch die weitreichenden Entwicklungen auf dem Gebiet der LED-Technologie sind Leuchtdioden für Projektionsanwendungen attraktiv geworden. Aufgrund der Leuchtdichtesteigerungen innerhalb der letzten Jahre eignen sie sich sowohl für den Einsatz in Pico-Projektoren als auch für die Anwendung in Beamern für den Heimkinobereich.

In Projektionsanwendungen werden die Halbleiterelemente oft bei sehr hohen Stromdichten von aktuell bis zu drei Ampere pro mm^2 betrieben. Bei möglichen Chipflächen von bis zu 12 mm^2 ergeben sich Spitzenbetriebsströme von 48 Ampere und Spitzenleistungen von etwa 180 Watt. Die Betriebsmodi reichen dabei vom Pulsbetrieb mit sehr kurzen Pulslängen bis zum Gleichstrombetrieb. Die Entwärmung der Bauteile während des Betriebs spielt eine äußerst wichtige Rolle, da die elektro-optischen Eigenschaften von LEDs eine deutliche Temperaturabhängigkeit aufweisen.

Die produktive Charakterisierung der Hochleistungs-LEDs erfolgt heute entweder durch eine Kurzpulsmessung bei einer Umgebungstemperatur von 25°C oder durch eine Dauerpulsmessung mit einer Kühlkörpertemperatur von 40°C . Die Lichtquellen werden jedoch erfahrungsgemäß unter anderen Betriebsbedingungen eingesetzt, die mithilfe der aktuellen Messeinrichtungen nicht hinreichend abgebildet werden können. Darüber hinaus ist es notwendig, die Leistungsgrenzen der LEDs auf der Anwendungsebene zu bestimmen, um die Produkte weiter verbessern zu können und deren Entwicklung zu forcieren.

Aus diesen Gründen wird eine neuartige Messanlage benötigt, die in der Lage sein soll, die Betriebsparameter Stromstärke, Kühlkörpertemperatur, Pulsfrequenz und Puls-Pausen-Verhältnis kontrolliert zu variieren und die Charakteristika Durchlassspannung, Lichtstrom und -spektrum der Bauteile zu bestimmen. In dem vorliegenden Beitrag soll ein Konzept einer für diese Zwecke geeigneten Messeinrichtung vorgestellt und eine mögliche Umsetzung beschrieben werden.

Application-related characterization of high-power LEDs for projection

Benjamin Schulz, OSRAM Opto Semiconductors GmbH

The extensive developments in LED technology made light-emitting diodes attractive for projection applications. Because of the luminance improvements that have been performed during the last years they have become suitable for pico projectors as well as for projectors for home cinema use.

In projection applications the semiconductors are mainly driven at very high current densities of currently up to four ampere per mm^2 . At available chip areas of up to 12 mm^2 , peak currents of 48 ampere and peak powers of 180 Watts can occur. The driving modes range from pulsed operation with very short pulse lengths to constant current operation. The cooling of the components during their operation plays a very important role because of the temperature dependency on the electro-optical characteristics of LEDs.

The characterization of high power LEDs at the end of the production is performed either by a short pulse measurement at a board temperature of 25°C or by a continuous pulse measurement at a heatsink temperature of 40°C . But, as experience teaches, the light sources are operated at different driving conditions which cannot be reproduced by the latest measurement setups. Moreover, it is necessary to find the performance limits of LEDs at application level to further improve the products and accelerate their development.

Because of these reasons, a new measurement setup is required, which shall be capable of modifying the driving parameters current, pulse frequency, duty cycle and heatsink temperature in a controlled manner. During operation the characteristics radiant flux or luminous flux, emission spectrum and forward voltage of the device have to be determined. In this paper a concept of a measurement setup for such purposes is presented and one possible implementation is described.

Applikationsnahe Charakterisierung von Hochleistungs-LEDs für Projektionsanwendungen

Benjamin Schulz,
OSRAM Opto Semiconductors GmbH
Leibnizstraße 4, 93055 Regensburg

Zusammenfassung

Hochleistungs-LEDs werden in Anwendungen, die eine hohe Leuchtdichte erfordern, wie zum Beispiel digitale Video- und Datenprojektoren, bei hohen Stromstärken von bis zu 48 Ampere und Kühlkörpertemperaturen von bis zu 80°C betrieben. Um verlässliche Aussagen über die elektro-optischen LED-Eigenschaften unter derartigen Applikationsbedingungen treffen zu können, wird eine neuartige Messeinrichtung benötigt. Diese muss in der Lage sein, die Parameter Stromstärke, Kühlkörpertemperatur, Pulsfrequenz und Puls-Pausenverhältnis kontrolliert zu verändern und die Charakteristika Durchlassspannung, Lichtstrom und -spektrum des Prüflings zu bestimmen. Im folgenden Beitrag werden ein Konzept einer solchen Messeinrichtung und dessen Umsetzung vorgestellt.

Einführung und Problemstellung

Hochleistungs-LEDs

Licht-emittierende Dioden, die in der Lage sind, eine hohe Strahl- bzw. Leuchtdichte zu erzeugen, werden als Hochleistungs-LEDs bezeichnet. Zu ihren Anwendungen zählen heute unter anderem Frontscheinwerfer im Automobil, sowie Video- und Datenprojektoren.

Die hohe optische Ausgangsleistung wird durch hohe Stromdichten innerhalb des Halbleiters von aktuell bis zu vier Ampere pro mm^2 erzeugt. Bei einer Chipfläche von bis zu 12 mm^2 kann der Strom in Durchlassrichtung im Pulsbetrieb Spitzenwerte von 48 Ampere erreichen [1]. Die dementsprechend hohe Verlustleistung erfordert einen hervorragenden thermischen Kontakt zwischen den LED-Chips, dem Träger und der Wärmesenke. Aus diesem Grund werden derartige Chips für Projektionsanwendungen direkt auf Substrate mit sehr hoher Wärmeleitfähigkeit aufgebracht, die gleichzeitig zur elektrischen Kontaktierung genutzt werden können. Ein Beispiel für eine solche LED ist in Abbildung 1 gezeigt.



Abb. 1: Foto einer Hochleistungs-LED für Projektionsanwendungen mit einer Emissionsfläche von 12 mm^2 (OSRAM OSTAR Projection Power LE A P3W).

In LED-Projektoren kommen meist drei Leuchtdioden zum Einsatz, eine für jede Primärfarbe (rot, grün, blau). Diese werden oft sequenziell mit unterschiedlichen Tastgraden betrieben, um einen bestimmten Weißfarbort zu erreichen.

Problemstellung

Produktiv werden Hochleistungs-LEDs für Projektionsanwendungen entweder durch eine Kurzpulsmessung bei einer Board- bzw. Lötpointtemperatur von 25°C [1] oder durch eine Dauerpulsmessung bei einer Kühlkörpertemperatur von 40°C charakterisiert [2]. Die Leuchtdioden werden jedoch erfahrungsgemäß innerhalb der Applikation unter abweichenden Betriebsbedingungen eingesetzt, die mit aktuellen Messeinrichtungen nicht vollständig abgebildet werden können.

Tabelle 1 zeigt die unterschiedlichen produktiven Messparameter von Hochleistungs-LEDs für Projektionsanwendungen zweier unterschiedlicher Hersteller verglichen mit den aktuell üblichen Applikationsbedingungen.

Tab. 1: Messparameter zweier Hersteller von Hochleistungs-LEDs und Betriebsbedingungen in der Anwendung [1] [2].

Betriebsparameter	Hersteller 1	Hersteller 2	Applikation
Stromdichte	3 A/mm ²	2,5 A/mm ²	...4 A/mm ²
Pulsfrequenz	1000 Hz	> 240 Hz	120...1000 Hz
Tastverhältnis	25% / 50%	25% / 50%	10%...100%
Temperatur	T _{board} = 25 °C	T _{heatsink} = 40 °C	T _{heatsink} = 40...80 °C

Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit besteht darin, ein Messsystem zu konzeptionieren und aufzubauen, das in der Lage ist, die Bauteile unter den aktuellen Betriebsbedingungen von LED-basierten Projektoren zu charakterisieren. Darüber hinaus sollen die Halbleiter an ihre Betriebsgrenzen geführt werden können, um ihre Entwicklung voranzutreiben.

Die Charakterisierung beinhaltet die Bestimmung der elektrischen Eigenschaften Durchlassstrom und -spannung, sowie die Messung des Strahlungsflusses und dessen spektraler Verteilung. Daraus lassen sich sowohl die relevanten lichttechnischen Größen, wie der Lichtstrom, als auch weitere relevante Daten, wie beispielsweise der Farbort der Lichtquelle ableiten.

Die Stromstärke in Durchlassrichtung soll im Bereich von einem bis 60 Ampere einstellbar sein, bei einer maximalen Spannung von zehn Volt. Der Strom muss im Pulsbetrieb mit Frequenzen zwischen 120 und 1000 Hz und einem variablen Tastverhältnis von 10 bis 100% (Gleichstrombetrieb) bereitgestellt werden können.

Die Messeinrichtung soll zugleich die Möglichkeit bieten, die elektro-optischen Eigenschaften bei einer einstellbaren Kühlkörpertemperatur zwischen 25 °C und 80 °C aufzunehmen.

Konzept

Messung der optischen Kennwerte

Da LEDs gemessen werden, die lediglich in den Halbraum oberhalb ihrer Emissionsfläche strahlen, kann die Messung des Strahlungsflusses mithilfe einer Ulbrichtkugel in 2π -Konfiguration erfolgen. Hierbei befindet sich der Prüfling an der inneren Wandung der Kugel und nicht, wie bei einer 4π -Messung üblich, im Zentrum der Kugel. Die geometrische Ausdehnung und die optischen Eigenschaften des Prüflings haben einen Messfehler zur Folge, der durch die Wahl einer Ulbrichtkugel mit großem Durchmesser reduziert werden kann. Dies geht jedoch mit einem reduzierten Signalpegel am Detektor einher. Ein Innendurchmesser von etwa 500 Millimeter stellt einen guten Kompromiss für diesen Anwendungsfall dar. Hierbei wird auf die Empfehlungen Bezug genommen, die im technischen Bericht CIE-127:2007 (Messung von LEDs) [3] der internationalen Beleuchtungskommission beschrieben werden.

Temperierung

Als Referenztemperatur ist die Sperrschichttemperatur der Leuchtdiode zu präferieren, da diese direkt mit dem Strahlungsfluss verknüpft ist. Da diese jedoch nicht ohne großen Aufwand direkt zu bestimmen ist, können entweder die Board- oder die Kühlkörpertemperatur herangezogen werden. Für die Bestimmung der Boardtemperatur muss ein entsprechender Sensor, beispielsweise ein Thermoelement, in der Nähe der LED auf die Trägerplatte aufgebracht werden. Weil dies in einigen Fällen nur bedingt möglich ist und für jeden einzelnen Prüfling erneut durchgeführt werden muss, erscheint das Heranziehen der Kühlkörpertemperatur deutlich praktikabler.

Der Träger, auf dem der Prüfling mechanisch fixiert wird, fungiert als Kühlplatte. Deren Rückseite wird thermisch an die Kaltseite eines Peltierelements angebunden. Die Heißeite wird an ein passendes Kühlsystem angebunden, das entsprechend den Anforderungen dimensioniert werden muss.

Der maximale Wärmefluss, der während des Betriebs einer LED mit einer Stromstärke von 60 Ampere im Gleichstrombetrieb auftreten kann, lässt sich, bei einer angenommenen Vorwärtsspannung von fünf Volt und einem Wirkungsgrad von 10%, auf 270 Watt abschätzen. Hinzu kommt die Joulesche Wärme, die durch den inneren Ohmschen Widerstand des Peltierelements induziert wird. Der elektrische Widerstand nimmt bei einem entsprechend ausgewählten Hochleistungsmodul beispielsweise einen Wert von 1,84 Ohm an [4]. Dadurch ergibt sich bei einem Betriebsstrom von 15,4 Ampere ein zusätzlicher Wärmestrom von 436 Watt. Zusammen genommen berechnet sich also eine abzuführende Wärme von etwa 700 Watt.

Eine Wärme dieser Größenordnung ist erfahrungsgemäß mit einer Luftkühlung nur durch sehr großen Kühlflächen möglich. Darüber hinaus, sollte berücksichtigt werden, dass die Temperaturdifferenz zwischen Heiße- und Kaltseite die Leistungsfähigkeit des Peltierelements stark beeinflusst [5]. Aus diesen Gründen wird eine leistungsstarke Wasserkühlung in diesem Projekt bevorzugt.

Elektrische Versorgung

Die elektrische Versorgung der zu messenden LED geschieht mithilfe einer geeigneten Stromquelle. Maßgeblich für hochwertige Messergebnisse ist die Qualität des Stroms am Bauteil. Beispielsweise führen parasitäre Induktivitäten der Verbindungsleitungen zwischen Stromquelle und Prüfling zu verzerrten Strompulsen. Auch hat der Leitungswiderstand einen erheblichen Spannungsabfall am Kabel zur Folge. Aus diesen Gründen sind speziell für solche Anwendungsfälle angepasste, niederohmige und niederinduktive Verbindungen zu verwenden. Für die Messung der Vorwärtsspannung und der Stromstärke sollte die Vierleitermessmethode bevorzugt angewandt werden, um die Einflüsse der Leitungswiderstände auf den Messwert zu eliminieren.

Weiterhin muss beachtet werden, dass bei einigen Hochleistungs-LEDs der Kontakt zur Wärmesenke nicht elektrisch isoliert ist. Aus diesem Grund sollte der elektrischen Isolation der Wärmesenke gegenüber dem restlichen Aufbau eine besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, um unerwünschte Kurzschlüsse zu vermeiden.

Umsetzung

Im Rahmen der Umsetzung des Konzepts wurde zunächst ein umfassendes 3D-CAD-Modell erstellt und parallel dazu der praktische Aufbau durchgeführt. Die letzte Version des Modells ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abb. 2: Gerenderte 3D-Darstellung des Messplatzes.

In der gezeigten Messeinrichtung wird ein horizontaler Aufbau verwendet. Durch eine Linearführung kann der Prüfling an die Messöffnung der Ulbrichtkugel geführt werden. Der Prüfling wird auf einem massiven Kupferträger montiert, der durch ein Peltierelement temperiert wird. Dessen Heißeite ist zum Zweck der Entwärmung an eine entsprechend der Anwendung ausgelegte, geschlossene Wasserkühlung angebunden. Die Steuerung des

Peltierelements geschieht über einen adäquaten Treiber. Die Temperaturen der Umgebung, der Kalt- und der Heißseite werden durch Thermoelemente erfasst.

Den LED-Strom liefern zwei Stromquellen, die jeweils über eine maximale Stromstärke von 50 Ampere verfügen. Parallel verschaltet und synchronisiert können Stromstärken von bis zu 100 Ampere zur Verfügung gestellt werden [6]. Der Strom wird über nieder-ohmige Koaxialleitungen und verdrehte Leitungen zur LED geführt. Der Kupferträger wird durch Materialien wie PTFE (Polytetrafluorethylen) an den entsprechenden Kontaktstellen vom restlichen Aufbau elektrisch isoliert, um die einwandfreie Funktion der Stromquellen zu gewährleisten.

Das Auslesen der Daten und die Steuerung bzw. Regelung der Komponenten erfolgt zentral durch einen Computer, auf dem eine speziell für den Messplatz entwickelte Software läuft, die in NI LabView implementiert wurde. Durch sie können alle relevanten Daten protokolliert und visualisiert werden.

Fazit

Im Rahmen dieses Beitrags wurde ein Konzept für die Charakterisierung von Hochleistungs-LEDs, die in Projektionsanwendungen eingesetzt werden, vorgestellt. Dieses Konzept konnte mit Erfolg praktisch auf einen Messplatz übertragen werden. Die Messeinrichtung ist in der Lage, die LEDs bei den Bedingungen zu betreiben und zu vermessen, bei denen sie in der Applikation tatsächlich verwendet werden.

Mit einer möglichen Spitzenstromstärke von 100 Ampere und einem entsprechend dimensionierten Temperierungssystem, ist die Messeinrichtung in der Lage, die aktuellen Bauteile über ihre Grenzen hinaus zu betreiben und zu charakterisieren. Somit ist die Anlage geeignet, die Optimierung der Leuchtdioden auf ihre Anwendungsszenarien zu erleichtern und die Weiterentwicklung von Hochleistungs-LEDs voranzutreiben.

Literatur

- [1] OSRAM Opto Semiconductors GmbH: Datasheet LE B P1W: OSRAM OSTAR Projection Power. http://www.osram-os.com/Graphics/XPic1/00128677_0.pdf/LE B P1W - OSRAM OSTAR Projection Power.pdf. Version: 1.7, 2014.
- [2] Luminus Devices Inc.: PT-40-TE Product Datasheet: Thermally Enhanced LED Projection Chipset. http://luminus.com/products/Luminus_PT40TE_Datasheet.pdf. Version: 03, 2014.
- [3] Commission Internationale de l'Eclairage: CIE 127:2007 - Measurement of LEDs. 127 (2007). ISBN 978-3-901-90658-9.
- [4] European Thermodynamics Limited: Datenblatt Thermoelectric Module ETC-288-14-06-E. <http://www.europanthermodynamics.com/products/datasheets/ETC-288-14-06-E.pdf>. Version: 2013.
- [5] Laird Technologies: Thermoelectric Handbook. [http://cdn.lairdtech.com/home/brandworld/files/THR-BRO-Thermal Handbook 0110.pdf](http://cdn.lairdtech.com/home/brandworld/files/THR-BRO-Thermal%20Handbook%200110.pdf). Version: 2010.
- [6] Tektronics GmbH, Keithley Instruments: Datenblatt Model 2651A High Power System SourceMeter Instrument. <https://www.keithley.de/data?asset=55786>. Version: 2014.

Einfluss des spectral mismatch correction factors (smcf) bei der Lichtstrombestimmung

*Inca Leopoldo Sayanca, Klaus Trampert und Cornelius Neumann
Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland*

Problemstellung und Forschungsfragen

Die zunehmende Verwendung von LED-Leuchten führte in jüngster Vergangenheit zu einer Anpassung der gesetzlichen Rahmenbedingungen für Leuchtmittel und Charakterisierung, da ungenaue oder mangelhafte Angaben den Verbrauchern und der Umwelt schaden können. Der neue CIE S025 Standard und die EU-Richtlinie 874/2012 für die Energieverbrauchskennzeichnung bilden den aktuellen Rahmen. Dabei spielt die Messunsicherheit (MU) der zu untersuchenden Größen Lichtstrom eine sehr bedeutende Rolle.

Stand der Wissenschaft/Technik

Für die Bestimmung der MU bei Lichtstrommessungen von LED-Quellen muss die spektrale Zusammensetzung der Quelle berücksichtigt werden um die vorhandene Fehlanpassung des Photometers mit Hilfe des SMCF quantifizieren, bzw. korrigieren zu können. Bei LED-Quellen kann sich die relative Spektrale Verteilung im Winkelraum variieren. Durch die Kombination der Information des spektral auflösenden Spektrometers mit der eines integral bewertenden Photometers, können durch die Kenntnis des SMCF kleinere Messunsicherheiten erreicht werden.

Forschungshypothesen

Wenn die verwendeten Modelle die physikalischen Eigenschaften der Quelle gut abbilden, können mit mathematischer Software beliebig komplizierte Modelle gelöst und ihre Messunsicherheit mit der Monte Carlo-Methode berechnet werden. Anhand konkreter Beispiele konzentriert sich die Arbeit auf die Lichtstrommessung und ihre Messunsicherheit in Abhängigkeit von spektralen Variationen im Winkelraum.

Versuchsaufbau

Für die Messungen wird der Photometer eines Nahfeldgoniometers, sowie ein Spektrometer verwendet. Als Messobjekte dienen typische kommerzielle LED-Systeme, die eine Variation der spektralen Zusammensetzung im Winkelraum aufzeigen.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Es werden Lichtstromergebnisse ohne Korrektur, mit Korrektur eines repräsentativen SMCF und mit Korrektur eines winkelaufgelösten SMCF bestimmt. Ziel ist ein Vergleich der Ergebnisse mit Hinblick auf den optimalen Kompromiss zwischen Messunsicherheit und Messaufwand.

[1] CIE 198:2011: Determination of measurement uncertainties in photometry

[2] CIE S 025/E:2015: Test method for LED lamps, LED luminaires and LED modules

The influence of spectral mismatch correction factor (SMCF) on luminous flux determination

*Inca Leopoldo Sayanca, Klaus Trampert and Cornelius Neumann
Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany*

Research issue

The growing use of LED luminaires in the past few years has followed an adjustment of the law's terms for their measurement and characterisation in order to avoid that insufficient information consumers and environment harm. The new CIE S025 standard and the EU 874/2012 guideline for the energy consume labelling give the actual framework. The measurement uncertainty (MU) plays here an important part in the researched quantity luminous flux.

State of science/technology

To determine the luminous flux's MU of different LED systems it's necessary to know the spectral characteristics from the light source. With this information it's possible to determine the SMCF in order to quantify and to correct the maladjustment of the photometer. By LEDs it's possible to have angular varying Spectra. Combining the measured spectral information from a LED using a spectrometer with an integral photometer, the SMCF can be calculated and smaller measurement uncertainties on luminous flux can be achieved.

Research hypothesis

Complex physical models, which reproduce well as possibly the characteristics of the light source, can be used to calculate their MU with the Monte Carlo method by means of modern mathematical software. This work makes emphasis on the luminous flux measurement of sources with angular changes on their spectra and the measurement uncertainty calculation utilizing real examples.

Experimental setup

The measurements will be carry out with the photometer and spectrometer of a near field goniometer. The devices under test (DUT) are typical commercial LED sources, which show variable angular spectra.

Results in comparison with previous findings

Luminous flux measurement results without correction, with a representative SMCF correction and with an angular variable SMCF correction will be studied and compared in order to know the influence of a variable spectrum on the luminous flux determination and to find a compromise between MU and measurement complexity.

[1] CIE 198:2011: Determination of measurement uncertainties in photometry

[2] CIE S 025/E:2015: Test Method for LED lamps, LED luminaires and LED modules

Einfluss des spectral mismatch correction factors (SMCF) bei der Lichtstrombestimmung

*Inca Leopoldo Sayanca, Klaus Trampert und Cornelius Neumann
Lichttechnisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Engesserstrasse 6, 76131 Karlsruhe, Deutschland*

Zusammenfassung

In diesem Beitrag geht es um die Rolle des spectral mismatch correction factors (SMCF) bei Lichtstrommessungen von LED-Quellen. Da LED-Lichtquellen Spektren besitzen, die zum einen schmalbandig und zum andern winkelabhängig sind, können Photometer, die mit Normlichtart A kalibriert sind, Messabweichungen im roten und blauen Bereich des Spektrums zeigen [1]. Um den Einfluss der Fehlanpassung des Photometers bei winkelabhängigen Quellen zu untersuchen, wird ein Nahfeldgoniometer verwendet. Mit diesem sind neben der winkelaufgelösten Lichtstrommessung auch winkelaufgelöste spektrale Messungen möglich. Abschließend wird der Einfluss der SMCF Korrektur bestimmt. Hierzu wird der Lichtstrom mit einem repräsentativen SMCF gegen die Korrektur mit winkelaufgelösten SMCF verglichen. Messaufwand, Korrektur und Messunsicherheit werden gegenübergestellt und verglichen.

1 Einleitung

Die genaue Lichtstrom-Bestimmung von LED-Lichtquellen wird stetig wichtiger, da die gesetzlichen Anforderungen an Leuchtmittel [2] von Seiten der europäischen Union von Bedeutung für die Hersteller geworden sind. Hier ist die Messunsicherheit der untersuchten Größen von spezieller Bedeutung, da Produkte, die die Anforderungen nicht erfüllen, vom Markt genommen werden können. So werden die Rahmenbedingungen für die Charakterisierung von Leuchtmitteln immer wichtiger, was mit der Veröffentlichung des CIE Standards S025/E:2015 untermauert wird.

Dieser Beitrag konzentriert sich auf die spektrale Korrektur der Lichtstrommessung mit Photometern und ihre Messunsicherheit in Abhängigkeit von spektralen Variationen im Winkelraum. Für die Charakterisierung der winkelaufgelösten Korrektur wird als DUT (device under test) eine Hochleistung RGBW LED (rot, grün, blau und weiß) mit einer sphärischen Silikonoptik verwendet. Die einzelnen LEDs werden getrennt und auch zusammen betrieben. Abb.1 zeigt das Bild der RGBW-LED aus Hauptabstrahlrichtung.

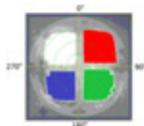


Abb.1: Leuchtdichtekamerabild der untersuchten RGBW LED aus Hauptabstrahlrichtung 0|0.

Die Teil-LEDs sind zur besseren Übersicht farbig markiert. Man erkennt hier gut die räumliche Trennung der einzelnen RGBW-LEDs sowie die entstehende Verzeichnung durch die Primäroptik.

Die vier verwendeten LEDs besitzen charakteristische Strahlungsfunktionen, welche zusammen mit dem Gesamtspektrum in Abb. 2 zu sehen sind.

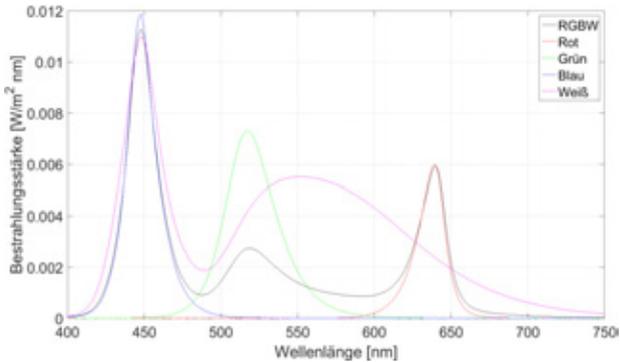


Abb. 2: LED-Spektren für die SMCF Evaluierung: RGBW, R, G, B und W

Die Lichtstromwerte der LED-Lichtquellen werden mit einem an die Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ angepassten Photometer gemessen. Die Anpassung der relativen spektralen Empfindlichkeit des Empfängers an $V(\lambda)$ wird durch optische Filterung erreicht. Diese **relative spektrale Empfindlichkeit** $S_{rel}(\lambda)$ des Photometers wird vom Hersteller des Photometers bestimmt und im Datenblatt angegeben. Durch die nicht perfekte Anpassung an die $V(\lambda)$ Kurve ergibt sich eine korrigierbare Fehlanpassung.

Für Lichtquellen mit Spektren ähnlich der zur Kalibrierung des Photometers verwendeten Normlichtart A ist diese Korrektur vernachlässigbar [1]. Für LED-Lichtquellen ist dies aber nicht der Fall, da es sich hier um schmalbandige Spektren handelt, welche zudem noch hohe Anteile im blauen Spektralbereich aufweisen.

Abb. 3 zeigt die Fehlanpassung des am Nahfeldgoniometer verwendeten Photometers. Auf den ersten Blick kann man erkennen, dass relativ deutliche Abweichungen im Bereich der kurzen und langen Wellenlängen des sichtbaren Spektrums auftreten.

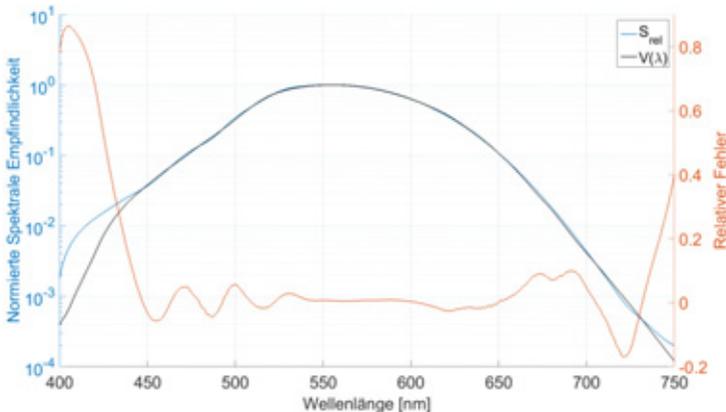


Abb. 3: $V(\lambda)$ Funktion für Tagessehen, relative spektrale Empfindlichkeit Photometer S_{rel} und dessen Fehler

2 Grundlagen

Photometer sind üblicherweise mit Normlichtart A kalibriert, d.h. mit Wärmestrahlern mit breitbandigem Spektrum. Bei der Kalibrierung wird die photometrische Empfindlichkeit des Photometers bestimmt. Nutzt man nun das Photometer zur Vermessung von LED-Quellen, die eine andere spektrale Antwort als Normlichtart A zeigen, so provoziert dies einen systematischen Fehler. Dieser Anpassungsfehler wird als **spectral mismatch correction factor** quantifiziert [4]. Der SMCF wird wie folgt berechnet:

$$SMCF = \frac{S_Z}{S_A} = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_Z(\lambda) \cdot S_{rel}(\lambda) d\lambda / \int_{360}^{830} S_Z(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_A(\lambda) \cdot S_{rel}(\lambda) d\lambda / \int_{360}^{830} S_A(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

wobei $S_Z(\lambda)$ bzw. $S_A(\lambda)$ der Strahlungsfunktion der LED bzw. der Normlichtart A entsprechen. Für die Faktorbestimmung sind nur die relative Strahlungsfunktion der LED-Lichtquelle $S_Z(\lambda)$ und die relative Empfindlichkeit des Photometers $S_{rel}(\lambda)$ notwendig. Da vom Photometerhersteller nur die relative spektrale Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich von 400 bis 750 nm zur Verfügung gestellt wurde, wird der SMCF innerhalb dieser Werte betrachtet (s. Abb. 2 und Abb. 3).

Ein ideales Photometer hat eine relative spektrale Empfindlichkeit $S_{rel}(\lambda)$, die der $V(\lambda)$ Kurve entspricht. In diesem Fall wäre der SMCF, ohne Beachtung der Messunsicherheit, gleich eins.

Die $V(\lambda)$ Funktion, der spektrale Verlauf der Normlichtart A, $S_{rel}(\lambda)$ des Photometers und die spektralen Messwerte der LED sind als diskrete Werten, in 1 nm bzw. 10 nm Schritten gegeben. Für die Berechnung der Integralwerte werden diese stetigen Kurven polynomial (spline) interpoliert. Die Art der Interpolation ist ein nicht zu vernachlässigender Aspekt, da diese die Ergebnisse signifikant beeinflussen.

Der Lichtstrom Φ der LED-Quellen wird mit dem Photometer des Nahfeldgoniometers winkelaufgelöst gemessen. Als Messergebnis liefert das Messgerät eine Lichtstärkeverteilungskurve LVK, die Lichtstärkewerte als Funktion von θ und φ enthält. Da die Spektren der untersuchten LED Winkelraum variieren, wurden winkelaufgelöste spektrale Messungen durchgeführt, um den Einfluss der Winkelabhängigkeit des SMCF zu bestimmen. Die jeweiligen Lichtstärken $I(\theta, \varphi)$ werden dann mit dem entsprechenden $SMCF(\theta, \varphi)$ korrigiert:

$$I(\theta, \varphi)_{korr} = I(\theta, \varphi) \cdot SMCF(\theta, \varphi) \quad (2)$$

Für die Berechnung des Lichtstromes wird diese LVK im Winkelraum diskret integriert:

$$\Phi = \sum_{\theta=1}^{N-1} \left(\sum_{\varphi=1}^M I(\theta, \varphi)_{korr} \Delta\varphi \right) \sin \theta \Delta\theta \quad (3)$$

wobei $N = \frac{\pi}{\Delta\theta}$ und $M = \frac{2\pi}{\Delta\varphi}$ der Anzahl der abgetasteten Punkte sind.

Für die winkelaufgelösten spektralen Messungen wird das Spektrometer des Nahfeldgoniometers genutzt. Dabei ist von Vorteil, dass die Spektren an den selben Abtastkoordinaten gemessen werden. Jede Position der LVK kann so direkt mit dem entsprechenden SMCF korrigiert werden.

Nach der Bestimmung des SMCF für jede Position θ und φ der LVK wird die Messunsicherheit (MU) mit der GUM konformen Monte-Carlo Methode (kurz MC) [5] berechnet. Die hier berechnete MU betrachtet nur den Einfluss der LED-Spektren $S_Z(\lambda)$ und die MU der relativen spektralen Empfindlichkeit $S_{rel}(\lambda)$ des Photometers. Da vom Photometer-Hersteller keine Information bezüglich der MU Funktion $S_{rel}(\lambda)$ zur Verfügung stand, wird die MU anhand f'_1 geschätzt. Die $V(\lambda)$ Funktion und die Normlichtart $A_{S_A}(\lambda)$ besitzen keine MU, da es sich um Definitionen handelt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird angenommen, dass die Spektren $S_Z(\lambda)$ und $S_{rel}(\lambda)$ Beiträge zur MU in den Wellenlängen und in den Amplituden zeigen können. Die Amplituden werden in der MC unkorreliert um 1,2% bzw. 1,0% variiert. Die Wellenlängen wurden mit 0,65 nm bzw. 0,5 nm korreliert variiert. Der Einfluss der Realisierung der Normlichtart A bei der Kalibrierung des Photometers ist hierbei noch unbeachtet.

Der Einfluss anderer Parameter, wie Temperatur oder LED-Strom wurden hier zudem nicht berücksichtigt und sind konstant gehalten worden. Dies ist für den hier vorgestellten relativen Vergleich legitim, da der Einfluss in dieser Untersuchung sehr gering ist, wie aus Tabelle 1 zu erkennen ist.

Der Arbeitspunkt der LED wurde konstant gehalten. Für die Temperaturstabilisierung auf ca. $\pm 0,02$ K wird ein Peltier-Element verwendet. Der Strom wird im Bereich $< 0,001\%$ konstant gehalten, um die photometrischen und colorimetrischen Eigenschaften der Lichtquellen zu garantieren und unerwünschte Phänomene wie z.B. Temperaturverschiebungen der Spektren auszuschließen. Die Eigenerwärmung der LEDs bei simultanen Betrieb gegenüber dem Einzelbetrieb wurde über eine Temperaturanpassung des Arbeitspunktes im Einzelbetrieb kompensiert. Diese relative Temperaturerhöhung durch die Nachbar-LEDs wurde anhand der individuellen Vorwärtsspannung der LED ermittelt.

Für diese Arbeit wird ein Nahfeldgoniometer mit einer ruhenden Lichtquelle verwendet. Das verwendete Photometer und Spektrometer bewegt sich um die Lichtquelle herum. Genauere Informationen diesbezüglich sind in [6] zu finden.

Es wurden zwei Varianten von spektralen Korrekturen durchgeführt verglichen. Erstens eine Korrektur mit dem repräsentativen SMCF in Hauptstrahlungsrichtung (0|0). Zweitens die winkelaufgelöste Korrektur. Hier ist zu erwähnen, dass mit dem Spektrometer unter flachen Winkeln aufgrund der zu schwachen Lichtstärkesignale nicht gemessen werden konnte. Erfasst wurde der Winkelbereich mit einem Lichtstromanteil von über 95%.

3 Ergebnisse

Um den Einfluss der Winkelvariation des SMCF auf den Gesamtlichtstrom zu quantifizieren, werden die LED photometrisch und spektral gemessen. Hierzu werden die Teilspektren der Einzel-LED mit dem Gesamtspektrum der kompletten RGBW-LED verglichen. Die erfassten Teil-Lichtstromwerte werden mit dem SMCF korrigiert. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 1 dargestellt. Die gezeigte MU bezieht sich nur auf den SMCF.

In allen fünf betrachteten Fällen wird der SMCF berechnet. Da das verwendete Photometer eine sehr gute Anpassung ($f'_1 = 1,33\%$) hat, sind alle Werte sehr klein. Wie erwartet, finden die größeren Abweichungen bei der roten und blauen LED statt. Für die grüne bzw. weiße LED ist der SMCF gering, da sich der Hauptstrahlungsanteil in dem Wellenlängen-

bereich befindet, in dem die Anpassung an $V(\lambda)$ sehr gut ist. Für den RGBW Fall kompensieren sich die positiven und negativen Korrekturen der verschiedenen Farben.

Tab. 1: Lichtstrom Messergebnisse mit deren SMCF Korrekturen

LED	Φ ohne Korrektur	Φ mit HV0 SMCF	Φ mit SMCF (θ, φ)
Rot	68,32 lm	67,00 lm (0,9807 \pm 0,017)	67,08 lm (0,9819)
Grün	131,30 lm	131,79 lm (1,0039 \pm 0,015)	131,78 lm (1,0038)
Blau	23,99 lm	24,43lm (1,0186 \pm 0,028)	24,42 lm (1,0182)
Weiß	138,74 lm	139,1 lm (1,0021 \pm 0,004)	139,01 lm (1,0019)
R+G+B+W	362,35 lm	362,32 lm (0,9999 \pm 0,012)	362,29 lm (0,9999)
RGBW	362,14 lm	362,20 lm (1,0001 \pm 0,006)	362,04 lm (0,9996)

Auffällig ist, dass der Unterschied zwischen der „HV0“ und der winkelaufgelösten Korrektur trotz der der starken spektrale Variationen im Winkelraum sehr gering ist. Der Grund könnte darin liegen, dass die Winkelvariationen sich integral kompensieren.

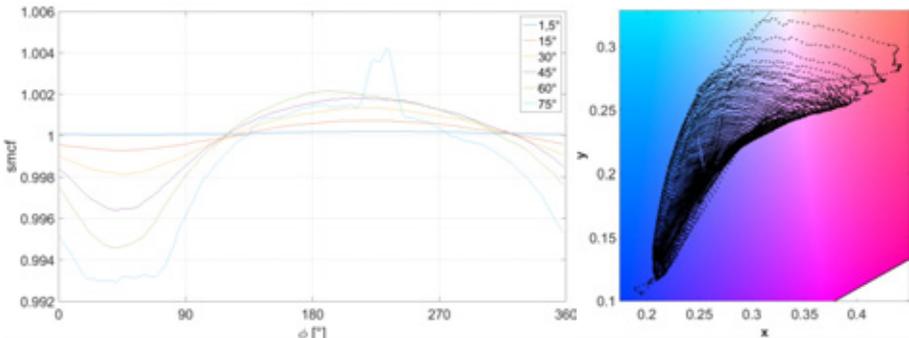


Abb. 4: SMCF- und Farbvariationen im Winkelraum für die RGBW LED

In Abb.4 sind die winkelabhängigen Variationen des SMCF sowie die Farbkoordinaten im Winkelraum der RGBW LED dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Farbkoordinaten als Funktion der gewichteten Teilspektren in der Richtung variieren und somit ist dieser Effekt in der Winkelabhängigkeit des SMCF zu sehen. In Abb. 1 erkennt unter flachen Winkeln die vier Abstrahlrichtungen der LEDs rot (45°), grün (135°), blau (225°) und weiß (315°).

Es zeigt sich, dass unter Einhalten der individuellen LED-Arbeitspunkte, die gewichtete Summe der Einzellichtströme und Spektren gleich simultanen Messung aller Teile ist.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit zeigt, dass die spektralen Variationen in Winkelraum einen Einfluss auf den SMCF hat. Der SMCF ist größer für Spektren, deren Hauptstrahlungsanteile sich in Wellenlängenbereichen mit schlechter $V(\lambda)$ Anpassung befinden.

Winkelaufgelösten Messungen sind sehr zeitintensiv und können wie hier bis zu mehreren Tagen dauern. Wir konnten zeigen, dass eine SMCF-Korrektur in HV0|0 für rotationssymmetrische Objekte ausreicht, wenn das Spektrum in HV0|0 repräsentativ für alle Teil-LVKs ist. Wir vermuten als Grund für dieses Auffällige Verhalten die spezielle Konstellation, dass für jede Teil-LVK das Spektrum der einzelnen LEDs in Hauptabstrahlrichtung repräsentativ ist und die spektrale Variation der Teillichtströme im Winkelraum vernachlässigt werden kann. Dies gilt nur für integrale Werte, wie der Lichtstrom. Richtungsabhängige Größen, wie Lichtstärke und Farbkoordinate, müssen individuell korrigiert werden.

Eine zeitsparende Methode, um winkelaufgelöste Informationen der Spektren zu gewinnen, wird in [7] präsentiert. Hier ist es möglich, mit einer Leuchtdichtekamera und verschiedenen optischen Filtern, sogenannte „spektrale Ray-Files“ zu erzeugen, um u.a. die SMCF Korrektur durchzuführen.

5 Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Förderprogramms Photonik Forschung Deutschland unter dem Förderkennzeichen 13N13396 gefördert.

6 Literatur

- [1] M. Schuster, S. Nevas, A. Sperling und S. Winter: *Korrekturmöglichkeiten der spektralen Fehlanpassung von Photometerköpfen*, LiTG-Fachgebiet Messen und Bewerten – Ausgewählte Themen der Lichtmesstechnik 27, 2015.
- [2] EU Richtlinie 874/2012 für die Energieverbrauchkennzeichnung von elektrischen Lampen und Leuchten, Amtsblatt der Europäischen Union, 2012.
- [3] CIE International Standard S 025/E:2015: *Test method for LED lamps, LED luminaires and LED modules*.
- [4] Standard CIE S 023/E:2013: *Characterization of the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters*.
- [5] JCGM 101:2008: *Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*.
- [6] K. Bredemeier, R. Poschmann und F. Schmidt: *Nahfeldgoniometer – Systeme zur Messung der Lichtverteilung an Leuchten, Lampen und LED*, Licht 2006, Bern.
- [7] I. Rotscholl, K. Trampert, U. Krüger, I. L. Sayanca, F. Schmidt und C. Neumann: *Measurement of spatial and angular resolved spectral rayfiles with conventional nearfield goniophotometers and standard optical filters*, LPS 2016, Begrenz, 2016.

Entwicklung von Detektoren und TransfERNormalen für moderne Lichtquellen

*Philipp Schneider, Armin Sperling, Thorsten Gerloff, Stefan Pendsa,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB*

Problemstellung und Forschungsfragen

Während der letzten Jahre wurden Glühlampen nach und nach durch Solid-State Lighting (SSL) Produkte ersetzt. Dies erfordert die Entwicklung von SSL-basierten TransfERNormalen. Die schwierige Erfassung neuer LED-Lichtquellen mit aktuellen photometrischen Messmethoden, macht auch die Entwicklung neuer Detektoren notwendig.

Stand der Wissenschaft/Technik

Zur Bestimmung der Lichtausbeute von Produkten mit Leuchtdioden muss der Lichtstrom ebenso wie die elektrische Leistungsaufnahme unter definierten Rahmenbedingungen ermittelt werden, wobei der Temperatur eine besondere Bedeutung zukommt. Die Nutzung herkömmlicher LichtstromtransfERNormale und Photometer führt, ohne die Korrektur der spektralen Fehlanpassung des Detektors, schnell zu Messunsicherheiten von über 10%.

Forschungshypothesen

Durch die Verwendung von rückgeführten, sowie elektrisch, optisch und thermisch stabilisierten, LED-basierten TransfERNormalen können SSL-Produkte mit ähnlichen spektralen Eigenschaften mit verringerter Messunsicherheit kalibriert werden. Um diese Rückführung auch zukünftig mit möglichst geringer Messunsicherheit zu ermöglichen, wird, für die Lichtstärke als photometrische Basiseinheit, die Verwendung von LED-Normalen und die Nutzung eines neuen photometrischen Detektors zur Realisierung der Lichtstärke nötig.

Versuchsaufbau

Im Gegensatz zu herkömmlichen Photometern kann ein modularer photometrischer Detektor mit geringerer Unsicherheit kalibriert werden. Die Verwendung spezieller Filter sowie eines Trap-Detektors ermöglicht es, die Anzahl der Schritte für die Rückführung zu reduzieren und die Rückführungsstrategie zu ändern. Dies führt zu geringeren Unsicherheiten bei der Realisierung der Einheit der Lichtstärke, auch bei modernen Lichtquellen.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Mit dem neuen Detektor wird eine Unsicherheit bei der Realisierung der Lichtstärkeeinheit im Bereich von 5×10^{-4} ($k = 1$) erwartet, im Gegensatz zu $2,5 \times 10^{-3}$ ($k = 1$) bei der aktuellen Realisierung. Durch diese Verringerung der Unsicherheit kann die Bewahrung der Einheit zukünftig unabhängig von Glühlampen werden.

Im Rahmen des Projekts „MESaIL“ und des kommenden Projekts „Future photometry based on solid state lightning“ sind TransfERNormale auf LED-Basis, wie das MESaIL Multi-transferstandard (MTS), sowie neue Detektortechnologien und Messmethoden für SSL-Produkte in Entwicklung.

Development of detectors and transfer standards for modern light sources

Philipp Schneider, Armin Sperling, Thorsten Gerloff, Stefan Pendsa, Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB

Research issue

Over the course of the last years, tungsten lamps are gradually being replaced by solid-state lighting (SSL) product. This demands the development of SSL-based transfer standards. As SSL-products are not easily accessible by the current photometric metrology, it is also necessary to develop new detectors.

State of science/technology

When determining the luminous efficacy of products with light-emitting diodes (LED) the luminous flux and the electric power consumption have to be measured under defined conditions. Of special significance is the temperature of the LED. Using common luminous flux transfer standards and photometers can result in measurement uncertainties of above 10% when not correcting for the spectral mismatch of the detector.

Research hypothesis

By using traceable LED-based transfer standards, which are electrically, optically and thermally stabilized, for calibration of SSL-products of similar spectral properties yields a lower measurement uncertainty. Ensuring the traceability with lowest possible uncertainty affects the luminous intensity as the base unit of photometry. The usage of LED standards and a new photometric detector for realization of luminous intensity is required.

Experimental setup

In comparison to common photometers a modular photometric detector can be calibrated with lower uncertainty. Special filters and a trap detector allow a change of the traceability with less transfer steps. This leads to a lower uncertainty when realizing the unit of luminous intensity, even when using modern light sources.

Results in comparison with previous findings

The new detector has an expected uncertainty for luminous intensity realisation in the range of 5×10^{-4} ($k = 1$), as opposed to $2,5 \times 10^{-3}$ ($k = 1$) with the current realisation. With this change of the uncertainty the unit can become more independent from the incandescent lamps used for maintenance.

In the context of the project "MESaIL" and the upcoming project "future photometry based on solid state lighting" development of transfer standards based on LED, like the MESaIL multiple transfer standard (MTS), as well as new detector technologies and measurement methods for SSL-product is taking place.

Entwicklung von Detektoren und TransfERNormalen für moderne Lichtquellen

Philipp Schneider, Armin Sperling, Thorsten Gerloff, Stefan Pendsa, Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Zusammenfassung

In der alltäglichen Anwendung wurden in den letzten Jahren Glühlampen nach und nach durch sogenannte Solid-State Lighting (SSL) Produkte ersetzt. Diese Vielzahl an neuen Lichtquellen mit unterschiedlichen spektralen Eigenschaften und Abstrahlverhalten stellt eine Herausforderung in der Photometrie dar. Die aktuellen photometrischen Methoden, basierend auf Glühlampen als TransfERNormalen und Photometern als Detektoren können nur noch bedingt benutzt werden. Dies erfordert die Entwicklung von SSL-basierten TransfERNormalen, sowie die Entwicklung neuer Detektoren um rückführbare Messungen mit möglichst geringer Messunsicherheit zu ermöglichen. In diesem Beitrag wird zunächst die Problematik der aktuellen photometrischen Methoden untersucht, um im Anschluss die Arbeiten der PTB zur Entwicklung von Detektoren und Normalen vorzustellen.

1 Kalibrierung von SSL-Produkten

Eine wichtige Größe bei der Kalibrierung von Lichtquellen mit Leuchtdioden (LED) ist die Lichtausbeute. Hierfür müssen sowohl der Lichtstrom, als auch die elektrische Leistungsaufnahme gemessen werden. Der Lichtstrom wird an der PTB goniophotometrisch an DC-betriebenen Lichtquellen rückgeführt. Wichtig bei der Messung sind kontrollierte Rahmenbedingungen - vor allem die Temperatur des Messobjektes.

Bei AC-Messungen an Lichtquellen stellen vor allem die hochfrequenten Anteile der Stromversorgung ein Problem dar. Dies wirkt sich sowohl bei der Messung der elektrischen Leistungsaufnahme als auch durch Flickering bei der Bestimmung der optischen Größen aus. Dies kann in der Praxis zu einigen Prozent Abweichung führen und erheblichen Anteil an der Messunsicherheit bei der Bestimmung der Lichtausbeute haben, wie im Laborvergleich der IEA [1] festgestellt wurde.

1.1 Spektrale Fehlanpassung

Bei der Kalibrierung der photometrischen Empfindlichkeit von Photometern dient immer die Normlichtart A, beziehungsweise die Strahlungsfunktion eines schwarzen Körpers einer Temperatur von 2856 K, als Bezugsgröße. Dies erfordert, bei der Messung von abweichenden Spektren, wie sie besonders bei SSL-Produkten vorkommen, eine Korrektur der Empfindlichkeit. Dies wird mit Hilfe der spektralen Fehlanpassungskorrektur durchgeführt:

$$F(S_Z(\lambda)) = \frac{S_Z^{-1}}{S_A^{-1}} = \frac{\int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} S_Z(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_Z(\lambda) \cdot s_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda} \bigg/ \frac{\int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} S_A(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_A(\lambda) \cdot s_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda}$$

Hierbei sind s_A und s_Z die spektralen Empfindlichkeiten des Detektors bezüglich des SSL Spektrums $S_Z(\lambda)$ bzw. des Normlichtart A Spektrums $S_A(\lambda)$, berechnet aus der relativen spektralen Empfindlichkeit des Detektors $s_{rel}(\lambda)$, der normierten Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ sowie der jeweiligen Strahlungsfunktion.

Ohne die Anwendung dieser Korrektur kommt es trotz gut angepassten Detektoren bei der Bestimmung von photometrischen Größen zu Fehlern. Diese können bei blauen LEDs bis zu 20%, bei roten LEDs bis zu 10% und bei weißen LEDs 0,5% betragen.

Zur Anwendung dieser Korrektur ist sowohl die Kenntnis über die relative Empfindlichkeit $s_{rel}(\lambda)$ des verwendeten Detektors, als auch die Kenntnis der spektralen Strahlungsfunktion des Messobjektes $S_Z(\lambda)$ notwendig. Allerdings liegt die Messunsicherheit der spektralen Fehlanpassungskorrektur für farbige LEDs bei bis zu 2% und für weiße LEDs bei bis zu 0,7%.

Um den Fehler der spektralen Fehlanpassungskorrektur zu reduzieren, sollten LEDs bzw. LED-basierte Lichtquellen möglichst gegen kalibrierte LEDs oder Lichtquellen mit ähnlichen spektralen Eigenschaften gemessen werden.

2 LEDs in der Rückführung

Um LEDs mit geringer Messunsicherheit kalibrieren zu können, ist ebenfalls eine entsprechende Messinfrastruktur notwendig. Diese muss geeignete Detektoren sowie Transfernormale auf LED-Basis umfassen.

2.1 Lichtstärke von LEDs nach CIE 127:2007

Im Rahmen der CIE-Veröffentlichung 127:2007 [2] wird die Größe der „Averaged LED Intensity“ eingeführt. Diese Messgröße ist angegeben für zwei Messgeometrien A und B und wird symbolisch mit $I_{LED,A}$ und $I_{LED,B}$ bezeichnet. Gemessen wird der Lichtstrom der in einem Abstand von $r_A = 316\text{ mm}$ und $r_B = 100\text{ mm}$ auf eine Fläche von jeweils 1 cm^2 trifft und somit in einen Raumwinkel von $0,001\text{ sr}$ bzw. $0,01\text{ sr}$ um die mechanische Achse der LED abgestrahlt wird. Dies erlaubt eine genaue Charakterisierung der LED zu festgelegten Rahmenbedingungen.

Um LEDs als Lichtstärkennormale zu verwenden ist in der Regel ein größerer Abstand notwendig, um außerhalb der photometrischen Grenzentfernung zu messen. Oberhalb dieser Entfernung kann aus der Messung einer Beleuchtungsstärke und des Abstandes die Lichtstärke direkt berechnet werden. Hierbei muss bei Abstandsvariation ein konstanter Wert für die Lichtstärke messbar sein. Hierbei ist zu beachten, dass es sich bei der gemessenen Größe nicht bei allen LED um die Lichtstärke I der LED in die vorgegebene Richtung handelt. Insbesondere für LEDs kleiner Leistung liefert die CIE 127 ein brauchbares Mittel zum quantitativen Vergleich ähnlicher LEDs. Für LEDs höherer Leistung kann in der Regel immer auch die tatsächliche Lichtstärke als Messgröße angegeben werden.

2.2 Entwicklung eines neuen Detektors für die Rückführung

Zurzeit wird die Einheit der Lichtstärke in der PTB von mehreren Lampengruppen bewahrt und weitergegeben. Diese bewahrte Einheit kann mit einer Standardmessunsicherheit von 0,25% realisiert werden. Bei der Kalibrierung eines LED-Normals zum Transfer dieser

Einheit kommt jedoch bereits bei der Messung der Lichtstärke des Kalibrierobjekts die erhöhte Unsicherheit der spektralen Fehlanpassungskorrektur hinzu. Um die Unsicherheit bei der spektralen Realisierung der Basiseinheit zu reduzieren, ist an der PTB ein neuartiger $V(\lambda)$ -Trap Detektor in Entwicklung.

Der $V(\lambda)$ -Trap Detektor ist als modularer Detektor konzipiert. Die einzelnen Komponenten können mit niedriger Messunsicherheit charakterisiert werden, ebenso wie die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten. Der Detektor erlaubt so eine Verkürzung der Kalibrierkette bei der Realisierung der Lichtstärkeeinheit vom Kryoradiometer zum LED-Normal und wird mit einem laserbasiertem Aufbau spektral kalibriert.

Mit diesem Detektor wird eine Verbesserung der Messunsicherheit bei der Realisierung der „Candela“ von 0,25% auf 0,05% erwartet. Damit kann die Bewahrung der Einheit von den Lampengruppen gelöst werden. Zusätzlich kann die Empfindlichkeit des Detektors in den blauen und roten Spektralbereichen mit niedrigerer Messunsicherheit bestimmt werden, als bei herkömmlichen Photometern. Dies erlaubt eine direkte Kalibrierung von LEDs gegen die durch den Detektor bewahrte Basiseinheit mit einer kleineren Unsicherheit für die spektrale Empfindlichkeit bzw. die spektrale Fehlanpassungskorrektur. Diese niedrigere Messunsicherheit bei der Bestimmung der Lichtstärke kann direkt an die LED-Messplätze in der PTB weitergegeben werden.

3 LED-Normale

Um LED-Produkte mit niedriger Messunsicherheit gegen andere kalibrierte LED mit ähnlichen spektralen Eigenschaften kalibrieren zu können, sind für alle photometrischen Größen Transfernormale auf LED-Basis notwendig.

3.1 PTB LED-Transfernormale

Bereits vorhanden sind Transfernormale auf LED Basis für unterschiedliche Lichtstromniveaus. Diese Normale gibt es auf der Basis von normalen LEDs mit Lichtströmen bis zu 1 lm sowie auf der Basis von Hochleistungs-LED mit Lichtströmen bis zu 100 lm und auf der Basis von Höchstleistungs-LED mit Lichtströmen bis zu 2500 lm. Um bei diesen Standards stabile Betriebsbedingungen einzustellen, sind die LEDs fest in Sockeln verbaut und direkt mit Heizwiderständen oder Peltier-Elementen verbunden. So können stabile mechanische, thermische und elektrische Bedingungen erreicht werden. Zur Konstruktion der Normale werden vorgealterte LEDs ausgewählt um möglichst stabile Normale zu erhalten.

Derartige Normale werden an der PTB auch für die Bestimmung des Lichtstroms und der in CIE 127:2007 beschriebenen Größen der „Averaged LED Intensity“ und des partiellen LED Lichtstroms $\Phi_{LED,x}$ genutzt.

3.2 Entwicklung von Normalen und Messtechnologie

Mehrere Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der Entwicklung von weiteren LED-Standards, sowie mit der Entwicklung geeigneter Detektortechnologien. Hierbei seien insbesondere die europäischen Metrologieforschungsprogramme EMRP (European Metrology Research Programme) und EMPIR (European Metrology Programme for Innovation and Research) mit den Projekten „ENG62-MESaIL – Metrology for Efficient and Safe In-

novative Lighting“ [3] und „15SIB07-PhotoLED – Future photometry based on solid-state lighting products“ genannt.

3.2.1 ENG62 MESaIL - Multipler Transfer Standard

Durch das Projekt „MESaIL“, an dem verschiedene Metrologieinstitute, Universitäten und Industrie teilnehmen, sollen rückführbare Messmethoden für unterschiedliche Lichtquellen, wie OLEDs, großflächige SSL-Produkte und auch gepulste LEDs geschaffen werden. Zusätzlich sollen Testmethoden zur Alterung und Normen zum Umgang mit „Flicker“ auf ihre Anwendbarkeit geprüft werden.

Ein Teil des Projektes umfasst die Entwicklung und den Bau von sogenannten „Multiple Transfer Standards“ (MTS) [4]. Derartige Normale sollen stabil und reproduzierbar mit unterschiedlichen spektralen, richtungsabhängigen und zeitlichen Parametern betrieben werden können. Durch Kalibrierung jedes Betriebsmodus kann die photometrische Einheit des Lichtstroms bei unterschiedlichen Bedingungen transferiert werden. Auf Grund der kalibrierten Betriebsmodi können Einflussgrößen des Messsystems, die unabhängig von der Lichtquelle sind, bestimmt werden. Das MTS kann für goniophotometrische Messungen oder Messungen mit Ulbricht-Kugeln eingesetzt werden.



Abb. 1: Bild des MTS ohne Diffusor und Abdeckung, ausgerüstet mit unterschiedlichen farbigen, sowie warmweißen und kaltweißen LEDs

Auf den Oberflächen des MTS sind jeweils Gruppen aus farbigen, warmweißen und kaltweißen LEDs angeordnet um unterschiedliche spektrale Bedingungen einzustellen. Die LED befinden sich dabei direkt auf Leiterplatten, welche mit der notwendigen Elektronik bestückt sind und durch ein Peltier-Element thermisch stabilisiert sind. Die Abwärme wird über Heatpipes abgeführt. Die Nutzung von kabelloser Datenübertragung und vollständig integrierter elektrischer Steuerung ermöglicht es, das Normal über einen einfachen E27-Sockel in eine Messapparatur einzuschrauben und elektrisch zu versorgen. Um unter-

schiedliche Formen und Größen von Lichtquellen zu simulieren, kann das Normal mit zusätzlichen Diffusoren bestückt werden.

Zur Zeit befindet sich das MTS bei den im Projekt beteiligten Instituten im Test um die Betriebsparameter zu bestimmen, die für goniophotometrische oder Ulbricht-Kugel Messungen am besten geeignet sind.

3.2.2 15SIB07 PhotoLED

Das Ziel des Projektes „PhotoLED“ ist die weitere Anpassung an die LED-Umstellung durch Entwicklung von Standardlichtquellen für die Einheiten der Lichtstärke, des Lichtstroms und der Beleuchtungsstärkeempfindlichkeit, ebenso wie die Entwicklung von Photometern, die es erlauben, die neuen Normale mit erweiterten Messunsicherheiten im Bereich von 0,2% zu messen.

Die hierbei entwickelten Normale sollen mit den bereits bestehenden Kalibrierbauten kompatibel sein und in die Messinfrastruktur der Metrologieinstitute integriert werden. Zusätzlich sollen in diesem Projekt die Auswirkungen von potentiellen neuen Normlichtarten, die speziell für LED vorgesehen sind, evaluiert werden. Die Verwendung anderer Normlichtarten als Bezugsgröße kann den Fehler verringern, der bei Nicht-Anwendung der spektralen Fehlanpassungskorrektur entsteht.

Literatur

- [1] Y. Ohno, K. Nara, E. Revtova, W. Zhang, T. Zama, and C. Miller, “Solid State Lighting Annex: 2013 Interlaboratory Comparison,” *Energy Efficient End-Use Equipment (4E) International Energy Agency*, September, 2014.
- [2] CIE 2007, CIE 127:2007 “Measurement of LEDs”, Vienna.
- [3] “ENG62 MESaIL”: <http://www.eng62-mesail.eu/>.
- [4] A. Sperling, S. Pendsa, M. Taddeo, E. Revtova, D. Renoux, P. Blattner, T. Poikonen, and W. Jordan, “Multiple Transfer Standard for Characterisation of Sphere Test Setups,” in *Proceedings of CIE Expert Symposium on the CIE S 025 LED Lamps, LED Luminaires und LED Modules Test Standard*, 2015.

Rückgeführte Licht- und Strahlungsmesstechnik für gepulst betriebene LED-Systeme

M. EL Wardani¹⁾²⁾, Ch. Schierz¹⁾, W. Jordan²⁾, U. Binder²⁾ W. Steudtner²⁾

¹⁾ TU Ilmenau Fachgebiet Lichttechnik

²⁾ OSRAM GmbH, CLM, Berliner Allee 65, 86154 Augsburg

Problemstellung und Forschungsfragen

LEDs ermöglichen – verglichen mit traditioneller Beleuchtungstechnik – sehr kurze Schaltzeiten und die Modulation des Lichtsignals. Der typischerweise verwendete Pulsbetrieb stellt jedoch neue Anforderungen an die lichttechnisch angewendete Messtechnik.

Stand der Wissenschaft/Technik

Da die Rückführung, sowie die Unsicherheitsbetrachtung von lichttechnischen Größen in der Regel auf zeitlich konstanten, gemittelten Messsignalen beruht, müssen die derzeit angewendeten Verfahren erneut validiert bzw. auch angepasst, d.h. verändert werden.

Forschungshypothesen

Das Ziel ist die Entwicklung einer geeigneten und neuen Methode, mit der Messungen von gepulsten Lichtsignalen auf zeitlich statische Kalibriernormale rückgeführt werden können. Die Betrachtungen zur Messunsicherheit dieses Messverfahrens erfordern damit auch eine systemtheoretische Beschreibung der Messkette.

Versuchsaufbau

Der dazu als mindestens notwendig erachtete Versuchsaufbau, die Charakterisierung der Einzelkomponenten und deren Bedeutung für die licht- oder radiometrische Größe der betrachteten LED Systeme werden im Poster als ein Teilergebnis der Untersuchung vorgestellt.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Das vorgestellte Poster beschreibt den dazu verwendeten Messaufbau, die Rückführung der notwendigen Komponenten, den Ansatz des Kalibrierverfahrens und erste Abschätzungen auf Basis des systemtheoretischen Ansatzes der Messkette.

Rückgeführte Licht- und Strahlungsmesstechnik für gepulst betriebene LED-Systeme / Traceable light and radiation measurement technology for pulse-powered LED systems

Maissam El Wardani¹⁾²⁾, Christoph Schierz¹⁾, Werner Jordan²⁾, Ulrich Binder²⁾, Walter Steudtner²⁾

¹⁾ TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

²⁾ OSRAM GmbH, CI ANM CLM, Berliner Allee 65, 86154 Augsburg

Zusammenfassung

LEDs ermöglichen – verglichen mit traditioneller Beleuchtungstechnik – sehr kurze Schaltzeiten (An/Aus) sowie die Modulation des Lichtsignals zur Unterstützung des notwendigen Thermomanagements von Hochleistungsmodulen. Der typischerweise dazu verwendete Pulsbetrieb stellt jedoch neue Anforderungen an die lichttechnisch angewendete Messtechnik.

Da die Rückführung, sowie die Unsicherheitsbetrachtung von lichttechnischen Größen in der Regel auf zeitlich konstanten gemittelten Messsignalen beruht, müssen die derzeit angewendeten Verfahren erneut validiert werden.

Das Ziel ist die Entwicklung einer geeigneten Methode, mit der Messungen von gepulsten Lichtsignalen auf lichttechnisch zeitlich-statische Kalibriernormale rückgeführt werden können. Die Betrachtungen zur Messunsicherheit dieses Messverfahrens erfordern damit auch eine systemtheoretische Beschreibung der Messkette.

Summary

LEDs allow - compared with traditional lighting technology - very short switching times and modulation of the light signal to influence the needed thermal management of high power modules. The typically used pulse operation forces new demands on the applied measurement technology.

As the uncertainty and the traceability of the result of the photometric quantities are usually based on temporally constant average measurement signals, then the currently applied procedures of measurement must be revalidated.

The aim of this work is the development of an appropriate method that can perform traceable measurements of pulsed light signals with temporally static calibration standards. The considerations on the uncertainty of this measurement method also require a system theoretical description of the measurement chain.

1 Einleitung

Leuchtdioden (LEDs) ermöglichen verglichen mit traditioneller Beleuchtungstechnik sehr kurze Schaltzeiten und eine Modulation des Lichtsignals, was neuartige Anwendungen ermöglicht und das erforderliche Thermomanagement unterstützt. Zeitlich veränderliche Messsignale stellen jedoch auch neue Anforderungen an die Messtechnik. LED-Chips oder LED-Module können zum einen durch kurze Strompulse elektrisch und optisch charakterisiert werden, oder, ähnlich wie traditionelle Lampen, im thermisch stabilen Betrieb gemessen werden.

Die Messung bei konstanter Quellen-Temperatur erfordert jedoch aufgrund der notwendigen Kühlung einen zusätzlichen apparativen Aufwand und oftmals lange Stabilisierungszeiten, ist aber insbesondere für goniometrische Messungen sowie hochauflösende spektrale Messungen die bevorzugte Variante. Im Gegensatz dazu können aber auch genügend kurze, einzelne Lichtpulse in Ulbricht-Kugeln mit integralen Detektoren oder schnellen (Kompakt – Array-) Spektrometern gemessen werden, ohne die thermische Belastung betrachten zu müssen.

Für lichttechnische Messlabore ist es entscheidend, dass diese unterschiedlichen Betriebsarten innerhalb ihrer Messunsicherheit vergleichbare Ergebnisse liefern. Da die Effizienz der Leuchtdiode maßgeblich von deren Junction-Temperatur bestimmt wird, müssen hierzu sowohl im Pulsbetrieb als auch im stabilisierten Betrieb vergleichbare thermische Bedingungen hergestellt werden. Da die Rückführung von Messgrößen der Lichttechnik auf Normale in der Regel auf stabilisierten Quellen und zeitlich konstanten Messsignalen beruht, müssen für zeitlich veränderliche Signale die vorhandenen Verfahren überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

In einem ersten Schritt wird deshalb ein LED-Referenzsystem definiert und dessen thermische Eigenschaften bestimmt. Zur Messung der lichttechnischen Größen werden für beide oben beschriebenen Betriebsmodi photometrische und radiometrische Vergleichsmessungen in Ulbricht-Kugeln verschiedener Größe und Einstrahlgeometrie sowie in Goniometern durchgeführt. Der Fokus liegt hierbei auf den für LED-Anwendungen typischen Ulbricht-Kugeln mit höchstens 0.5 m Durchmesser in 2π -Einstrahlgeometrie. In diesen „kleinen“ Ulbricht-Kugeln ist die Unsicherheit der Lichtstrommessung, bedingt durch den Störkörpereinfluss und den Einfluss der unterschiedlichen Lichtverteilungen vergleichsweise groß. Auf Basis von ersten orientierenden Messungen mit dieser Anlage werden empirische Abschätzungen zur erwarteten Messunsicherheit vorgestellt. Ein Vergleich des LED-Lichtstroms bezogen auf deren Duty Cycle (Tastgrad) zeigt die Möglichkeiten des experimentellen Aufbaus auf.

2 Versuchsaufbau und Methodik

Die Abb. 1 skizziert den dazu notwendigen Messaufbau. Der spektroradiometrische Anlagenteil besteht aus einer Ulbricht-Kugel mit einem Durchmesser von 0.25 m, versehen mit Öffnungen zur Einkopplung der LED - Strahlung sowie zur Auskopplung der indirekten Bestrahlungsstärke in die Eingangsoptik des Array-Spektroradiometersystems. Als Option kann ein Photometerkopf an Stelle der Hilfslichtlampe eingebracht und mit einem High-Speed Präzisions-Photometer (Flash-meter) verbunden werden, um so einzelne, gepulste Lichtsignale der LED, formrichtig integriert, zu detektieren und damit den direkten Bezug zu

der treibenden LED-Eingangsstromstärke herzustellen. Der zeitliche Verlauf der Systemsignale kann mit einem Oszilloskop aufgezeichnet und für die weiteren Analysen gespeichert werden. Als Quelle zum Betrieb der LEDs wird ein Rechteck-Pulsgenerator mit integriertem Digitalmultimeter bei einer Stromauflösung von 1 pA und mit einer Abtastzeit von 1 μ s verwendet.

Alle Anlagen-Komponenten werden per Software konfiguriert, gesteuert und ausgelesen.

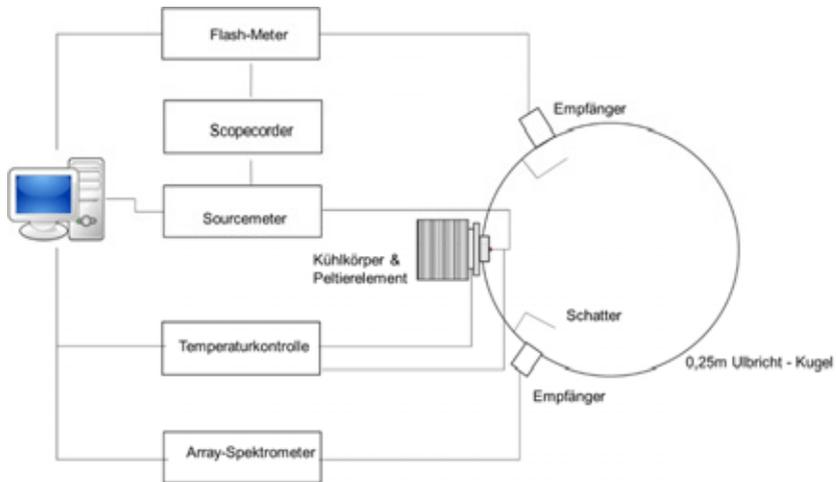


Abb. 1: Schematische Darstellung des LED – Messplatzes

Die wesentliche Voraussetzung für den messtechnischen Übergang von DC betriebenen LED-Quellen zu gepulsten Systemen ist der mechanische Aufbau eines geeigneten Halters zum temperaturgeregelten Betrieb und zur Adaptation der Quelle an das Messsystem Ulbrichtkugel. Folgende Anforderungen sind dabei zu erfüllen:

- Mechanische und optische Integration des LED-Moduls möglichst ideal in die Kugelwand.
- Ausreichende aktive Kühlkapazität des Halters zur Stabilisierung der Objekttemperatur auf 25 Grad Celsius bei Bestromung
- Ausreichende Stabilität der mechanischen Halterung zur reproduzierbaren Positionierung des Objekts
- Geeignete elektrische Kontaktierung zum Betrieb des Objekts und zur Überwachung der Objekttemperatur

Im aktuellen Entwicklungsstand der LED-Halterung wird das Messobjekt „LED mit Leiterplatte“ dazu auf einen Aluminium-Kupferkörper aufgebracht (Abb. 2), der mit Hilfe einer Peltier-Einheit (Element und Regelelektronik) bei einer vorgewählten Temperatur (z. B. 25 °C) konstant gehalten wird. Der Temperatursensor für die Regeleinheit befindet sich direkt unter der Leiterplatte (obere Adapterplatte) der LED.

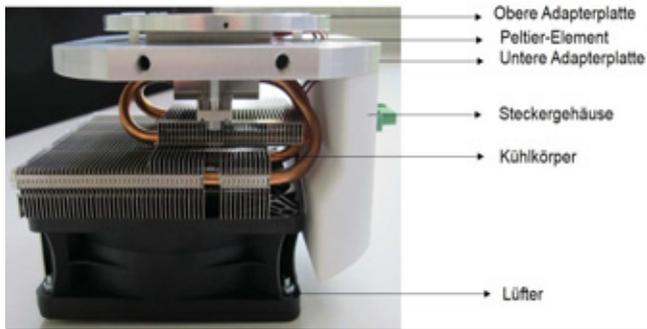


Abb. 2 Einheit zur mechanischen Halterung und aktiver Temperaturstabilisierung des LED Objekts

3 Ergebnisse

3.1 Überlegungen zur Messunsicherheit

Das Nachweissystem ist als Spektralradiometer mit räumlich integrierender Ulbrichtkugel konzipiert. Die interessierende Größe „Lichtstrom“ wird über den relativen spektralen Strahlungsfluss zusammen mit einem entsprechenden photometrischen Lichtstromnormal rückgeführt [1]. Weitere wirksame Unsicherheitsbeiträge sind in Abb. 3 aufgezeigt. Der weitaus größte Beitrag ist durch die notwendige, empirisch festgestellte Korrektur der Kugelantwort durch die Wirkung unterschiedlicher Lichtverteilungen motiviert. Hiermit zeigt sich auch der primäre Ansatzpunkt zur Verringerung der Messunsicherheit bei der Lichtstrombestimmung.

Messunsicherheits-Budgets:

ϕ : Gemessener Lichtstrom (relativ auf 1 gesetzt)

Größe	Wert	Std.-Messunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Index
ϕ_{normal}	1.0000 rel	0.0110 rel	Normal	1.0	0.011 1	4.8 %
δ_{LED}	0.0 rel	$2.89 \cdot 10^{-3}$ rel	Rechteck	1.0	$2.9 \cdot 10^{-3}$ 1	0.3 %
$\delta_{vonTLED}$	0.0 rel	0.0115 rel	Rechteck	1.0	0.012 1	5.2 %
δ_{HLLcor}	0.0 rel	$8.66 \cdot 10^{-3}$ rel	Rechteck	1.0	$8.7 \cdot 10^{-3}$ 1	2.9 %
$\delta_{CarCoer}$	0.0 rel	0.0462 rel	Rechteck	1.0	0.046 1	83.8 %
$\delta_{pRADsignal}$	0.0 rel	$577 \cdot 10^{-6}$ rel	Rechteck	1.0	$580 \cdot 10^{-6}$ 1	0.0 %
$\delta_{LEDnominal}$	0.0 rel	$8.66 \cdot 10^{-3}$ rel	Rechteck	1.0	$8.7 \cdot 10^{-3}$ 1	2.9 %
ϕ	1.0000 1	0.0505 1				

Ergebnisse:

Größe	Wert	Erw.-Messunsicherheit	Erweiterungsfaktor	Überdeckungswahrscheinlichkeit
ϕ	1.00	10 % (relativ)	2.00	95% (Normal)

Abb. 3 Messunsicherheitsbilanz zur Lichtstrombestimmung – Einfluss der empirischen Korrektur der Kugelantwort

Ist man in der Lage diesen Korrekturfaktor (systematische Korrektur mit beigeordneter Messunsicherheit) z. B. praktisch durch eine zusätzliche Goniophotometermessung zu ermitteln, so kann durch diese erweiterte Kenntnis die Messunsicherheit in einem ersten Schritt deutlich verringert werden (siehe Abb. 4).

Tab. 1: Lichttechnischer Vergleich der identisch betriebenen LED-Lichtquelle

LED Duris P10	Lichtstrom Φ in Lumen	x	y	CCT in K
LED-Messplatz mit 0,25 m Ulbrichtkugel	1206 ± 121	0,3836 ± 0,0035	0,3879 ± 0,0035	3996 ± 110
Referenzanlage 3m Ulbrichtkugel	1164 ± 27	0,3854 ± 0,0035	0,3886 ± 0,0035	3955 ± 110

Messunsicherheits-Budgets:

ϕ : Gemessener Lichtstrom (relativ auf 1 gesetzt)

Größe	Wert	Std.-Messunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Index
ϕ_{normal}	1.0000 rel	0.0110 rel	Normal	1.0	0.011 1	19.5 %
δ_{LED}	0.0 rel	2.89·10 ⁻³ rel	Rechteck	1.0	2.9·10 ⁻³ 1	1.3 %
$\delta_{vonTLED}$	0.0 rel	0.0115 rel	Rechteck	1.0	0.012 1	21.5 %
$\delta_{HLLcorr}$	0.0 rel	8.66·10 ⁻³ rel	Rechteck	1.0	8.7·10 ⁻³ 1	12.1 %
$\delta_{Cartcorr}$	0.0 rel	0.0144 rel	Rechteck	1.0	0.014 1	33.5 %
$\delta_{\nu RADsignal}$	0.0 rel	577·10 ⁻⁶ rel	Rechteck	1.0	580·10 ⁻⁶ 1	0.0 %
$\delta_{LEDnominal}$	0.0 rel	8.66·10 ⁻³ rel	Rechteck	1.0	8.7·10 ⁻³ 1	12.1 %
ϕ	1.0000 1	0.0249 1				

Ergebnisse:

Größe	Wert	Erw.-Messunsicherheit	Erweiterungsfaktor	Überdeckungswahrscheinlichkeit
ϕ	1.000	5.0 % (relativ)	2.00	95% (Normal)

Abb. 4 Messunsicherheitsbilanz zur Lichtstrombestimmung – deutliche Verringerung durch Kenntnis des Korrekturfaktors zur Kugelantwort

Weitere Maßnahmen zur Verringerung der Messunsicherheit werden sich in den nächsten Schritten auf die Einflussparameter „Temperaturabhängigkeit des LED-Lichtstroms ($\Phi_{von TLED}$)“ und die Bestimmung und Anwendung der „LED-Stromstärke (i_{LED}) und ($i_{LEDnominal}$)“ sowie auf die Hilfslichtlampenkorrektur ($HLLcorr$) konzentrieren.

Tabelle 1 zeigt den lichttechnischen Vergleich der identisch betriebenen LED-Lichtquelle. Der auftretende systematische Unterschied bei der Lichtstrombestimmung kann hier durch einen Korrekturfaktor (0,965 ± 0,021) für die Kugelantwort der 0,25 m Ulbrichtkugel berücksichtigt werden.

3.2 Zeitlich aufgelöste Messmöglichkeiten

An der Leuchtstoff-konvertierten, weißen LED DURIS P10 wurden orientierende Messungen bei unterschiedlichen Duty Cycles durchgeführt. Abbildung 5 zeigt die Bildschirmdarstellung für einen Duty Cycle von 40% (LED 10ms ON, 15 ms OFF). Die LED-Stromstärke folgt sehr gut einem Rechteckpuls, während der Lichtstrom nach dem Ausschalten der Stromstärke zeitlich abklingt („nachleuchtet“).

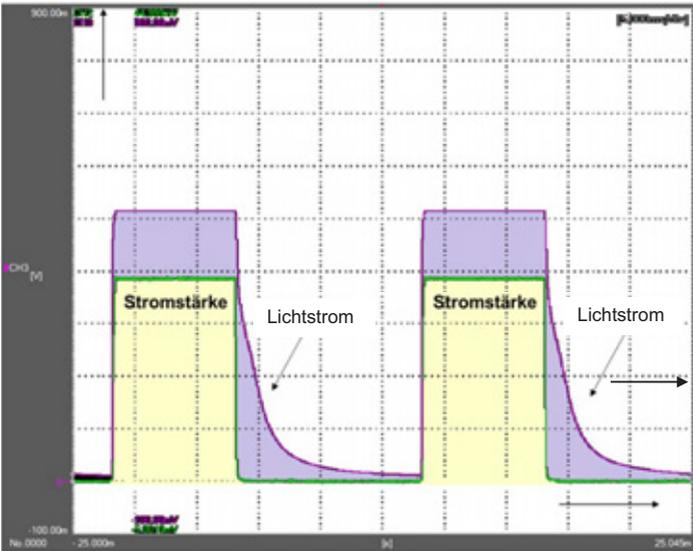


Abb. 5 Zeitlich aufgelöst: LED-Stromstärke und zugehöriger LED-Lichtstrom

Der für die verschiedenen Duty Cycles bestimmte Lichtstrom folgt nicht der theoretischen Überlegung aus dem einfachen „ON/OFF“ Verhältnis. Auch wurde beobachtet, dass die Temperatur während des LED-Betriebs (Start 25 °C) von 20 s nicht durch das Peltier-Kühlelement so kurzzeitig geregelt werden konnte (siehe Abbildung 6).

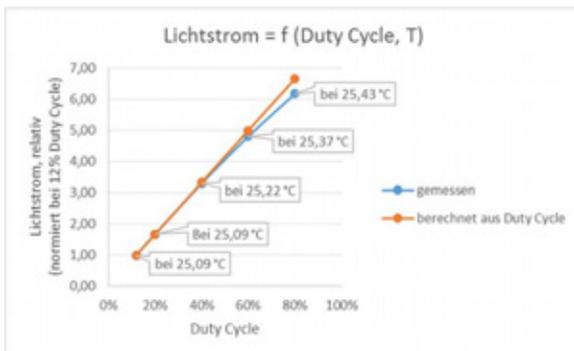


Abb. 6 Lichtstrom als Funktion des Duty Cycle – Vergleich zu theoretischen Überlegungen

4 Fazit

Die aufgebaute Messanlage erfüllt prinzipiell die Anforderungen an die für diese Untersuchungen notwendigen technischen Möglichkeiten. Durch die bislang durchgeführten, ersten orientierenden Messungen können die nächsten Arbeitsschritte und Optimierungen des experimentellen Aufbaus abgeleitet werden, so dass die Modellierung des Messprozesses und damit auch die Bestimmung der beigeordneten Messunsicherheiten durch das darauf folgende Arbeitsprogramm möglich wird.

5 Literaturverzeichnis

[1] Werner Jordan, Werner Halbritter, Walter Steudtner, Ulrich Binder und Norbert Wagner, "*Absolute luminous flux measurements of lamps using the Ulbricht sphere*"
In: CIE x036:2010, Proceedings of the CIE Expert Symposium on Spectral and Imaging Methods for Photometry and Radiometry

Streulichtkorrigierte Spektralradiometer in Anwendung

Dr. Đenan Konjhođić, Instrument Systems GmbH, München, D

Problemstellung

Die wichtigste Einschränkung der Leistung eines Array-Spektralradiometers in der Photometrie und Kolorimetrie ist das Auftreten von Streulicht. Dies bedeutet, dass ein bestimmtes Element des Array-Detektors auch Strahlung aus einem anderen Spektralbereich als den vorgesehenen registriert. Wenn die Unterdrückung des Streulichts durch den richtigen Design des Spektrographen technisch nicht weiter möglich ist, kann es zu einem großen Teil korrigiert werden, z.B. durch die Anwendung einer Streulichtkorrekturmatrix-Methode, entwickelt vom „National Institute of Standards and Technologie“ (NIST).

Ziel

Dieses Paper beschreibt die Möglichkeiten der Streulichtkorrektur für Array-Spektralradiometer und hebt die Vorteile der Anwendung der Streulichtmatrix für verschiedene Messungen hervor. Der Nutzen der Streulichtkorrektur in Abhängigkeit von der Anwendung, dem Lampentyp und dem betrachteten Spektralbereich wird diskutiert.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Die Idee der NIST-Methode ist, dass monochromatische Strahlung einem bestimmten Pixel des Detektors zugeordnet werden kann. Das ganze Licht gemessen außerhalb der Bandpassfunktion für diese Wellenlänge, ist der Streulichtbeitrag eines Pixels gesehen von allen anderen Pixeln im Detektor. In unserer praktischen Realisierung werden die Anregungswellenlängen eines abstimmbaren Lasers in 10 nm-Schritten innerhalb des Messbereichs des Spektralradiometers abgetastet und jeweils ein Spektrum aufgenommen. Die Menge aller aufgenommenen Spektren aller Anregungswellenlängen und entsprechende Interpolation dazwischen ergeben eine gerätespezifischen Matrix. Wenn die Bandpassfunktion des realen Signals subtrahiert wird, erhält man eine Streulichtmatrix. Diese Matrix kann mit Rohspektren multipliziert werden, um die streulichtkorrigierten Spektren zu erhalten. Unsere Realisierung der Streulichtkorrektur ist die erste kommerziell erhältliche, bequeme Methode für jeden Benutzer. Die Streulichtmatrix für ein bestimmtes Spektralradiometer kann schon bei der Kalibrierung numerisch verrechnet werden. Für eine streulichtkorrigierte Messung muss man dann lediglich die entsprechende Kalibrierung wählen und die Streulichtmatrix wird automatisch auf jedes gemessene Spektrum angewandt.

Realisierungsgrad

Dieses Paper präsentiert Ergebnisse von streulichtkorrigierten Array-Spektralradiometern in verschiedenen Anwendungen. Für Linienlampen verschiebt sich die Schwerpunktwellenlänge um 0,1 nm und wird mit der Peak-Wellenlänge nahezu identisch. Dies erhöht die Wellenlängengenauigkeit, wenn die Linienlampe zur Wellenlängenkalisierung verwendet wird. In Spektren von LEDs wird das Streulicht über eine Größenordnung auf ein Niveau von 10^{-5} unterdrückt. Dies führt zur Erhöhung der Genauigkeit der Farbkoordinaten. Den größten Profit von der Streulichtkorrektur haben Messungen im UV-Spektralbereich, da eine 3-4% höhere Genauigkeit bei der radiometrischen Auswertung erreicht wird.

Stray light corrected spectroradiometers in application

Dr. Đenan Konjhodžić, Instrument Systems GmbH, Munich, GERMANY

Issue

The main limitation of the performance of an array spectroradiometer in photometry and colorimetry is the occurrence of stray light. This means that a particular element of the array detector registers radiation from a different spectral region than the designated one. Thus, the spectral power distribution contains a part of incorrect radiation. If the suppression of the stray light by proper design of the spectrograph is technically not further possible, it can be corrected to a great extent, e.g. by applying a stray light correction matrix method developed by "National Institute of Standards and Technology" (NIST).

Aim

This paper describes the possibilities of stray light correction for array spectroradiometers and highlights the advantages of application of the stray light matrix for different measurements. It will discuss benefits of the stray light correction depending on the application, lamp type and the spectral region of interest.

Description of the innovation/»best practice«

The idea of the NIST method is that monochromatic radiation may be associated with a particular pixel of the detector. The whole light measured outside the bandpass function for this wavelength, is the stray light contribution of one pixel seen by all the other pixels in the detector. In our practical realisation, the excitation wavelengths of a tuneable laser are scanned in 10 nm steps within the measuring range of the spectroradiometer, while a spectrum is recorded respectively. The set of all recorded spectra of all excitation wavelengths and appropriate interpolation in between provide a device-specific matrix. If the band-pass function of the real signal is subtracted, one obtains a stray light matrix. This matrix can be multiplied with raw spectra in order to obtain stray light corrected spectra. Our realisation of the stray light correction method is the first commercially available, convenient method for any user. The stray light matrix determined for a certain spectroradiometer can already be numerically applied during the calibration. For the stray light corrected measurements one has to choose the appropriate calibration and the stray light matrix is applied automatically to any measured spectra, without additional time and effort.

Level of realization

This paper will present the results of stray light corrected array spectroradiometers in different applications. For line lamps, for example, the centroid wavelength shifts up to 0.1 nm and gets almost identical with the peak wavelength, which increases the wavelength accuracy if the line lamp is used for wavelength calibrations. In spectra of LEDs the stray light level is suppressed about one order of magnitude to a level of 10^{-5} . This leads to improvement in accuracy of the chromaticity coordinates. The biggest profits of the stray light correction have measurements in the UV spectral region, because of 3-4% higher accuracy in the radiometric evaluation.

Stray light corrected spectroradiometers in application

*Dr. Đenan Konjhodžić,
Instrument Systems GmbH,
Neumarkter Str. 83, 81673 Munich, Germany*

Summary

This paper describes the possibilities of stray light correction for array spectroradiometers of the CAS 140 series from Instrument Systems and highlights the advantages of application of the stray light matrix for different measurements. Application of the stray light correction matrix suppresses the stray light by an order of magnitude down to a level of 10^{-5} . All users benefit from this by achieving more precise calibration, in particular in the UV range (<400 nm). The stray light correction has as a direct consequence about 3-4% higher accuracy in the radiometric value of UV-LEDs and up to 0.0005 more accurate determination of color coordinates of visible LEDs. One application that could particularly benefit from stray light correction is the evaluation of the blue light hazard of optical radiation.

1 Introduction

The main limitation of the performance of an array spectroradiometer in photometry and colorimetry is the occurrence of stray light in the instrument. This means that a particular element of the array detector registers radiation from a different spectral region than the designated one. The reason for the occurrence of stray light can be found in various mechanisms:

- scattered light from the diffraction grating due to manufacturing inaccuracies in the shape and spacing of the lines, or roughness of the surface of the grating,
- higher diffraction orders, particularly for detectors with a wide spectral range,
- double diffraction of the light reflected back on the grating,
- inter-reflections between the detector and other optical components,
- reflection and scattering from surfaces, especially from the inner wall of the spectrograph,
- fluorescence of optical components,
- and the way how the light is coupled into the spectroradiometer.

Thus, the total amount of the measured radiant power contains a part of incorrect radiation, which causes an error in spectral power distribution. The main approach to improve the radiometric performance of the spectroradiometer is to avoid, or at least largely suppress, the stray light by design measures of the spectrograph. When further suppression is technically not possible, the residual stray light can be effectively corrected to a great extent by a suitable method of measuring and calibration, for example, by applying the NIST method [1], as outlined in the following.

2 Method and equipment for creation of the stray light matrix

The calculation of correction functions requires a precise knowledge of the stray light behavior of the spectroradiometer used for measurements over the full detectable spectral range. The complex stray light behavior of an array-spectroradiometer can, as shown in [1], be determined with the aid of tunable laser sources. The idea is that monochromatic radiation can be attributed for the most part to a certain pixel of the detector. The entire light that is measured outside the bandpass function for this wavelength is the stray light contribution of one pixel that is seen from all other pixels in the detector.

In our practical realization, excitation wavelengths are tuned within the measurement range of the spectroradiometer in 10 nm steps with the aid of OPO laser excitation and one spectrum is recorded for each step. An optical parametric oscillator (OPO) is a driven harmonic oscillator that oscillates at optical frequencies. It converts an input laser wave into two output waves of lower frequency by means of second-order nonlinear optical interaction. The set of all recorded spectra over all excitation wavelengths and appropriate interpolation in between results in a device-specific matrix. If the band-pass function of the real signal is subtracted, one obtains a stray light matrix. This matrix can be multiplied with raw spectra in order to obtain stray light corrected spectra.

Our realization of the stray light correction method is the first commercially available, convenient method for any user. The stray light matrix determined for a certain spectroradiometer can already be numerically applied during the calibration of the spectroradiometer with any accessory. For the subsequent stray light corrected measurements one has to choose the appropriate calibration and the stray light matrix is applied automatically to any measured spectra, without additional time and effort. Depending on the application, lamp type and observed spectral range, a stray light correction of array-spectroradiometers provides lesser or greater advantages.

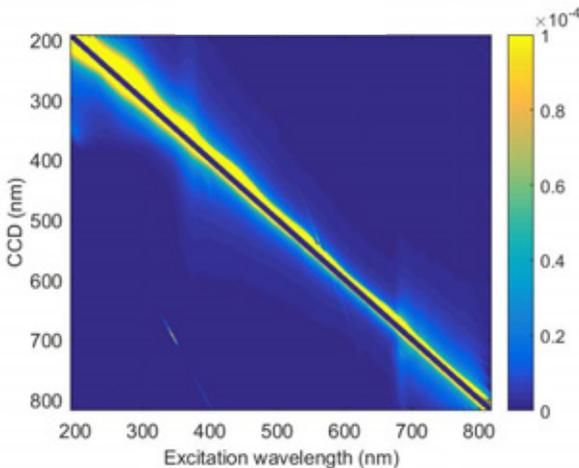


Fig. 1 : Typical stray light matrix using the example of a CAS 140CT (Model UV-VIS).

3 Advantages of stray light correction for the calibration of spectroradiometers

3.1 More precise measurement of spectral lines

In order to investigate the impact of stray light correction on a linear lamp for the calibration of spectroradiometers, an HgAr lamp was measured with and without stray light correction, as shown in the logarithmic display in Fig. 2. Overall, a lower stray light level was determined due to the stray light correction, particularly around the peaks in the range above 700 nm. As anticipated, no effect of stray light correction on the peak wavelength of the respective spectral line is recognizable. On individual lines the shoulder on the left side of the peak is eliminated by the correction, causing the centroid wavelength to shift by up to 0.1 nm, in particular in the red range of the spectrum. Due to stray light correction the centroid wavelength can be more accurately determined and is almost identical to the peak wavelength. Because linear lamps are normally used for the wavelength calibration of spectroradiometers, wavelength precision is accordingly increased.

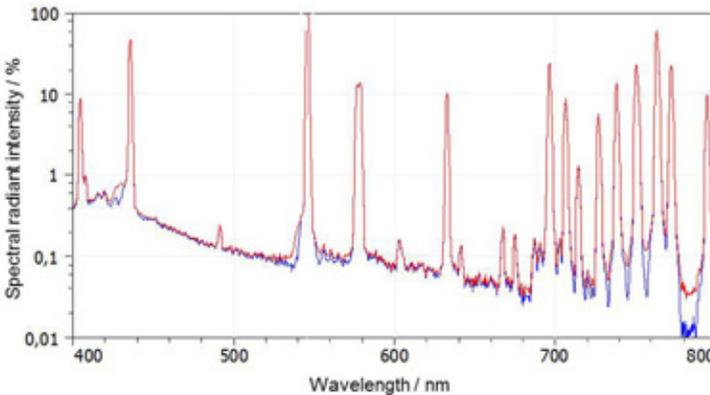


Fig. 2 : Spectrum of a HgAr linear lamp without (red) and with stray light correction (blue).

3.2 Impact of stray light correction on broadband sources for spectral calibration

Broadband sources such as halogen lamps and deuterium lamps are normally used for the spectral calibration of spectroradiometers. The impact of stray light correction on the spectrum of a broadband source is particularly distinct in the UV but also in IR spectral range, because the detector of an array spectroradiometer has only a very low sensitivity at the edges. Stray light correction of the spectrum used for calibration is particularly meaningful, as in particular errors in the areas of lower sensitivity are intensified due to the division of the measured spectrum by the reference spectrum.

If we compare the relationship of sensitivities with and without stray light correction after calibration, we can recognize a stray light portion of about 10% in the range below 400 nm (Fig. 3). A 10% increase in sensitivity in this range of the already low sensitivity, has a direct effect on the absolute precision. In particular applications based on UV radiometry

thus profit from stray light correction, e.g. measurements of UV LEDs, sun simulators or halogen lamps with a high portion of UV radiation.

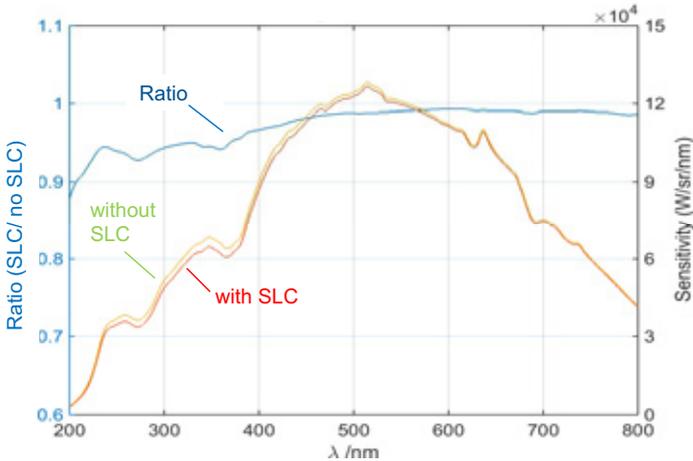


Fig. 3 : Sensitivity curves with and without stray light correction and the relationship between them.

4 Stray light correction in the UV range

The ultraviolet range is normally subdivided into UVA (320-400 nm), UVB (280-320 nm) and UVC (200-280 nm). UVA radiation is used, e.g. for curing of printing inks, adhesives and coatings. UVC radiation is used, e.g. for disinfection and water purification.

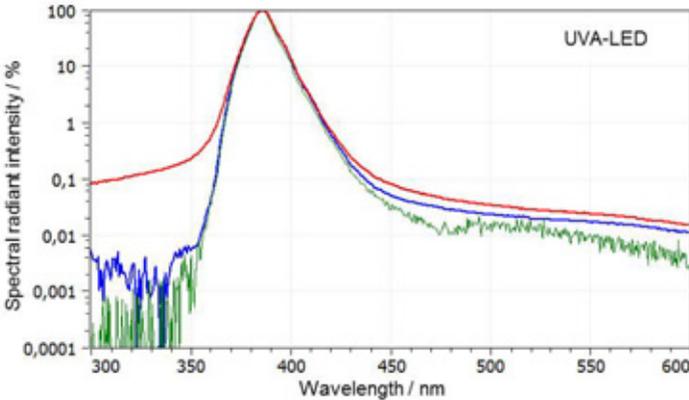


Fig. 4 : Logarithmic display of the spectra of a UVA LED without (red) and with stray light correction (blue) and measured with a double monochromator (green).

Fig. 4 shows by way of example the spectra of a UVA LED with and without stray light correction in logarithmic presentation. The suppression of stray light in the spectral course by somewhat more than one order of magnitude in the UV range to almost 10^{-5} is clearly rec-

ognizable. Beyond this, we measure about 3% more precise radiant intensity in this example with the use of stray light correction. The impact of stray light correction is somewhat greater in UVC LEDs. It almost reaches the stray light level of a double monochromator and about 4% more precise radiant intensity (Fig. 5). While the peak wavelength (257 nm) does not change at all with the stray light correction, the centroid wavelength shifts by about 0.8 nm in the direction of the peak wavelength.

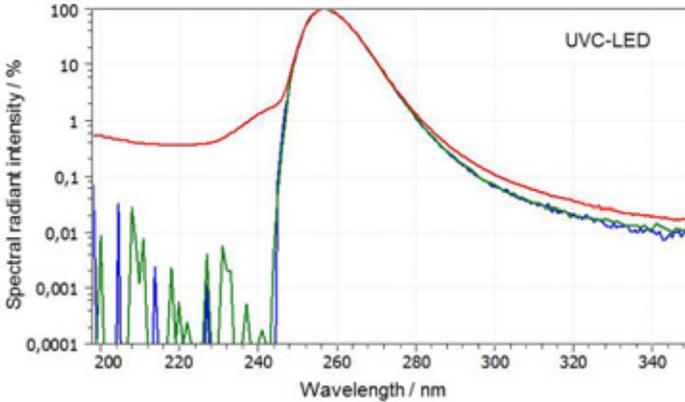


Fig. 5 : Logarithmic display of the spectra of a UVC LED without (red) and with stray light correction (blue) and measured with a double monochromator (green).

In the measurement of UV LEDs considerable errors are made in the determination of the absolute value alone by reason of stray light contaminated calibration. As a direct consequence stray light correction thus has a higher precision in radiometric evaluation. All applications based on UV LEDs profit from this, e.g. curing of adhesives and coatings, lithography, scanning heads, horticulture lighting, biomedical devices, combatting of hospital infections, and others.

5 Influence of stray light correction on LED measurements

Fig. 6 shows an example of the spectra of LED standards in the colors white, blue, green and red, in each case with and without stray light correction. The LED standards refer to stabilized and temperature-controlled LEDs. These were measured in a luminous intensity measuring adapter in the I-LED-B configuration with an array-spectroradiometer CAS140 CT (Model UV-VIS-NIR) with and without application of the stray light correction matrix.

The logarithmic presentation of the spectra clearly shows the impact of stray light correction in the marginal zone and the signal around zero. In ranges with a generally low signal, particularly in the blue and UV range, the stray light level is corrected up to one order of magnitude and reaches a level of 10^{-4} down to $5 \cdot 10^{-5}$.

The impact of stray light correction on the x, y color coordinates with up to 0.0005 is not to be neglected, if we bear in mind that high-quality array spectral radiometers exhibit measurement uncertainties of ± 0.002 to ± 0.0015 and the LED industry strives for an ambitious tolerance of ± 0.001 . Any increase in measurement accuracy is thus very welcome.

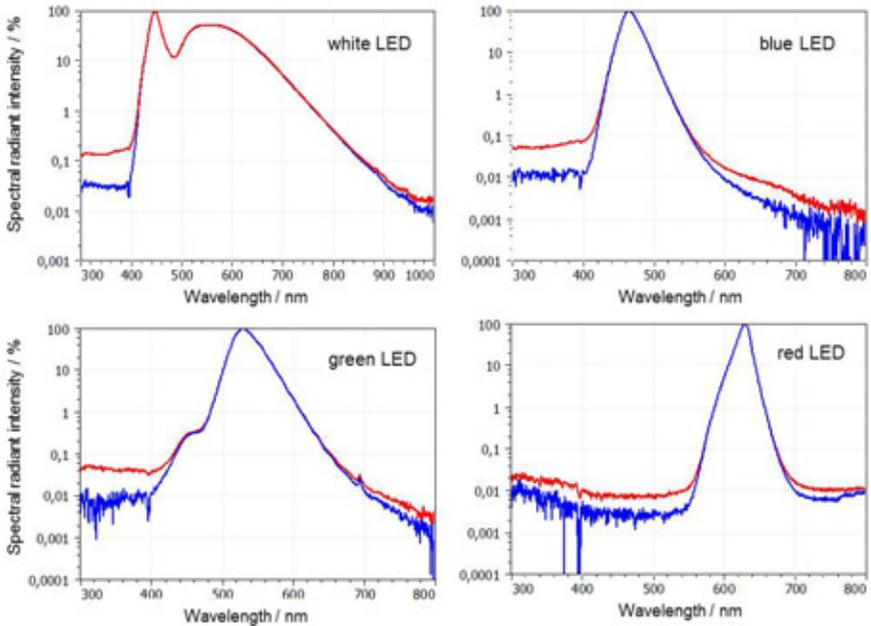


Fig. 6 : Logarithmic display of the spectra of white, blue, green and red LED without (red) and with stray light correction (blue).

6 Outlook: Photobiological safety

One application that could particularly benefit from stray light correction is the evaluation of the photobiological hazards of optical radiation, in particular the blue light hazard on the human eye. The blue light hazard is defined as the potential risk of photochemical damage to the retina, caused by radiation in the wavelength range 300-700 nm, with the greatest effect in the range between 400 and 500 nm. So far, the standards EN 62471 recommends complex and expensive double monochromators as measuring instruments, in particular due to the extremely low stray light level. The higher stray light level in the area of greatest impact in the blue and UV range can simulate a non-existent hazard. With the correction of the stray light a greater measurement accuracy and measurement dynamics can be achieved in this range. Due to stray light correction the array spectroradiometer could become a more convenient and lower-cost alternative to the monochromator for determining the blue light hazard.

Reference

[1] Zong, Y. et. al. 2006. *Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers*. Applied Optics Vol. 45 No. 6, 1111-1119

Entwicklung von LED-Endoskopen: Transmissionsverhalten von LED-Licht durch Gewebe am Beispiel des Ösophagus

Alexander Gärtner, Paola Belloni, Hochschule Furtwangen University

Problemstellung

Die Entwicklung der LED bietet v.a. in der Endoskopie viele neue Möglichkeiten, da diese im Vergleich zu konventionellen Leuchtmitteln einen geringeren Bauraum benötigt. Um die LED-Beleuchtung eines Endoskops optimal zu entwickeln müssen u.a. die optischen Eigenschaften der zu untersuchenden Gewebe bekannt sein, insbesondere wellenlängenabhängige Transmissionskurven. Dadurch können Kontrast, Farbwiedergabe und Homogenität der Beleuchtung optimiert werden, um Gewebe differenziert darzustellen. In der Praxis gibt es jedoch kaum Versuche, in denen wellenlängenabhängige Transmissionskurven erstellt werden.

Ziel

Ziel der Arbeit ist es mit einer geeigneten Messeinrichtung die Transmissionseigenschaften von porkinem Gewebe zu bestimmen, da dieses dem menschlichen Gewebe sehr ähnlich ist. Mit den gemessenen spektralen Eigenschaften wird dann eine optische Simulation mit der Raytracing-Software LightTools durchgeführt, in der die Beleuchtung eines Endoskops mit LED-Lichtquellen im Ösophagus dargestellt wird. Modelle von Lichteinkopplung und Übertragung werden untersucht und durch den Einsatz von Linsen und Diffusoren auf spezifische medizinische Anforderungen optimiert.

Beschreibung der Innovation

Um die Transmissionskurven des Ösophagusgewebes experimentell bestimmen zu können, werden schlachtfrische Proben vom Schwein verwendet. Die Messung erfolgt kurz nach der Schlachtung mit Hilfe einer hochschulinternen Messeinrichtung unter Verwendung einer Ulbrichtkugel, eines speziellen Aufsatzes für diese und eines Spektrometers. Weiterhin wird für die Messung eine Highpower-LED verwendet, deren Farbtemperatur im kaltweißen Bereich bei ca. 7000K liegt. Im Simulationsmodell werden verschiedene Aspekte untersucht um die LED-Beleuchtung zu optimieren. Betrachtet wird die Positionierung der LEDs, die Anzahl und die Sorte und darüber hinaus ob ein Linsenmodell geeignet ist, um die Lichtausbeute zu optimieren.

Realisierungsgrad

Das erste Projektziel – die experimentelle Bestimmung des Ösophagusgewebes - wurde vollständig realisiert. Durch die Messung drei verschiedener Ösophagi konnte in das Simulationsmodell ein wellenlängenabhängiges Transmissionspektrum bzw. Reflexionsspektrum implementiert werden. Die Ergebnisse der Simulation sollen zum besseren Verständnis der Beleuchtungseigenschaften von LED-Lichtquellen bei der LED-Endoskopie dienen und dabei helfen die LED in der Medizintechnik zu etablieren.

Development of LED-Endoscopes: Transmission of LED-light through tissue demonstrated at the example of the esophagus

Alexander Gärtner, Belloni Paola

Furtwangen University of applied sciences, Department of Medical and Life Sciences

Email: alexander.gaertner@hs-furtwangen.de

Summary

The following paper examines the transmission of visible LED-light in the spectral range of 350-750nm through porcine tissue. The experimentally determined results are implemented in a simulation model investigating the light propagation within an esophagus. The simulation model is optimized by positioning of the LEDs, the deployment of a lens, and the substitution of the LED for a light source characterized by a different directional characteristic. The evaluated parameters are: The number of rays (L), the radiated power (P), the luminous flux (ϕ), and the luminance intensity (E). The results present that the best simulation performance is achieved by using a LED containing a tight directional characteristic.

1 Introduction

Optical techniques gain in importance in the field of medical diagnosis and therapy. In particular, diagnostic methods grant vision by contrasting pathological tissue which is difficult in most of the cases to differentiate from healthy tissue. A deeper understanding of the optical properties of tissue like absorption, reflection, and transmission delineates a crucial concern in medical diagnostic technologies. However, only few is known about these optical properties of biological tissue.

In comparison to conventional light sources like halogen, the development of the LED provides new technological potentials due to its small size. Concerning medical endoscopy, an external light source as well as a fiber optic cable conducting the light to the distal end of the endoscope can be substituted by this technology.^[1]

However, to understand the processes that are triggered by radiation, it is important to mention the three basic phenomena that always occur: Transmission, absorption, and reflection (with or without scattering component). As a result of absorption, radiation energy in tissue is partly converted into heat.^[2]

Several molecules participate in the absorption process. The absorption rate of radiation depends on the wavelength of the incoming light. Figure 1 presents the molecules which are predominantly responsible for the respective absorption spectra. Below a wavelength of 600nm, oxygenated hemoglobin (HbO₂), deoxygenated hemoglobin (Hb), and Melanin are responsible for the absorption rates. Above 1000nm, water is predominately accountable for the absorption rates which increase with the wavelength.

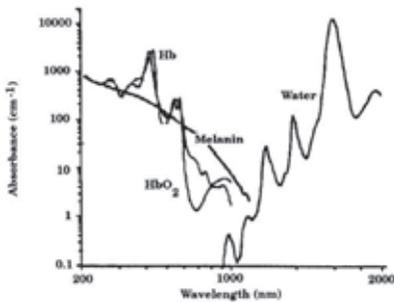


Figure 1: Absorption rates of respective molecules in dependency of their wavelength (Richards-Kortum and Sevick-Muraca, 1996)

Therefore, measurements in the range between 600-1000nm seem to be favorable as exceedingly few absorption occurs in comparison to the higher or lower ranges. This is the reason why this range is also called 'optical window'. However, the optical window does only partly interfere with the visible range of the human eye which is determined from 380-780nm. [3][4]

A couple of biological tissues have already been measured on their transmission rates, e.g. human brain tissue. Eggert and Blazek (1987), for instance, investigated the transmission and reflection properties of human brain tissue by UV/VIS-spectroscopy in a range from 200-900nm. In contrast, Bashkatov et al. (2005) examined mucous tissue in a range from 400-2000nm on transmission and reflection as well as on penetration depths. Beems and van Best (1990) analyzed the transmission rates of the human cornea in the range of visible and near-infrared (NIR) light in dependency of the wavelength. [5][6][7]

Summarizing these literatures [5][6][7], a consistency regarding the transmission is obvious. Biological tissue presents at wavelengths below 600nm only some transmission and reflection which leads to

the assumption that the bulk of radiation is absorbed by tissue. At wavelengths within the range of the optical window, the transmission rates increase rapidly. This augmentation arises from the decreasing absorption rates. Beyond the optical window, absorption rates increase again while transmission rates decrease proportionally.

2 Material and methods

The experimental determination of the transmission rates is performed on three (n=3) recently-slaughtered porcine esophagi, because of the similarity to the human esophagus. Samples of the esophagi are dissected at identical positions, with equal areas of 2cm², and 2mm thickness.

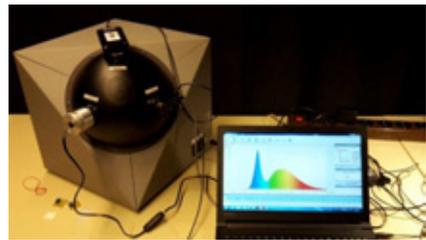


Figure 2: Measuring station in the optical laboratory at HFU

The measuring equipment includes an Ulbricht sphere, a spectrometer with its specific software, and a fixture attached to the left opening of the integrating sphere. The integrating sphere which is illustrated in figure 2 has a diameter of 25cm. The spectrometer used – a GL Spectis 1.0 measures spectra in a range between 340-750nm. The dedicated software Spectrosoft visualizes the results measured by the spectrometer. Figure 3 presents the inner assembly of the fixture. In the center, the fixture's components are hollowed which permits LED-light (5) to pass the samples (2) and enter the integrating sphere. Additional rings

(3)(4) can be used as required to keep the sample in the right position.

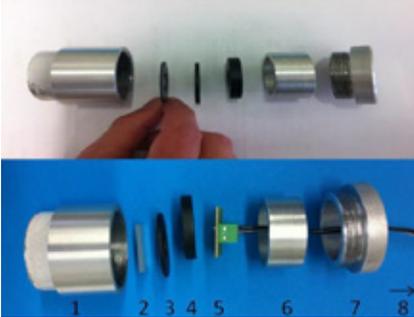


Figure 3: Assistant fixture permitting transmission measurement of samples.

Thanks to its optical properties, the LED can be used for any application in medical technology. The bluish white LED has a color temperature of 7000K and is defined on the black-body-curve at the position $x=0.3058$, $y=0.31161$, and $Y=1933.62$ in the CIE-color diagram.

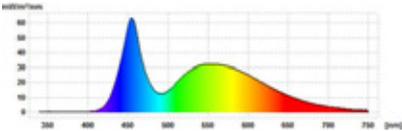


Figure 4: LED – reference emission spectrum

Figure 4 illustrates the luminescence emission spectrum of the LED which serves as reference to the following measurements.

3 Results

The measurements of the samples high-light similar results among each other.

Figure 5 illustrates the overall transmission through esophageal tissue.

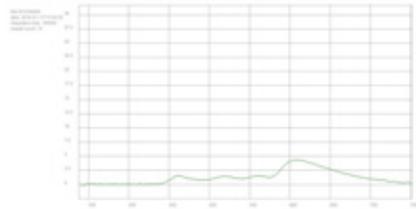


Figure 5: Overall transmission rates

The maximum is no longer located at approximately 450nm, but it shifts into the range of visible red light at approximately 600nm. In comparison to the reference emission spectrum (figure 4), absorption predominantly occurs at lower wavelengths.

Figure 6 delineates the relative transmission rates within the spectrum of 350-750nm. The relative transmission is defined as the percentage of light that can be measured at the spectrometer in reference to the initial amount of incoming light.

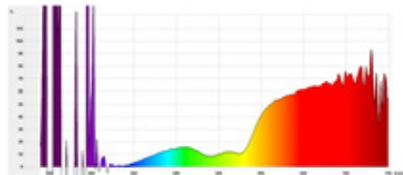


Figure 6: Relative transmission rates

It clearly shows the low transmission rates at lower wavelengths. The curve increases rapidly at approximately 600nm. The amplitudes are neglected in a spectrum below 400nm, because the signal to noise was too low in this range.

Evaluating the color temperature changes, a shift from 7000K to 1796K occurred. Therefore, the color is defined in the CIE diagram at the position $x=0.5307$, $y=0.3852$, and $Y=16977.25$. At this point, the incoming light that is measured at the spectrometer is no longer bluish white but slightly red-white.

This shift is not only visible in the numerical results, but it can be observed, as shown in figure 7.



Figure 7: Color shift through tissue

The experimentally determined transmission curves are implemented into a simulation model which is developed with the simulation software LightTools. In this model, a 25cm long and 2cm thick esophageal-like tube with a diameter of 1.5cm serves as simulation approximation. The surface coating of the tube which is responsible for the transmission rates is adapted according to the experimentally determined transmission results as shown in figure 8.

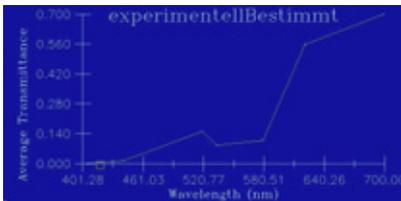


Figure 8: Implementation of the relative transmission spectrum in LightTools

Furthermore, the simulation is performed four times with different parameters:

1. Initial System
2. Central LED-Positioning
3. Deployment of a plan-convex lens

4. Deployment of a LED with tighter directional characteristic (80°)



Figure 9: Initial System (above) and deployment of a lens (down)

Figure 9 demonstrates the initial system and the modification by deploying a lens. It clearly shows the ability of a lens to bundle the rays and direct them into the tube. The results are measured at a detector in a distance of 3cm from the light sources and presented in the following tables 1-4:

Table 1: Results - Initial system

Symbol	Initial value	Measured	Unit
L	100.000	1.303	[l]
P	0,9	0,64	[W]
Φ	280	198,17	[lm]
E	n/a	\varnothing 46.017	[lx]

Table 2: Results - Central LED-Positioning

Symbol	Initial value	Measured	Unit
L	100.000	1.334	[l]
P	0,9	0,64	[W]
Φ	280	198,67	[lm]
E	n/a	\varnothing 46.133	[lx]

Table 3: Results – Deployment of a lens

Symbol	Initial value	Measured	Unit
L	100.000	2.133	[l]
P	0,9	0,75	[W]
Φ	280	238,53	[lm]
E	n/a	\varnothing 55390	[lx]

Table 4: Results: Deployment of a LED with tighter directional characteristic

Symbol	Initial value	Measured	Unit
L	100.000	1.110	[l]
P	0,45	0,36	[W]
Φ	119	97,99	[lm]
E	n/a	\varnothing 22753	[lx]

The simulations 1-3 are performed with two light sources, whereas the simulation 4 is performed (due to its size) with only

one light source. Therefore, the results of 4 are multiplied by a factor of 2.

4 Discussion

Some results are graphically presented to allow a clear discussion.

Analyzing figure 10, there is no significant difference by positioning the LEDs centrally. A significant improvement is reached by using a plan-convex lens bundling the rays. The best result is achieved by using a light source with a tighter directional characteristic.

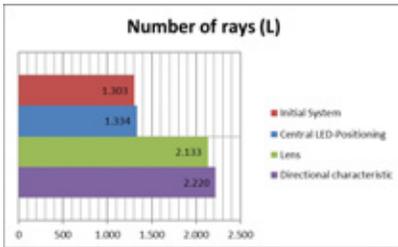


Figure 10: Analysis - number of rays

Figure 11 presents the luminous flux of the simulation relating to the inputs. There is no significant difference by positioning the LEDs centrally. The deployment of a lens provides better results than using a LED with a tighter directional characteristic.

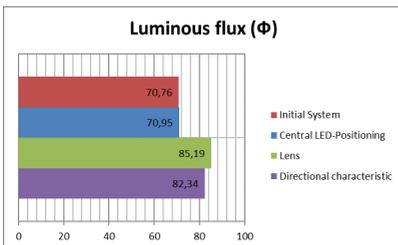


Figure 11: Analysis – luminous flux

The simulation shows similar results for the luminous flux and the radiated power, because they differ only in a conversion factor.

5 Conclusion

The measured results highlight that biological tissue has higher transmission rates in a spectral range above 600nm which corresponds to the results from literature. [5][6][7] In contrast, the intense radiation in lower spectral ranges below 600nm is quickly absorbed by low penetration depths because of molecules presented in figure 1.

Summarizing the simulation results, the overall transmission rates are rather low in regard to the initial reference emission spectrum. The simulation shows that there is no significant difference between the initial system and the system where the LEDs are centrally positioned. However, the deployment of the lens as well as usage of a LED with a tighter directional characteristic improves the results significantly. Therefore, it is necessary to consider the directional characteristic of a LED or introduce optical elements in order to improve the light coupling.

Additionally, to the system efficiency that can be directly measured, there are several aspects that should be also covered by further investigations

- Color rendering index (CRI)
- Color temperature
- Light emitting efficiency

Especially the CRI is an important property for medical applications as it provides information about the authenticity of reproducing the original color of a tissue. This aspect is important to distinguish between the different red shades which is a serious issue, e. g. in tumor diagnosis. LED light sources implemented in medical instrumentations provide new technological opportunities which can improve medical diagnosis and imaging in future years.

6 Bibliography

- [1] Erik Beckert, Frank Wippermann, Sarah Walther et al.: Autoclaveable miniaturized video endoscopes with simplified flip-chip assembly. In: Proc. SPIE 7893, Endoscopic Microsurgery VI, 78930B (February 22, 2011)
- [2] R. Rox Anderson, John R. Parrish: Selective Photothermolysis: Precise Microsurgery by Selective Absorption of Pulsed Radiation. In: Science 220 (4596), p. 524-527 (April 29, 1983)
- [3] Rebecca Richards-Kortum, Eva Sevick-Muraca: Quantitative optical spectroscopy for tissue diagnosis. In: Annual review of Physical Chemistry. Volume 45, p. 555-606 (October, 1996)
- [4] Ying-Ying Huang, Michael Hamblin, Aaron C.-H. Chen: Low-laser therapy: an emerging clinical paradigm. In: Biomedical Optics & Medical Imaging. SPIE Newsroom, p. 1-3 (July, 2009)
- [5] Hans R. Eggert, V. Blazek: Optical Properties of human brain tissue, meninges and brain tumors in the spectral range from 200-900nm. In: Neurosurgery. Volume 21, No. 4, p. 459-465 (1987)
- [6] A. N. Bashkatov, E. A. Genina, V. I. Kochubey et al.: Optical properties of human skin, subcutaneous, and mucous tissues in the wavelength range from 400-2000nm. In: Journal of Physics. Volume 38, p. 2543-2555 (2005)
- [7] Eva M. Beems, Jaap A. van Best: Light Transmission of the Cornea in whole human eyes. In: Experimental Eye Research. Volume 50, Issue 4, p. 393-395 (April, 1990)

Messen der Beleuchtungsstärke mit dem Smartphone?

Klaus Bieckmann, DIAL GmbH

Problemstellung

Die Fragen nach der Möglichkeit des Messens der Beleuchtungsstärke mittels Smartphone und entsprechender App häuften sich bei uns im Hause. Die Vorbehalte der Experten im Lichtlabor waren groß, die Chancen jedoch, jederzeit die Beleuchtungsstärke ohne separate Hardware messen zu können, auch.

Ziel

Wir wollten Erkenntnisse zur Qualität der Messungen mittels Smartphone + App, insbesondere zur Messunsicherheit gewinnen, um damit belastbare Aussagen und Empfehlungen zum Umgang mit diesen Geräten tätigen können.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Hierzu haben wir eine repräsentative Auswahl marktgängiger Smartphones sowie dazu geeignete Software-Applikationen (kostenlose und kostenpflichtige) genommen und diese mit einem kalibrierten Labormessgerät der Klasse A (gemäß DIN 5032-7) für drei verschiedenen Weißlichtquellen im Wertebereich zwischen 10 lx und 10.000 lx verglichen.

Realisierungsgrad

In diesem Vortrag stellen wir die Ergebnisse, die teilweise bereits veröffentlicht wurden, vollständig vor. Die Resonanz auf die bisherige Publikation war überwältigend, offensichtlich interessiert sich eine große Anzahl von lichttechnisch und lichtplanerisch tätigen Personen für das Thema.

Measuring illuminance via smartphone?

Klaus Bieckmann, DIAL GmbH

The question posed

We have frequently been asked whether it is possible to measure illuminance via a smartphone with the appropriate app. The misgivings held by the experts in our photometric laboratory were numerous; yet, on the other hand, there seemed to be many chances of being able to measure illuminance at any time without separate hardware

The goal pursued

We wished to find out more about the quality of measurements made via a smartphone +app, especially with regard to measurement uncertainty, and we wished to be in a position to make verifiable statements and reliable recommendations on how to work with these devices.

Describing innovation / »best practice«

To this end we have made a representative selection of common smartphones and compatible software applications(free and fee-based) and have compared them with a calibrated class A laboratory measuring device (in accordance with DIN 5032_7) for three different sources of white light in the value range of 10 lx to 10 000 lx.

Implementation

In this talk we will present all the results, some of which have already been published. The feedback after publication so far has been overwhelming; it is clear that a great number of people engaged in photometry or lighting design are interested in this topic.

Messen der Beleuchtungsstärke mit dem Smartphone?

*Klaus Bieckmann,
Teamleader Lighting Design and Technology,
DIAL GmbH, Bahnhofsallee 18, 58507 Lüdenscheid*

Zusammenfassung

Es gibt für alles eine App. Mit diesem Versprechen wollen uns Smartphone und App-Hersteller den Alltag erleichtern. Auch für den Licht- und Architekturbereich gibt es zahlreiche App-Angebote. Für uns besonders interessant: Die Luxmeter-Apps. Ersetzen sie ein professionelles Messgerät? Mit dieser Frage werden wir immer häufiger konfrontiert. Denn der Vorteil liegt auf der Hand: Solche Apps sind kostenlos oder für kleines Geld verfügbar.

Als Betreiber eines akkreditierten Lichtlabors können wir eigentlich nur schmunzeln, wenn jemand mit dem »Telefon« ernsthaft eine fotometrische Größe ermitteln will. Doch unsere Neugier motivierte uns, der Sache auf den Grund zu gehen. Wir wollten herausfinden, wie gut sich verschiedene Luxmeter-Apps für die verschiedenen Betriebssysteme im Vergleich zu einem kalibrierten Beleuchtungsstärkemessgerät der Klasse A schlagen.

1 Die Hardware

Für die Untersuchung kamen sowohl iPhones verschiedener Baureihen, als auch Geräte der Hersteller Sony, Samsung und Nokia zum Einsatz.

Tab.1: Verwendete Smartphones

Hersteller	Betriebssystem
iPhone 5	iOS
iPhone 5S	iOS
iPhone 6	iOS
Sony Xperia Z 1	Android
Sony Xperia Z 2	Android
Samsung Galaxy S 5	Android
Nokia Lumia 925	Windows Phone

2 Die Apps

Folgende Luxmeter-Apps, die meisten davon waren kostenlos, haben wir ausgewählt und auf den jeweiligen Systemen installiert:

Tab.2: Untersuchte Luxmeter - Apps

Bezeichnung	Hersteller	Betriebssystem	Kalibriermöglichkeit	Kosten
Galactica Luxmeter	Flint Soft Ltd.	iOS	nein	kostenlos
LightMeter by whitegoods	Whitegoods	iOS	ja	kostenlos
LuxMeterPro Advanced	AM PowerSoftware	iOS	ja	7,99 €
Luxmeter	KHTSXR	Android	ja	kostenlos
Light Meter Pro	Mannoun.Net	Android	ja	kostenlos
Lux Light Meter	Geogreenapps	Android	ja	kostenlos
Sensor List	Ryder Donahue	Windows Phone	ja	kostenlos

3 Unsere Referenz

Die Referenzmessungen führten wir mit einem Beleuchtungsstärkemessgerät des Herstellers PRC Krochmann aus unserem Labor durch (Modell 106e, Sonderversion, Genauigkeitsklasse A). Selbstverständlich mit gültiger rückführbarer Kalibrierung.

4 Die verwendeten Lichtquellen

Für die Untersuchung haben wir drei unterschiedliche Lichtquellen ausgewählt:

- Niedervolt-Halogenglühlampe
- Kompaktleuchtstofflampe (ähnlichste Farbtemperatur: 2.700 K)
- LED (ähnlichste Farbtemperatur: 3.000 K).

Aus Gründen der Vereinfachung und der Übersichtlichkeit beschränken wir uns in der Auswertung allerdings auf die Darstellung der Ergebnisse, die wir mit der LED Lichtquelle ermittelt haben.

5 Unser Testaufbau

Der Test fand in einem Raum ohne Tageslicht und ohne Einfluss anderer Kunstlichtquellen statt. Mit den genannten Lichtquellen wurde auf einer horizontalen Fläche nacheinander eine Referenzbeleuchtungsstärke von 100 lx, 500 lx und 2.000 lx eingestellt. Dazu wurde der Fotometerkopf des PRC Beleuchtungsstärkemessgerätes axial unter der Leuchte (Gamma 0°) angeordnet. Nacheinander wurden nun die verschiedenen Smartphones mit den jeweiligen Apps zur Messung der Beleuchtungsstärke verwendet. Dabei wurde die Frontkamera bzw. der »Helligkeitssensor« auf der Displayseite der Smartphones verwendet. Sensor bzw. Frontkamera wurden exakt am Referenzpunkt positioniert, an dem sich vorher der Fotometerkopf des Beleuchtungsstärkemessgerätes befand. Dieser Aufbau wurde für alle Apps beibehalten, mit Ausnahme der kostenpflichtigen App »LuxMeterPro Advanced«, da diese das reflektierte Licht einer Fläche als Eingabe

benötigt. Die zahlreichen Einstellungen in dieser App bzgl. des Typs der Lichtquelle, des Abstands der beleuchteten Fläche zur Lichtquelle, usw. wurden ebenfalls vorgenommen.

Einige Apps bieten die Möglichkeit einer Kalibrierung an. Diese Kalibrierung wurde gemäß Beschreibung der Hersteller immer bei einer Referenzbeleuchtungsstärke von 100 lx durchgeführt.

6 Auswertung

Im Rahmen unserer Untersuchung haben wir zunächst festgestellt, dass man zwar einige Apps auf einen bestimmten Wert kalibrieren konnte, allerdings konnte man diesen Wert oft nicht präzise genug einstellen. So erfolgte die Kalibrierung häufig nur in großen Sprüngen, oder der Referenzwert von 100 lx konnte nicht eingestellt werden, da sich die App z.B. auf maximal 34 lx kalibrieren ließ (iPhone 5 in Kombination mit »LightMeter by whitegoods«). Die Abweichungen von der Referenzbeleuchtungsstärke waren teilweise extrem hoch (bis zu 113% bei der Kombination des Samsung Galaxy S 5 mit der App »Lux Light Meter« von Geogreenapps). Bei einem Referenzwert von 500 lx wurden im Display des Smartphones 1.063 lx angezeigt. Die geringste prozentuale Abweichung (3%) trat bei einem iPhone 5 in Kombination mit der App »LightMeter by whitegoods« auf. Beim Referenzwert von 500 lx wurden auf dem Smartphone 484 lx angezeigt. Dies lässt aber nicht den Schluss zu, dass genau diese Kombination immer zur geringsten prozentualen Abweichung vom Referenzwert führt. Bei einem Referenzwert von 100 lx lag die App auf demselben Smartphone nämlich mit einem angezeigten Wert von 11 lx um 89% daneben.

Generell lässt sich beobachten, dass die angezeigten Werte der Sony Geräte, des Samsung und des Nokia Smartphones weit oberhalb der Referenzwerte liegen, während die iPhones in der Regel Werte weit unterhalb der Referenz angeben. Die mittlere Abweichung zum Referenzwert, gemessen mit allen Apps der Android Smartphones und des Windows Phones liegt im Schnitt ca. 60% oberhalb der Referenz. Die mittlere Abweichung aller Werte, die mit sämtlichen iPhones gemessen wurden, liegt um ca. 60 % unter den Referenzwerten.

Weiter lässt sich feststellen, dass die installierte App auf dem Samsung Smartphone und den Sony Geräten scheinbar keinen Einfluss auf den angezeigten Wert hat. Offenbar wird bei diesen Geräten der »Helligkeitssensor« und nicht die Kamera zur Beleuchtungsstärkemessung verwendet. Bei einigen Samsung Modellen kann über die Tastenkombination *#0*# in den LCD Test Modus gewechselt werden. Hier kann man unter der Funktion »Lichtsensor« die angebliche Beleuchtungsstärke ablesen, ohne eine App zu installieren. Die Installation einer App scheint hier überflüssig, da sie offenbar nur der Darstellung dieses Wertes dient. Dennoch wichen auch alle angezeigten Werte dieser Geräte im Bereich von 37 bis 113% vom Referenzwert ab.

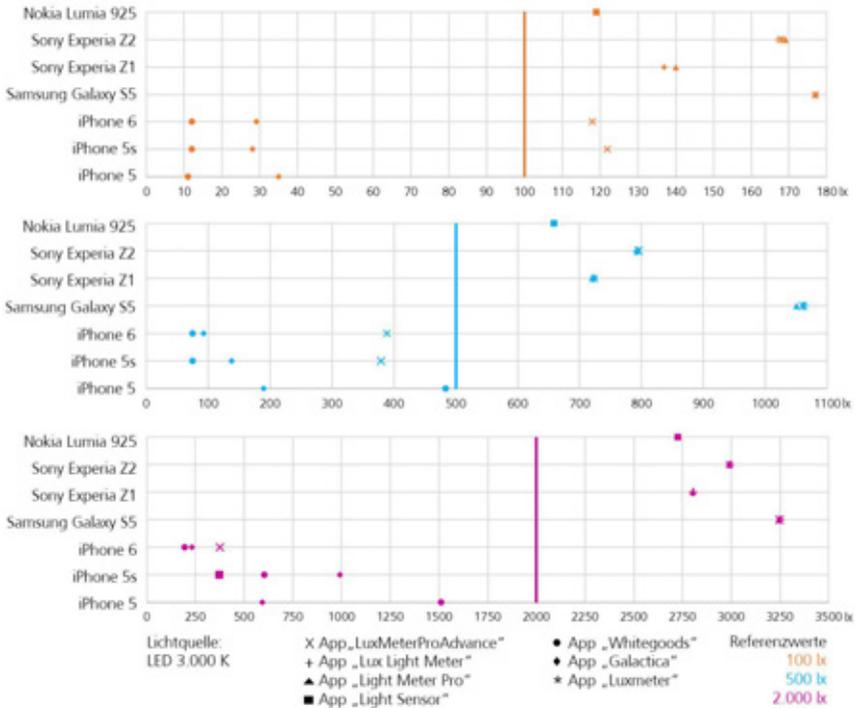


Abb. 1: Messergebnisse bei 3 verschiedenen Referenzwerten

7 Führt die gleiche Hardware mit gleicher App zu gleichen Ergebnissen?

Unabhängig von den großen Schwankungen der gemessenen Werte haben wir uns die Frage gestellt, ob baugleiche Smartphones mit der gleichen App auch gleiche Beleuchtungsstärkewerte anzeigen. Dazu haben wir vier baugleiche Smartphones des Typs »iPhone 5« jeweils mit den Apps »Galactica« und »LightMeter by whitegoods« verwendet. Doch leider wurden wir auch hier enttäuscht. Das Diagramm zeigt, dass es bei den vier Smartphones teilweise zu völlig unterschiedlichen Messergebnissen kommt.

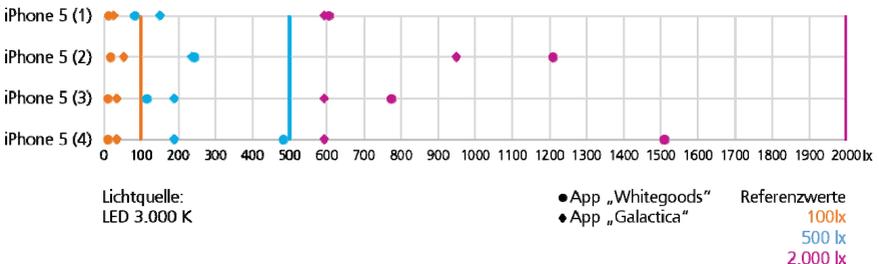


Abb. 2: Vergleich von 4 baugleichen Smartphones mit den gleichen Apps

Den Grund dieser Schwankungen baugleicher Geräte, vermuten wir in den Toleranzen der in den Smartphones verbauten Komponenten. Toleranzen, die dem Nutzer im alltäglichen Gebrauch des Smartphones nicht weiter auffallen, haben offenbar hier im direkten Vergleich große Auswirkungen auf die angezeigten Beleuchtungsstärkewerte.

8 Ist die prozentuale Abweichung vom Referenzwert immer gleich?

Verwendet man nun ein Smartphone mit immer der gleichen App, könnte man ja vermuten, dass man es trotzdem gut zur Messung der Beleuchtungsstärke verwenden kann, wenn man nur die prozentuale Abweichung vom Referenzwert kennt. Doch ist die prozentuale Abweichung des von der App angezeigten Wertes im Vergleich zum Referenzwert bei verschiedenen Beleuchtungsstärken gleich? Um dieser Frage nachzugehen, haben wir mit einem iPhone 5 eine Beleuchtungsstärkemessung unter 10 lx, 100 lx, 1.000 lx und 10.000 lx auf der optischen Bank unseres schwarzen Labors durchgeführt. Die Schritte können hier sehr präzise durch die Veränderung der Entfernung zwischen Lichtquelle und Empfänger eingestellt werden. Als Lichtquelle diente hier wiederum die LED Leuchte mit 3.000 K. Bei diesem Versuch haben wir uns die Werte von zwei verschiedenen Apps angesehen. Erfahrungsgemäß wichen die Werte der Apps untereinander ab. Teilweise allerdings sogar um bis zu 358% (12 lx zu 55 lx, beim Referenzwert von 100 lx). Schaut man sich die prozentualen Abweichungen von den Referenzwerten an, so kann man auch hier keine Regelmäßigkeit feststellen.

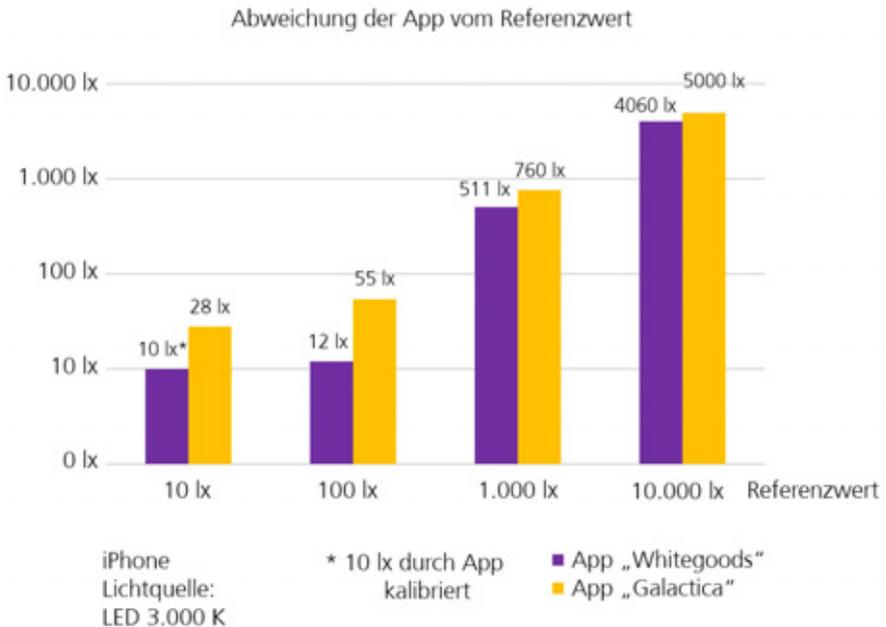


Abb. 3: Abweichung der Apps vom Referenzwert bei verschiedenen Beleuchtungsstärken

Die App »Galactica« lag bei 10 lx um 180% über dem Referenzwert und bei 10.000 lx um 50% unterhalb des Referenzwertes. Die App »LightMeter by whitegoods« wurde auf 10 lx kalibriert. Bei einem Referenzwert von 100 lx lag sie um 88% und beim Referenzwert von 10.000 lx um 59% daneben. Alle weiteren Werte der Luxmeter-Apps lagen deutlich unterhalb der gemessenen Referenzwerte. Eine immer gleiche prozentuale Abweichung in Bezug auf die verschiedenen Referenzwerte konnte nicht festgestellt werden. Nebenbei haben wir herausgefunden, dass die Verwendung der Rückkamera im Vergleich zur Frontkamera des Smartphones häufig völlig unterschiedliche Werte liefert. Darüber hinaus zeigen einige Apps niemals 0 lx an, auch dann nicht, wenn die Kamera lichtdicht abgedeckt wird.

9 Fazit

Die Ergebnisse belegen, dass eine seriöse Messung der Beleuchtungsstärke nur mit professioneller Hardware möglich ist. Diese hat einen $V(\lambda)$ -angepassten Sensor, welcher dafür sorgt, dass eine Bewertung der auftreffenden Strahlung entsprechend der Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges für das Tagsehen erfolgt. Darüber hinaus ist eine cos-getreue Bewertung wichtig, d. h. je nach Einfallswinkel auf den Sensor erfolgt eine Gewichtung der auftreffenden Strahlung. Beides können Kameras von Smartphones nicht leisten, da ansonsten ihre ursprüngliche Funktion nicht gewährleistet wäre.

Dass ein Smartphone ein professionelles Beleuchtungsstärke ersetzen kann, ist von den Herstellern der Apps sicher nicht beabsichtigt. Die Tatsache, dass einige Apps mit sogenannten Kalibrierfunktionen arbeiten, klingt zunächst professionell und smart, aber leider lässt sich der Wert häufig nicht genau einstellen. Gelingt es dennoch, so ist der Nutzen gering, da die gemessenen Werte außerhalb des kalibrierten Wertes extrem schwanken. Selbst bei Verwendung der gleichen App auf baugleichen Smartphones kommt es zu unterschiedlichen Messergebnissen.

Apps sind also leider kein adäquates Hilfsmittel zur Beleuchtungsstärkemessung und selbst für eine orientierende Messung absolut unbrauchbar. Im Gegenteil: Sie führen den Anwender auf eine völlig falsche Spur.

Prüfung und faire Bewertung der Überspannungsfestigkeit von LED-Leuchten im Rahmen der Beschaffung

Ing. MMag. Gerald Wötzl, Bakk.; Magistratsabteilung 33 - Wien Leuchtet

Ziel

Ausreichender Überspannungsschutz für elektronische Komponenten für öffentliche Beleuchtung. Die MA 33 plant den Austausch von mehr als 50.000 Leuchten in den nächsten 4 bis 5 Jahren. Das Ziel ist die faire Qualitätsprüfung von LED-Leuchten im Zuge der Beschaffung.

Beschreibung

Die MA 33 – Wien Leuchtet hat sich intensiv mit dem Thema Überspannungen im Kontext der öffentlichen Beleuchtung auseinandergesetzt. Eine große Herausforderung liegt dabei in der Senkung des Risikos von großflächigen Ausfällen von LED-Leuchten bei der Umrüstung von Bestandsanlagen. Im ungünstigsten Fall sind die Leuchten galvanisch getrennt, d.h. vom Boden isoliert montiert und verfügen nicht über separate Schutzleiter.

Der Themenkomplex Überspannungen ist vielfältiger als man im ersten Moment vermuten würde. Derzeit sind folgende Ursachen für Ausfälle von elektronischen Betriebsmitteln bekannt:

1. Direkter Einschlag
2. Indirekter Einschlag (= galvanische Kopplung, induktive Kopplung,...)
3. Überspannungen aus dem Versorgungsnetz
4. Elektrostatische Aufladungen (ESD – Electrostatic Discharge) bei isolierter Montage

Der besondere Umstand, dass die Effekte Nr. 1, 2 und 4 auch bei ausgeschalteter Beleuchtung zu Ausfällen führen, muss an dieser Stelle erwähnt werden. Die Normativen Grundlagen sind für Surge (entspricht einem indirektem Einschlag) und Entladungen statischer Elektrizität sind in der ÖVE/ÖNORM EN 61547 – geregelt. Die Fragestellung die sich draus ergeben:

- Entsprechen die normativen Grenzwerte den Anforderungen der Praxis?
- Gibt es parallelen bei Fehlerbildern zwischen Labor und Praxis?
- Hat die mechanische Konstruktion auf die Überspannungsfestigkeit?

Die Prüfung der Qualität von angebotenen Produkten ist für die MA 33 unabdingbar. Die Prüfungen haben gezeigt, dass Änderung an bereits geprüften Produkten (neuer Treiber, neue LED-Platine oder geänderte Befestigungspunkte und Methode, geänderte Verdrahtung, etc.) zu neuen Fehlern führen können. Im ungünstigsten Fall bleiben diese bis zum ersten "Gewährleistungsfall" unerkannt.

Entwicklung von hocheffizienten Hochfrequenz-Wechselrichtern mit SiC-Power-Modulen

Fabian Denk, Karsten Hähre, Rainer Kling, Wolfgang Heering
Karlsruher Institut für Technology (KIT) – Lichttechnisches Institut (LTI), Engesserstr. 13,
76131 Karlsruhe, Germany, fabian.denk@kit.edu

Problemstellung und Forschungsfragen

Für den induktiven Betrieb von elektrodenlosen Gasentladungslampen sind Hochfrequenz-(HF-) Wechselrichter mit Ausgangsfrequenzen über 2 MHz nötig. Diese sind mit Silizium (Si) Leistungstransistoren nur für kleine Leistungen effizient realisierbar. Daher präsentieren wir in dieser Arbeit die Entwicklung von hocheffizienten HF-Wechselrichtern auf Basis von Silizium-Karbid- (SiC-) Leistungstransistoren für induktive Hochleistungslampen.

Stand der Wissenschaft/Technik

HF-Wechselrichter für Induktionslampen mit Si-FETs sind auf dem Markt lediglich bis 185 W Lampenleistung verfügbar. Diese Leistung ist jedoch für viele technische UV-Anwendungen nicht ausreichend. Die dort eingesetzten konventionellen UV-Lampen weisen partiell schlechtere Wirkungsgrade, kleinere Leistungsdichten sowie eine kürzere Lebensdauer auf.

Forschungshypothesen

Um elektrodenlose UV-Lampen in technischen Anwendungen mit hohen Bestrahlungsstärken einsetzen zu können, müssen effiziente MHz-Wechselrichter mit einer Ausgangsleistung von mehreren kW entwickelt werden. Dies kann aktuell nur mit SiC-Transistoren realisiert werden. Jedoch sind sie mit den etablierten 3-Pin TO-247 und 4-Pin SOT-227 Gehäusen bei Anwendungen oberhalb von 2 MHz nicht optimal geeignet. Daher wurden gemeinsam mit der IXYS Semiconductor GmbH Halbbrücken-Module mit 25 mΩ SiC MOSFETs im SMPD-Gehäuse entwickelt. Mit diesen sollen hocheffiziente MHz-Wechselrichter mit einem Wirkungsgrad von über 95% bei Ausgangsleistung von über 10 kW möglich werden.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Halbbrücken-Wechselrichter mit einem resonantem Serienschwingkreis (L_{res} und C_{res}), zur Sicherstellung von ZVS, einer Last (R_L) sowie einem Entlastungskondensator (C_P), zur Minimierung der Ausschaltverluste. Der Schaltplan ist in Abbildung 1 gezeigt.

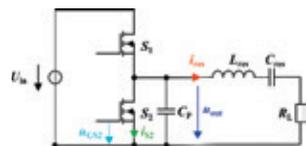


Abbildung 1: Schaltplan des Halbbrücken-Wechselrichters mit C_P , L_{res} und C_{res} sowie R_L .

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Mit den Halbbrücken-Wechselrichtern auf Basis der SMPD-SiC-Module konnte ein Wirkungsgrad von 95,2% bei einer Schaltfrequenz von $f_{SW} = 2.01$ MHz sowie einer Ausgangsleistung von $P_{Out} = 5,6$ kW erzielt werden. Vorherige Aufbauten mit MOSFETs im SOT-227 Gehäuse erreichten lediglich 94.1% bei 1,32 MHz und 3,3 kW.

Development of highly efficient high frequency inverters with silicon carbide power modules

Fabian Denk, Karsten Hähre, Rainer Kling, Wolfgang Heering
Karlsruher Institut für Technology (KIT) - Lichttechnisches Institut (LTI), Engesserstr. 13,
76131 Karlsruhe, Germany, fabian.denk@kit.edu

Research issue

High frequency (HF) inverters with output frequencies above 2 MHz are necessary for the efficient operation of inductive electrodeless gas discharge lamps. Because of the usually used silicon (Si) semiconductors, efficient inverters can only be realized for small lamp power. Therefore, in this work we present the development of highly efficient HF inverters based on silicon carbide (SiC) power transistors for inductive high power lamps.

State of science/technology

HF inverters for induction lamps with Si FETs are available on the market only up to a lamp output of 185 W. However, this performance is insufficient for many technical UV applications. The there used conventional UV lamps have partially poorer efficiencies, lower power densities and a shorter lifetime.

Research hypothesis

To use electrodeless UV lamps in technical applications with high radiation levels, efficient MHz inverters with an output power of several kW have to be designed. Currently, this can only be realized by the use of SiC transistors. However, for applications in the MHz range the usually established 3-pin TO-247 as well as the 4-pin SOT-227 packages are not perfectly suited. Therefore, in cooperation with the IXYS Semiconductor GmbH phase-leg modules with 25 mΩ SiC MOSFETs in SMPD housing have been developed. With this modules high frequency inverters with an efficiency of more than 95% and up to 10 kW output power are now possible.

Experimental setup

The experimental setup consists of a resonant half-bridge inverter with a series resonant tank (C_{res} and L_{res}), to guarantee zero voltage switching, a load resistor R_L as well as the snubber capacitor (C_P), to minimize the turn-off losses. The schematic diagram of the experimental setup can be seen in Figure 1.

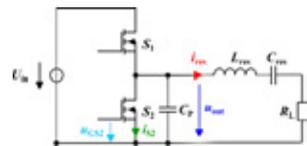


Figure 1: Schematic diagram of the half-bridge inverter with C_P , L_{res} and C_{res} as well as R_L .

Results in comparison with previous findings

With the half-bridge inverters based on the SMPD - SiC modules an efficiency of 95.2% at a switching frequency of $f_{sw} = 2.01$ MHz and an output power of $P_{out} = 5.6$ kW could be achieved. Previous constructions with MOSFETs in SOT-227-4 housing reached only 94.1% at 1.32 MHz and 3.3 kW.

Entwicklung von hocheffizienten Hochfrequenz-Wechselrichtern mit SiC-Power-Modulen

*Fabian Denk, Karsten Hähre, Rainer Kling und Wolfgang Heering,
Karlsruhe Institute of Technology (KIT) – Light Technology Institute (LTI)
Engesserstr. 13, 76131 Karlsruhe, Germany, E-Mail: fabian.denk@kit.edu*

Zusammenfassung / Summary

In dieser Arbeit präsentieren wir die Entwicklung eines resonanten Mittelfrequenzwechselrichters mit ISOPLUS SMPD SiC-MOSFET Halbbrückenmodulen zum Betrieb von induktiven Plasmen. Diese Module kombinieren hervorragende thermische Eigenschaften mit ausgezeichnetem Schaltverhalten bis in den MHz-Bereich. Im ersten Schritt wurde eine SPICE Simulation eines Halbbrückenwechselrichters mit einem SMPD Modul sowie mit diskreten SiC-MOSFETs in TO-247-Gehäusen durchgeführt. Dabei waren die Halbleiterverluste mit den diskreten Bauteilen 2,5-mal höher als die mit den SMPD Modulen. Im zweiten Schritt wurde ein Wechselrichter mit dem Modul aufgebaut. Ein Kurzschlussstest und Effizienzmessungen mit einer ohmschen Last zeigten das ausgezeichnete Schaltverhalten des SMPD Moduls im MHz-Bereich und Wirkungsgrade $> 95\%$, bei $f_{SW} = 2,01$ MHz und $P_{out} = 5,6$ kW.

1 Einleitung

Siliziumkarbid- (SiC-) Leistungshalbleiter ermöglichen es Mittelfrequenzwechselrichtern, höhere Ausgangsleistungen und Wirkungsgrade zu erreichen. Für bestimmte industrielle Anwendungen, beispielsweise induktiv gekoppelten Plasmen, werden Mittelfrequenzwechselrichter benötigt, welche Ausgangsleistungen bis zu 10 kW im MHz-Bereich liefern können [1]. In diesem Fall sind nur weichschaltende Topologien anwendbar [2]. Das am weitesten verbreitete Gehäuse für 1200 V-Transistoren ist das dreipolige TO-247 Gehäuse. Dieses Gehäuse verfügt über ausgezeichnete thermische Eigenschaften, zeigt aber relativ schlechtes Schaltverhalten. Dies kann mit den langen Anschlussbeinen mit hohen parasitären Induktivitäten sowie der großen parasitären Koppelkapazität zwischen dem rückseitigen Drain-Kontakt und dem Kühlkörper begründet werden. Somit ist es für MHz-Anwendungen ungeeignet. Um gutes Schaltverhalten und gute thermische Eigenschaften zu kombinieren, wurde in Zusammenarbeit mit der IXYS Semiconductor GmbH ein SiC-MOSFET Halbbrückenmodul im IXYS ISOPLUS SMPD Gehäuse entwickelt und untersucht. Dieses ist in Abb. 1 gezeigt.

In vorhergehenden Publikationen [3]–[5] wurde gezeigt, dass Schaltfrequenzen im MHz-Bereich mit SiC-FETs im TO-247 Gehäuse bei kleiner und im SOT-227 Gehäuse bei mittlerer Ausgangsleistung realisierbar sind. Dabei kann das TO-247 bis $\sim 2,5$ MHz und das SOT-227 Gehäuse bis $\sim 1,5$ MHz eingesetzt werden. Ungeschickterweise verfügt sowohl das TO-247 Gehäuse als auch das SOT-227 Gehäuse über Durchsteckkontakte. Daher sind sie nicht für die automatisierte Bestückung geeignet. Deshalb ist das SMPD Gehäuse auch für kostensensible Massenproduktion eine geeignete Alternative.

Aufgrund der sehr kurzen Anschlussbeine sind sehr niederinduktive Schaltungen realisierbar. Das Modul hat eine Kommutierungsinduktivität von lediglich $L_{comm} = 5,5$ nH pro Halbbrücke. Die Gate-Source-Induktivität ist mit $L_{GS} = 10$ nH in der gleichen Größenordnung wie die

von TO-247 Gehäuse. Jedoch verbessert der zusätzliche Hilfs-Source-Anschluss das Schaltverhalten deutlich, da Rückkopplungen aus dem Leistungspfad wirkungsvoll unterdrückt werden. Zusätzlich isoliert das interne Direct-Copper-Bonding-Keramikssubstrat die Transistoren zuverlässig vom Kühlkörper.



Abb. 1: IYXS ISOPLUS-SMPD Halbbrückenmoduls [6].

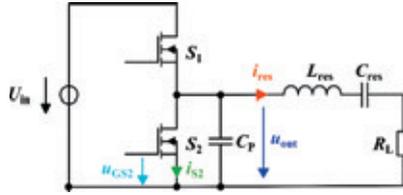


Abb. 2: Schaltplan des Halbbrückenwechselrichters mit dem Serienschwingkreis L_{res} und C_{res} , dem Entlastungskondensator C_P und dem Lastwiderstand R_L .

2 Simulation

Zum Vergleich der theoretischen Vorteile der SMPD Halbbrückenmodule gegenüber diskreten MOSFETs in TO-247 Gehäuse wurde eine SPICE (LTSpice IV, Linear Technology, USA) Simulation eines resonanten Halbbrückenwechselrichters mit Serienschwingkreis durchgeführt. Abb. 2 zeigt den Schaltplan des Wechselrichters (S_1 und S_2), mit dem Entlastungskondensator (C_P), dem Serienschwingkreis (L_{res} und C_{res}) und dem Lastwiderstand (R_L). Für die Simulation wurde ein äquivalentes SPICE-Modell eines 25 mΩ SiC-MOSFET Chips zusammen mit den gemessenen parasitären Komponenten L_{GS} , L_{comm} und C_{couple} des Halbbrückenmoduls sowie das Cree-Modell eines diskreten 25 mΩ SiC-MOSFET in TO-247 (C2M0025120D, Cree, USA) verwendet. Um die Simulation zu vereinfachen, wurde das induktiv gekoppelte Plasma durch eine ohmsche Last mit $R_L = 10 \Omega$ ersetzt. Der Serienschwingkreis wurde so dimensioniert, dass bei einer Schaltfrequenz von $f_{SW} = 2,5 \text{ MHz}$ eine Ausgangsleistung von $P_{out} = 5 \text{ kW}$ in den Lastwiderstand gespeist wird [7]. In Abb. 3 sind die resultierenden Kurvenverläufe der Simulationen gezeigt, in (a) für die diskreten Transistoren und in (b) für das SMPD Modul. Aufgrund der höheren Kommutierungsinduktivität zeigt die Drain-Source-Spannung der diskreten Transistors deutlich ausgeprägtere Überschwinger, nämlich $\hat{U}_{out}(\text{TO-247}) \approx 850 \text{ V}$ im Vergleich zu $\hat{U}_{out}(\text{SMPD}) \approx 810 \text{ V}$. Zudem haben die Schwingungen auf den Kurvenverläufen des Halbbrückenmoduls eine höhere Frequenz. Damit können diese leichter gefiltert werden kann. Basierend auf den simulierten Kurvenverläufen können die Halbleiterverluste berechnet werden. Hierbei werden die Vorteile des SMPD Moduls noch deutlicher. Die Halbleiterverluste der diskreten Halbbrücke ($P_{loss SC}(\text{TO-247}) = 41,2 \text{ W}$) sind 2,5-mal höher als die Halbleiterverluste der SMPD Halbbrücke, mit $P_{loss SC}(\text{SMPD}) = 16,6 \text{ W}$. Dies führt zu einer Halbleitereffizienz von $\eta_{SC}(\text{SMPD}) = 99,67\%$ beziehungsweise $\eta_{SC}(\text{TO-247}) = 99,17\%$ bei $P_{out} = 5 \text{ kW}$. Des Weiteren ist in den Kurvenverläufen der Gate-Source-Spannung deutlich der Vorteil des zusätzlichen Hilfs-Source-Anschluss ersichtlich. Durch die Unterdrückung der Rückkopplungen aus dem Leistungspfad können die FETs wesentlich exakter angesteuert werden.

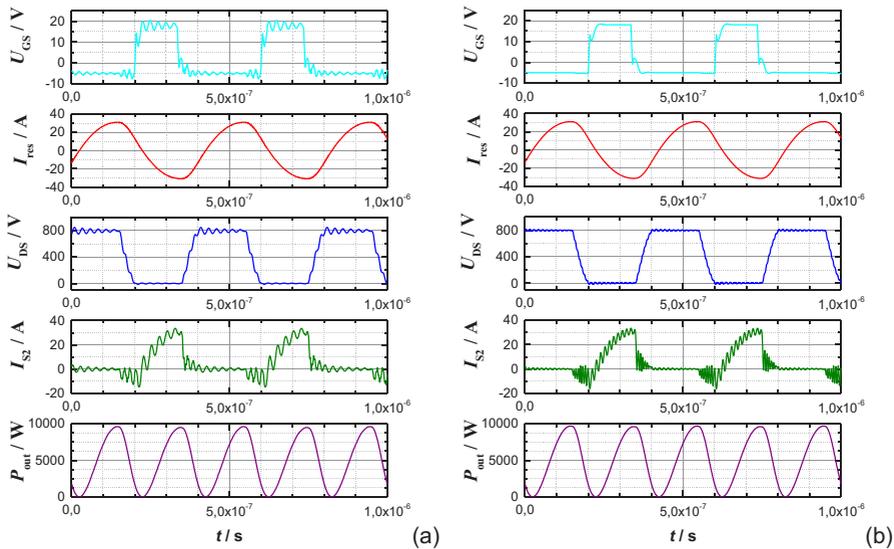


Abb. 3: Simulierte Strom-, Spannungs- und Leistungsverläufe des Halbbrückenwechselrichters mit diskreten SiC-MOSFETs in TO-247 Gehäuse in (a) und mit dem SMPD Modul in (b).

3 Versuchsaufbau

Der Serienschwingkreis, C_{res} und L_{res} im Schaltplan in Abb. 2, ist aus einer Folienkondensatorbank mit einer Kapazität von 5,5 nF und einer abgeschirmten Luftspule mit $L_{res} = 1,6 \mu\text{H}$ aufgebaut. Die Folienkondensatorbank ist in Abb. 5 zu sehen. Sie besteht aus 40 Polypropylen-Kondensatoren (FKP1, WIMA Spezialvertrieb elektronischer Bauelemente GmbH & Co. KG, Germany) in Reihenparallelschaltung. Abb. 4 zeigt eine Foto des modularen Prototypen des Halbbrückenwechselrichters mit einem unvergossenen Muster des ISOPLUS SMPD SiC-MOSFET-Moduls. Der Zwischenkreis besteht aus DC-Link-Folienkondensatoren (MKP1848610094P4, VISHAY, USA) und keramischen Glimmerkondensatoren (MC22FF152J-F, Cornell Dubilier Electronics, Inc., USA). Die isolierte Gate-Treiberversorgung wird durch Einsteckkarten übernommen. Außerdem sind die Gate-Treiber-ICs (IXDD614, IXYS corporation, USA), optische Empfänger, der Kühlkörper für das Modul (LA615024, Fischer Elektronik GmbH und Co. KG, Germany) sowie die Kühlkörper für den Gate-Treiber-ICs (ICKS25x25x12.5, Fischer Elektronik GmbH & Co. KG) zu sehen.

Der Messaufbau besteht aus einem Oszilloskop mit hoher Bandbreite (RTO 1044, 4 GHz, 20 GSa/s, Rohde & Schwarz, Deutschland) zur Bestimmung der Gate-Source- und der Drain-Source-Spannung sowie des Source-Stroms des Transistors S_2 , des Resonanz- und des Laststroms. Für die Spannungen U_{GS} und U_{DS} werden passive 10:1 (RT-ZP10, Rohde & Schwarz) beziehungsweise 1000:1 (RT-ZH11, Rohde & Schwarz) Tastköpfe eingesetzt. I_{res} , I_{Load} und I_{S2} werden mit Stromsensoren (6600 Wideband Current Monitor, Pearson Electronics, USA beziehungsweise CWT06, Power Electronic Measurements, UK) bestimmt. Die DC-Eingangleistung sowie die Gate-Treiberleistung werden mit Präzisions-Leistungsmessgeräten (LMG 310 beziehungsweise LMG 95, ZES ZIMMER Electronic Systems GmbH, Germany) gemessen. Die Wärmebilder werden mit Hilfe einer Infrarotkamera

(i50, FLIR Systems, Germany) erfasst. Die Kühlkörpertemperatur wird über Widerstandsmessung eines NTCs (B57703M703, EPCOS AG, Germany) bestimmt. Der Widerstand des NTCs wird über Vierdrahtmessung mit Hilfe eines Multimeters (M3500A, Picotest, USA) erfasst.



Abb. 4: Foto des Halbbrückenwechselrichters mit dem SMPD Modul, dem Modulkühlkörper, den Gate-Treiber-ICs mit dazugehörigem Kühlkörper, der Gate-Treiber-Versorgungen und dem DC-Zwischenkreis.



Abb. 5: Foto des Resonanzkondensators C_{res} , bestehend aus Polypropylen-Kondensatoren in Reihenparallelschaltung mit einer Gesamtkapazität von 5,5 nF.

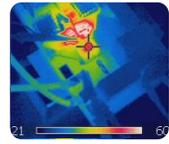


Abb. 6: Wärmebild des Wechselrichters beim 6 kVA Betriebspunkt.

4 Messergebnisse

Die gemessenen Kurvenverläufe eines Kurzschluss-tests bei einer Eingangsspannung von 800 V, einer Schaltfrequenz von 2,53 MHz und einem Resonanzstrom von 19 A sind in Abb. 7 zu sehen. Unter diesen Betriebsbedingungen speist der Wechselrichter eine Scheinleistung von $S_{out} = 6$ kVA in den Schwingkreis. Die DC-Eingangsleistung lag hierbei bei lediglich $P_{in} = 136$ W. Die Kühlkörpertemperatur des SMPD Moduls erhöht sich um $\Delta T_{HS} = 10$ K. Mit einem Kühlkörperwärmewiderstand von $R_{th HS} = 0,175$ K/W können die Halbleiterverluste zu $P_{loss SC} \approx 60$ W berechnet werden. Eine Wärmebild des Wechselrichters bei diesem Betriebspunkt ist in Abb. 6 zu sehen. Dass die Halbleiterverluste beinahe vier Mal so groß sind, als auf Basis der Simulation angenommen, kann mit den Durchlassverlusten der Body-Dioden begründet werden. Diese steigen aufgrund der im Kurzschlussbetrieb wesentlich längeren Freilaufdauer. Mit der Annahme, dass die restliche Verlustleistung in den passiven Komponenten des Schwingkreises anfällt, lassen sich diese zu 76 W abschätzen.

Anschließend wurde der Wechselrichter mit einem Lastwiderstand von 5 Ω betrieben. Während diesen Messungen wurde der in Abb. 2 gezeigte Schaltplan durch einen Transformator zur galvanischen Trennung zwischen dem Schwingkreis und dem Lastwiderstand erweitert. Die gemessenen Kurvenverläufe dieses zweiten Tests sind in Abb. 8 gezeigt. Hier wird der Wechselrichter mit einer Eingangsspannung von 800 V bei einer Schaltfrequenz von 2,01 MHz betrieben. Unter diesen Bedingungen speist die Halbbrücke einen Resonanzstrom von 31,84 A in den Schwingkreis. Dies ergibt eine Scheinleistung von 10 kVA im Schwingkreis und eine Wirkleistung von 5,6 kW im Lastwiderstand. Aus den Kurvenverläufen in Abb. 7 und Abb. 8 kann man entnehmen, dass das SMPD SiC-MOSFET Halbbrückenmodul ausgezeichnet bei Schaltfrequenzen über 2 MHz in Verbindung mit 800 V Eingangsspannung und Ströme von mehr als $I_{res} = 45$ A eingesetzt werden kann.

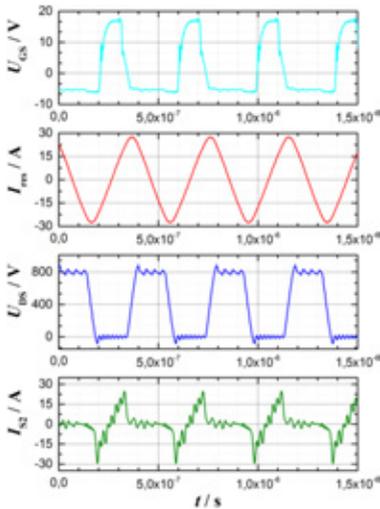


Abb. 7: Gemessene Kurvenverläufe des Resonanzwechselrichters während des Kurzschlussbetriebs mit $U_{in} = 800 \text{ V}$, $I_{res} = 19 \text{ A}$, $f_{sw} = 2.53 \text{ MHz}$ und $S_{out} = 6 \text{ kVA}$

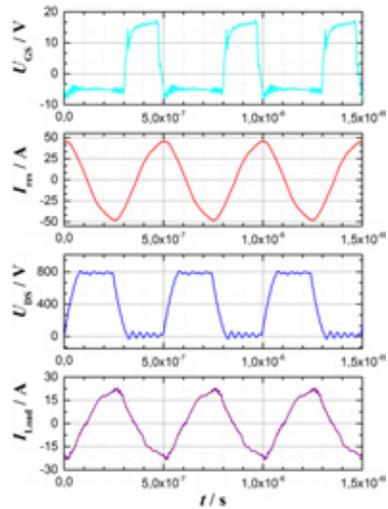


Abb. 8: Gemessene Kurvenverläufe des Resonanzwechselrichters beim Betrieb mit einem 5Ω Luftwiderstand mit $U_{in} = 800 \text{ V}$, $I_{res} = 31.84 \text{ A}$, $f_{sw} = 2.01 \text{ MHz}$, $S_{out} = 10 \text{ kVA}$ und $P_{out} = 5.6 \text{ kW}$

Der Wechselrichterwirkungsgrad in Abhängigkeit der in den Lastwiderstand gespeisten Ausgangsleistung ist in Abb. 9 zu sehen. Für die Messungen wurde der Wechselrichter mit einer konstanten Schaltfrequenz von $2,01 \text{ MHz}$ betrieben und die Eingangsspannung von $U_{in} = 300 \text{ V}$ bis 800 V erhöht. Daraus geht hervor, dass Wirkungsgrade von über 95% bei $f_{sw} = 2,01 \text{ MHz}$ und $P_{out} = 5,6 \text{ kW}$ mit diesem Resonanzwechselrichter erreicht werden können. Zur weiteren Steigerung der Ausgangsleistung kann der modulare Halbbrückenwechselrichters zu einer Vollbrücke erweitert werden.

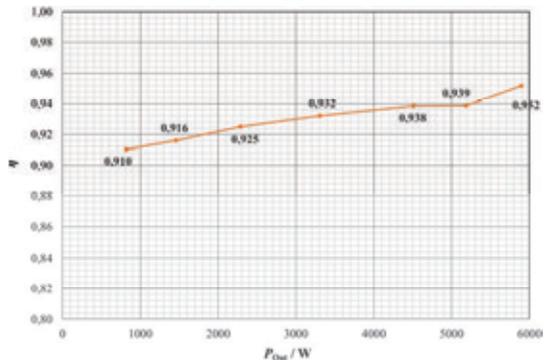


Abb. 9: Gemessener Wechselrichterwirkungsgrad η als Funktion der in R_L gespeisten Ausgangsleistung P_{out} .

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit präsentieren wir die Entwicklung eines resonanten Mittelfrequenzwechselrichters mit ISOPLUS SMPD SiC-MOSFET Halbbrückenmodulen. Diese Module kombinieren hervorragende thermische Eigenschaften mit ausgezeichnetem Schaltverhalten bis in den MHz-Bereich. Dieses Schaltverhalten wird durch den zusätzlichen Hilfs-Source-Anschluss sowie die äußerst geringen parasitären Induktivitäten und Kapazitäten möglich. Im ersten Schritt wurde eine SPICE Simulation eines resonanten Halbbrückenwechselrichters mit Serienschwingkreis zum einen unter der Verwendung eines SMPD Moduls und zum

anderen mit diskreten SiC-MOSFETs in TO-247-Gehäuse durchgeführt. Dabei waren die Halbleiterverluste der diskreten Bauteile 2,5-mal höher als die des SMPD Moduls. Im zweiten Schritt wurde der simulierte Halbbrückenwechselrichter mit SMPD Modul und Serienschwingkreis aufgebaut. Das durch die Simulation prognostizierte ausgezeichnete Schaltverhalten wurde bei einem Kurzschlussstest des Prototyps bei einer Schaltfrequenz von 2,53 MHz mit einer Eingangsspannung von 800 V und einem Resonanzstrom von 19 A überprüft und bestätigt. In diesem Betriebspunkt, bei welchem eine Blindleistung von 6 kVA in den Schwingkreis gespeist wird, lagen die Halbleiterverluste lediglich bei etwa 60 W. Anschließend wurde der Wechselrichter mit einem 5 Ω Lastwiderstand betrieben. In diesem Test konnte eine Effizienz von > 95% erzielt werden, bei einer Schaltfrequenz von 2,01 MHz und einer Ausgangsleistung von 5,6 kW.

6 Anmerkung

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Förderprojektes Modulare Mittelfrequenz Prozessstromversorgung mit Siliziumkarbid Leistungshalbleiterschaltern gefördert.

- [1] L. R. Nerone, "Class-D Converter for Electrodeless Lighting," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 12, no. 3, pp. 507–516, 1997.
- [2] D. H. Park, H. J. Kim, K. Y. Joe, and M. H. Kye, "Zero-Voltage-Switching High Frequency Inverter for Electrodeless Fluorescent Lamp," in *Power Electronics Specialists Conference*, 1998, pp. 2035–2040.
- [3] K. Haehre, T. Lueth, F. Denk, R. Kling, and W. Heering, "Normally-on SiC-JFET Cascode under ZVS conditions," in *Power Conversion and Intelligent Motion Conference (PCIM Europe 2015)*, 2015.
- [4] K. Haehre, R. Kling, and W. Heering, "Design of a soft-switching inverter operating in the MHz-range based on SiC MOSFETs," in *Power Conversion and Intelligent Motion Conference (PCIM Europe 2013)*, 2013.
- [5] F. Denk, K. Haehre, W. Heering, and R. Kling, "Minibloc SiC-MOSFET in a Resonant Half-Bridge Inverter Operating in the MHz-Range," in *Power Conversion and Intelligent Motion Conference (PCIM Europe 2015)*, 2015.
- [6] "[http://ixapps.ixys.com/.](http://ixapps.ixys.com/)" [Online]. Available: http://ixapps.ixys.com/images/sub_images/ea89c642-3fd5-46e3-9f6f-b02b34f576fd.jpg.
- [7] M. K. Kazimierczuk and D. Czarkowski, *RESONANT POWER CONVERTERS*, 2nd Editio. New York: John Wiley & Sons, 2011.

Multi-channel spot light engine for highest light quality

Dr. Herbert Weiß, Dr. Farhang Afshar, Dr. Krister Bergenek, Meik Weckbecker
OSRAM GmbH

Issue

Light quality, efficacy and system costs of LED lighting have much improved over the last years making it competitive to traditional lighting technology. Technical barriers, increased complexity and additional costs still prevent full exploitation of properties and applications that go far beyond those of conventional light sources, potentially improve consumer satisfaction and allow further market penetration. LED light engines which combine both highest efficacy and highest light quality or even tunability are not found on the market. This is mainly due to spectral, optical and thermal trade-offs which have to be resolved. Most challenging in this regard are miniaturized spot light engines with densely packed components. A system approach is required which aims to optimize functionality, makes complexity manageable and reduces total cost of ownership. In addition to highly efficient components an integrated sensor based control is necessary to maximize efficiency and light quality.

Aim

Within the project InnoSYS (funded by the BMBF) novel lighting system components are investigated. Efficiency of an entire lighting system will be much enhanced by both highest efficiency and sensor based intelligence on module level. Focus of this presentation is a highly efficient compact spot light engine that provides highest efficacy and highest light quality in terms of colour quality, control, mixing and tuning as well as highest luminance.

Description of the innovation/»best practice«

To fulfill the targeted spot light requirements a 3-channel light kernel is needed. The spectral composition is optimized for efficacy, colour rendering, colour gamut and tunability. A combination of optical and electronic feedback control provides stable colour temperature independently of binning, ambient conditions and aging.

Level of realization

First table demonstrators of light kernels, an entire light engine system as well as a spot light luminaire are already available.

Multi-channel spot light engine for highest light quality

Dr. Herbert Weiß, Dr. Farhang Afshar**, Dr. Krister Bergenek**, Meik Weckbecker***

OSRAM GmbH

**Parkring 33, 85748 Garching, Germany*

***Wernerwerkstraße 2, 93049 Regensburg, Germany*

Summary

We present a tunable compact spot light engine that provides both highest efficacy and highest light quality for spot lighting applications. It is discussed what light quality means for this kind of light engine. Specifications of spot light engines which are found on the market are reviewed. Finally, properties and measurement results of a spot light engine are presented which is developed within the project InnoSYS [1] and targets all specifications required for such a light engine.

1 Introduction

Light quality, efficacy and system costs of LED lighting have much improved over the last years making it competitive to traditional lighting technology. Technical barriers, increased complexity and additional costs still prevent full exploitation of properties and applications which go far beyond those of conventional light sources, potentially improve consumer satisfaction and allow further market penetration. LED light engines which combine both highest efficacy and highest light quality or even tunability are not found on the market. This is mainly due to spectral, optical and thermal trade-offs which have to be resolved. Most challenging in this regard are miniaturized spot light engines with densely packed components. A system approach is required which aims to optimize functionality, makes complexity manageable and reduces the total cost of ownership. In addition to highly efficient components, an integrated sensor based control is necessary to maximize light quality. Within the project InnoSYS (funded by the BMBF [1]) novel lighting system components are developed. The target of the project is to considerably enhance the efficiency and the light quality of an entire lighting system by both highest efficiency and sensor based intelligence on module- and luminaire-level. We present a highly efficient compact spot light engine that provides highest efficacy as well as highest light quality.

2 Light Quality Requirements for Spot Light Engines

Since LEDs have entered general illumination there is a debate about light quality, colour rendering metrics and the right way of light quality quantification. This debate is not only about an improved version of the Colour Rendering Index, CRI, which describes colour fidelity but also about the need for an additional colour quality metric which describes the range of colours of a light source, i.e. its colour gamut, and resulting saturation (see e.g. [2]). Meanwhile there is a consensus that such a set of two indices is necessary in order to describe the colour quality as it is perceived by humans in all its entirety. OSRAM already supports using a combination of CRI and the gamut index FCI - Feeling of Contrast Index [3]. OSRAM started to offer a shop and retail LED module optimized to achieve both, optimal CRI and FCI values in 2015 [4].

However, light quality means a lot more for spot light engines than just optimized colour fidelity and gamut. Those light engines are designated for use in luminaires which provide accent lighting. Objects are to be highlighted in a way to draw attention to them, to make colours of the object “pop” and stand out or to create a contrast to a uniformly illuminated surrounding. The illuminance on the object needs to be high enough to reach the desired effect. These application related requirements lead to technical challenges.

Firstly, in order to individually optimize for the best fit to the illuminated object or surrounding, a colour tunable light source is required. That means that more than just one colour channel is needed. Two-channel solutions would enable to continuously move across different correlated colour temperatures (CCT). However, the line of movement in colour space when tuning CCT is linear and therefore does not follow the Planckian black body curve. Furthermore, there is no possibility to optimize the spectrum for highest fidelity and gamut index over the CCT tuning range. Hence, at least three colour channels are required.

If multiple colours are employed, sufficient colour mixing is essential. Dedicated luminaire optics might provide acceptable colour mixing on luminaire system level even if mixing on light engine level is insufficient. However, if a light engine already comes with sufficient light mixing it is easily integrated and universally used with less effort in luminaire design.

A matter of debate here is the right way to measure colour mixing and what is eventually perceived as sufficient colour homogeneity of light projected onto a white surface.

Another consequence which arises from the use of multiple colour channels in a light engine is the need for colour control which guarantees a constant overall colour of the mixed light. I.e. the right proportion of individual colours, independently of ambient condition or ageing of components. This implies a sensing with feedback and colour channels which can be individually addressed.

Finally, in order to create a high center beam candlepower of a spot light luminaire which provides the desired punch effect in accent lighting the light engine must provide a high luminance. This implies the optimization of two factors which hardly go together, namely the miniaturization of the light emitting surface (LES) and the maximization of the luminous flux emitted by the light source. Small light engines with maximized luminance also support luminaire design freedom, especially slim designs which would not have been possible with halogen or HID light sources. Highest efficacy of the light source is a definite plus to fulfill all these requirements in a single light engine and obviously promotes sustainability and market competitiveness.

3 Market Availability

Several spot light engines already exist on the market, which target high level spot lighting applications as described above. A representative summary of product characteristics is given in Tab. 1. All these products are designed for high color rendering, CRI > 90. No other colour quality metrics like a gamut index is given in the manufacturer data sheets. The light engines are tunable in CCT in a range of at least 2700K – 5700K. Most of them use at least three colour channels which enables following a non-linear track in colour space on or near to the Planckian black body curve. Two products use only two channels and thus do not have this possibility. This restricts them to applications with less demanding colour accuracy requirements only. Products from two manufacturers (3a-c and 4) listed in Tab. 1 provide color control by monitoring LED temperatures by NTC (Negative Temperature Coefficient) resistors and additional optical sensing. Data sheet specifica-

tions of these products indicate maximum deviations of the target colour point of < 2 and < 3 MacAdam ellipses, respectively, at any point over lifetime.

Tab. 1: Properties of spot light engines available on the market (as of June 2016) and targeting high level spot lighting applications. Data are taken from manufacturer's data sheets. Colours give an indication of suitability for high quality spot lighting applications. Note that data are specified for different board temperatures and are thus not directly comparable.

Product	Luminous Flux	CCT	Efficacy, lm/W	CRI	LES, mm	# Colour Channels	Color Control	Color Mixing
1	1840-2170 lm	2700K ... 5700K	71 - 84	93 - 97	17,2	2	No	No
2a	2050 lm	2700K ... 6500K	65	> 90	23	3	?	No
2b	1350 lm	2700K ... 6500K	61	> 90	19	3	?	No
3a	2000 lm	1650K ... 8000K	67	> 90	12,6	5	Yes	No
3b	3000 lm	1650K ... 8000K	60	> 90	19,7	5	Yes	No
3c	5000 lm	1650K ... 8000K	83	> 90	31,6	5	Yes	No
4	2500 lm	2700K ... 6500K	80	> 90	23	2	Yes	partial
5	2500 lm	2700K ... 6500K	85	> 90	28	3	?	No

Color mixing is provided by none of all products. Only one product provides partial colour mixing which eases optical requirements for the luminaire but is not a care-free solution to be readily used by the design engineer. Apart from product 3a all light engines have a moderate luminance of $\leq 3 \times 10^6$ cd/m². Product 3a which provides about 5×10^6 cd/m² produces however too low a luminous flux to be used in a luminaire with high enough punch to create the desired highlighting effect. This is also true for all products listed in Tab. 1 that have a luminous flux below 3000 lm. They can only be used for short-range illumination but not for accentuating larger objects which are far away from the luminaire. The only product which provides a sufficiently high luminous flux (3c) is however rather large in diameter and has a low luminance which prevents good luminaire designs with high center beam candlepower and acceptable luminaire dimensions.

Many of these shortcomings may be eased by high light engine efficacy, achieved by highly efficient LEDs, good thermal management and low losses in optical paths. However, light engine requirements described above lead to a very high level of complexity and to inevitable trade-offs. Efficacy is thus generally low compared to standard light engines for downlight or area lighting luminaires. The efficacy range of 60 – 85 lm/W of the light engines in Tab. 1 is not sufficient for high luminous flux and high luminance at the same time and does not allow for small sized luminaire designs.

In summary, the ideal spot light engine is not yet available. In order to address this issue OSRAM aims to develop a next generation spot light engine which fully qualifies for spot lighting applications. This work is carried out as a main pillar of the project InnoSYS [1].

4 The Perfect Spot Light Engine

The following table gives the target specifications of the InnoSYS spot light engine.

Tab. 2: Target data of the spot light engine developed in InnoSYS for a board temperature $T_{board} = 80^\circ\text{C}$.

Luminous Flux	CCT	Efficacy	CRI	LES	Color Control	Color Mixing
3000 lm	2700K ... 6500K	150 lm/W	90	19 mm	Yes	Yes

The light engine efficacy is specified with regard to a spot light luminaire which should reach an overall system efficacy of 130 lm/W. Three colour channels are chosen which are optimized for highest colour rendering and luminous efficiency over the entire CCT tuning range 2700 – 6500 K. The resulting triangle in colour space is shown in Fig. 1. A CRI of 90 and a FCI of up to 132 are achieved. FCI can be driven even higher, if special colour contrast requirements need to be fulfilled, by making use of the 3-channel tunability and adjusting the xy colour point slightly below the Planckian black body curve.

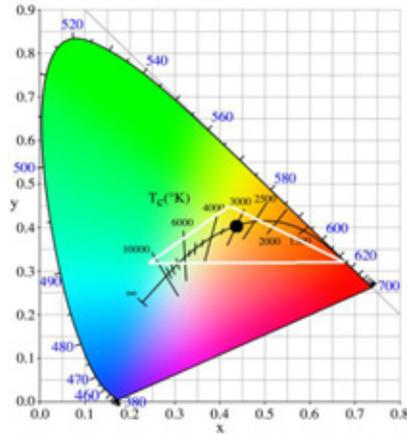


Fig. 1: Colour gamut of the 3-channel spot light engine shown by the white triangle in the CIE 1931 colour space.

The three colours are mixed on light engine level. This provides the advantage that light is mixed already at the source where light mixing optics can be smallest and most efficient. The colour mixing is realized by a combination of a volume diffuser cast and a highly reflective LED substrate. Reflectivity, thickness and diffuser strength are optimized for best light mixing and light extraction. Colour mixing is evaluated based on a metric which quantitatively describes color uniformity of a spot light based on human eye perception of color differences as shown in Fig. 2 [5]. For evaluation, the light engine is integrated into a spot light luminaire with a parabolic unfaceted reflector and the spot light projected onto a white surface is classified. A U_{sl} value of 32, which translates to a semantic description between “excellent” and “good,” is achieved.

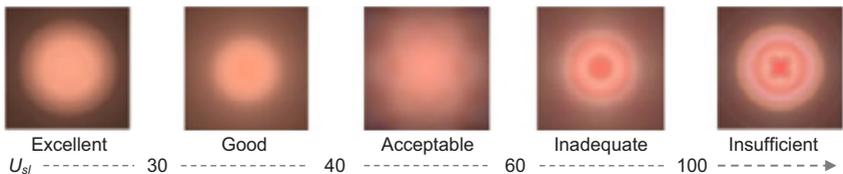


Fig. 2: Colour mixing acceptance metric according to [5] exemplified by sample images of spot lights projected onto a white surface. The characteristic measure is U_{sl} , a merit function which takes into account hue, contrast, chroma, shape, axial symmetry and radial symmetry.

An optical feedback control is developed in order to be able to guarantee a stable colour temperature independently of LED binning, ambient conditions and aging. A colour sensor is used for this purpose. It is placed directly on the light engine and special care is taken that the sensor detects only mixed white light. Colour control is therefore no more a concern in luminaire development but already provided by the light engine. First tests show, that CCT is kept constant within < 1 MacAdam ellipse, when the board temperature changes from 30°C to 60°C (Fig. 3).

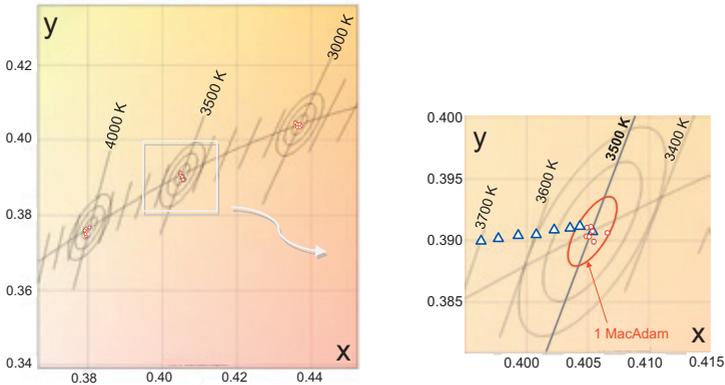


Fig. 3: Colour coordinates for different CCT settings. Data points at 3000 K, 3500 K and 4000 K are taken at different board temperatures $30^{\circ}\text{C} \dots 60^{\circ}\text{C}$. Colour variations are < 1 MacAdam. Right: Zoom into CCT = 3500 K and data in blue triangles added which show xy variations without colour control.

The efficacy of the spot light engine is 110 lm/W at $T_{board} = 80^{\circ}\text{C}$ and CCT = 3000 K. It is thus much higher than the maximum efficacy of 85 lm/W of products available on the market (Tab. 1) but does not fulfill the requirements in Tab. 2. If active cooling is applied the board temperature can be reduced to $T_{board} = 33^{\circ}\text{C}$ resulting in an increased light engine efficacy of 127.5 lm/W . In order to further enhance the efficacy and reach the target requirements only the most efficient LEDs will be used. Furthermore, the number of chips in each color channel as well as mixing optics will be optimized for additional efficacy gains. The luminance of the spot light engine is $3.4 \times 10^6 \text{ cd/m}^2$, which together with a luminous flux of 3000 lm and the high efficacy allows designing small-sized luminaires with enough candlepower for high quality spot lighting applications.

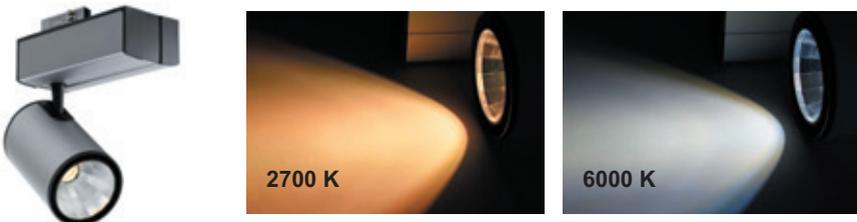


Fig. 4. Catalogue luminaire SITECO Lunis[®] SL-T [6]. Right: Luminaire equipped with the new tunable light engine and set to two different colour temperatures, CCT = 2700 K and CCT = 6000 K.

A first demonstrator of the spot light engine integrated into a spot light luminaire is shown in Fig. 4. The catalogue luminaire Lunis® SL-T from SITECO [6] is modified to accommodate the new light engine. Depending on the luminaire optics (broad or narrow beam optics) and thermal management (active or passive cooling) which are actually used, the overall luminaire has an efficacy of 95 lm/W...110 lm/W. This efficacy will be further enhanced with current efforts to increase light engine efficacy.

5 Conclusion

Light quality of spot light engines does not only imply colour quality but also colour tuning, colour control, colour mixing and highest luminance. A market review showed that commercially available spot light engines provide good colour rendering but do only partially fulfill all other requirements for high level spot lighting applications.

A spot light engine is presented which targets all these requirements and provides much improved efficacy and light quality performance. First samples demonstrate very good colour rendering and colour mixing on light engine level as well as colour control of < 1 MacAdam with temperature variation. Light engine efficacy is 110 lm/W and will be further enhanced by improvements of LED chip efficiency, chip arrangement and colour mixing optics on the light engine.

Acknowledgement

We gratefully acknowledge financial support from the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the funding initiative "Intelligente Beleuchtung" (FKZ 16ES0267K).

References

- [1] OSRAM GmbH (2015): Press Release. Forschungsprojekt zur Zukunft der Leuchte gestartet.
http://www.osram.de/osram_de/presse/pressemeldungen/fachpresse/2015/forschungsprojekt-zur-zukunft-der-leuchte-gestartet/index.jsp, retrieved 2016-06-26.
- [2] M.S. Rea, J.P. Freysinnier-Nova, "Color rendering: A tale of two metrics," *Color Research and Application*, 33(3), 192-202 (2008).
- [3] K. Hashimoto, T. Yano, M. Shimizu, Y. Nayatani, "A New Method for Specifying Color Rendering Properties of Light Sources Based on Feeling of Contrast," *Color Research & Application*, 32(5), 361-371 (2007).
- [4] OSRAM GmbH (2016): Products. PrevaLED Core Style.
http://www.osram.de/osram_de/produkte/led-technologie/light-engines-und-module/light-engines-und-module-fuer-strahler%2c-downlights-und-wandleuchten/prevaled-core-style/index.jsp, retrieved 2016-06-26.
- [5] A. Teupner, K. Bergeneck, R. Wirth, P. Benitez, J. C. Miñano, "Color uniformity in spotlights optimized with reflectors and TIR lenses," *Opt. Express* 23, A118-A123 (2015).
- [6] SITECO GmbH (2016): Products. Lunis® SL-T.
http://www.siteco.de/de/de_de/produkte/katalog-innenleuchten/chapter/11400/category/14152/family/14145/variant/15252.html, retrieved 2016-06-26.

Herausforderungen beim Austausch von weißen LEDs in einer Applikation

Andreas Steinbach, LED Linear GmbH

Problemstellung

Bis heute stellt der Austausch von LED Modulen in einer bestehenden Applikation eine Herausforderung für Lichtplaner und Betreiber dar. Werden LEDs in einem bestehenden Beleuchtungskonzept ersetzt, ergeben sich oft unterschiedlich korrelierte Farbtemperaturen (=CCT), Farborte oder Helligkeiten. Bei dem Herstellungsprozess einer LED ist es dem Hersteller bisher vorbehalten, die gleiche Helligkeit über jede LED zu gewährleisten oder eine von ihm vorgegebene Streuung um den exakten Farbort innerhalb der CIE-Normfarbtafel aus der Serienproduktion heraus zu liefern. Dadurch sind LEDs nur mit unterschiedlichen sogenannten Binnings (engl. für „Klasseneinteilung“) erhältlich. Farbort, Vorwärtsspannung und Lichtstrom können von Charge zu Charge variieren, was zusätzliche Sortierungen der LEDs notwendig macht um eine zukunftssichere Beleuchtungsapplikation sicher zu stellen.

Ziel

Zielstellung ist die dauerhaft gleichbleibende Qualität der Beleuchtung, auch bei einem Austausch bestehender LED-Module, in der Applikation garantieren zu können. Hierzu sollten LED-Module mit nahezu identischen elektrischen und lichttechnischen Eigenschaften verwendet werden. Eine hohe Farbortstabilität und ein hoher Lumenstromerhalt über die Betriebsdauer sind qualitative Merkmale von LED-Modulen auf die ein großer Wert gelegt werden sollte.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Hersteller von LED-Lampen & Leuchten sollten ein möglichst streng selektiertes Binning hinsichtlich Farbort, Vorwärtsspannung und Lichtstrom der eingesetzten LEDs verwenden. Hierdurch können Degradationseffekte wie Farbortverschiebung und Lumenstromdegradation über die Betriebszeit der Beleuchtungsanlage minimal bzw. gleichförmig gehalten werden. Das strenge Sortieren der produzierten LEDs nach Bin's ist speziell bei weißen LEDs von großer Bedeutung um eine homogene und konstante Qualität des Lichts gewährleisten zu können. Es vereinfacht den Austausch von bestehenden Modulen da diese somit über nahezu identische, physikalische Eigenschaften verfügen.

Realisierungsgrad

Um dem Anwender und Planer die Vergleichbarkeit von LED-Modulen verschiedener Hersteller oder gleichen Modulen verschiedener Generationen übersichtlich bereitzustellen, wurde nach DIN EN 62717 der erweiterte photometrische Code eingeführt. Dieser gibt, zumindest in gewissem Maße, Aufschluss über lichttechnische Größen der verwendeten LEDs wie Farbwiedergabeindex, korrelierter Farbtemperatur, MacAdams-Ellipsen und Lumenstromdegradation. Um genauere Daten zu den verwendeten LED-Modulen zu erhalten ist es bis heute unumgänglich sich beim Hersteller der Lampe/Leuchte oder der LED zu informieren.

Challenges of replacing white LEDs in existing applications

Andreas Steinbach, LED Linear GmbH

Issue

Exchanging LED modules in existing applications is still challenging for lighting designers and clients. New LEDs often have a different correlated color temperatures (=CCT), chromaticity coordinates or luminous flux. Right now sorting LEDs to similar luminous flux levels or the exact chromaticity coordinates according to CIE is within the LED manufacturers hands. Therefore LEDs are just available within different binnings. Chromaticity, forward bias and luminous flux can vary from batch to batch. Additional LED sorting is vital in order to ensure future proof lighting applications.

Aim

The objective is to be able to deliver constant quality in lighting applications even when exchanging LED modules within the application is necessary. That would require the use of LEDs with almost identical electrical and photometric characteristics. This requires to focus on LEDs which ensure stable chromaticity values over time and be able to conserve their luminous flux.

Description of the innovation/»best practice«

LED fixture manufacturers should solely focus on LEDs which are strictly binned into very tight chromaticity, forward bias and luminous flux windows. That ensures low degradation effects in the entire system over time. This is especially critical in monochromatic white applications. Choosing the right LEDs from the very beginning eases the process of replacing modules over time as new modules should have very similar characteristics in comparison what was installed previously.

Level of realization

To give customers and designer a chance to compare different LED modules from different manufacturers or from different generations, DIN EN 62717 established an extended photometric code. This code at least sheds light on photometric values of the LEDs used like color rendering index, correlated color temperature and McAdams Ellipses and luminous flux degradation. To receive specific values about the LEDs used it is essential to contact the fixture or LED manufacturer.

Herausforderungen beim Austausch von weißen LEDs in einer Applikation

*Andreas Steinbach,
LED Linear GmbH
Pascalstraße 9, 47506 Neukirchen-Vluyn*

Zusammenfassung

Bis heute stellt der Austausch von LED Modulen in einer bestehenden Applikation eine Herausforderung für Lichtplaner und Betreiber dar. Werden LEDs in einem bestehenden Beleuchtungskonzept ersetzt, ergeben sich oft unterschiedlich korrelierte Farbtemperaturen (=CCT), Farborte oder Helligkeiten. Bei dem Herstellungsprozess einer LED ist es dem Hersteller bisher vorbehalten, die gleiche Helligkeit über jede LED zu gewährleisten, oder eine von ihm vorgegebene Streuung um den exakten Farbort innerhalb der CIE-Normfarbtafel aus der Serienproduktion heraus zu liefern. Dadurch sind LEDs nur mit unterschiedlichen sogenannten Binnings (engl. für „Klasseneinteilung“) erhältlich. Farbort, Vorwärtsspannung und Lichtstrom können von Charge zu Charge variieren, was zusätzliche Sortierungen der LEDs notwendig macht um eine zukunftssichere Beleuchtungsapplikation sicher zu stellen.

1 LED Binnings

Bis heute stellt der Austausch von LED Modulen in einer bestehenden Applikation eine Herausforderung für Lichtplaner und Betreiber dar. Werden LEDs in einem bestehenden Beleuchtungskonzept ersetzt, ergeben sich oft unterschiedlich korrelierte Farbtemperaturen (=CCT), Farborte oder Helligkeiten die zu einem sichtbaren Unterschied zwischen „alten“ und „neuen“ Modulen führen. Abbildung 1 zeigt den Unterschied: Durch den Austausch von LED- Modulen in der Voutenapplikation haben nicht alle Module die gleiche Lichtfarbe. Manche sind wärmer, andere kälter – das Lichtbild ist nicht harmonisch und inhomogen.



Abb. 1 Voutenapplikation mit unterschiedlichen Weißstönen

Ein Grund hierfür sind unter anderen die sogenannten Binnings oder auch Bin's (engl. für „Klasseneinteilung“) der LEDs. Bei der industriellen Herstellung von LEDs kommt es innerhalb verschiedener Produktionschargen zu Abweichungen der elektrischen und licht-technischen Eigenschaften. Durch verschiedene Variablen während des Herstellungsprozesses, ist quasi jede LED als ein Unikat mit spezifischen Eigenschaften hinsichtlich Vorwärtsspannung, Farbort und Helligkeit (=Lichtstrom) anzusehen, wie in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Das strenge Sortieren der produzierten LEDs nach Bin's ist speziell bei weißen LEDs von großer Bedeutung um eine homogene und konstante Qualität des Lichts gewährleisten zu können.

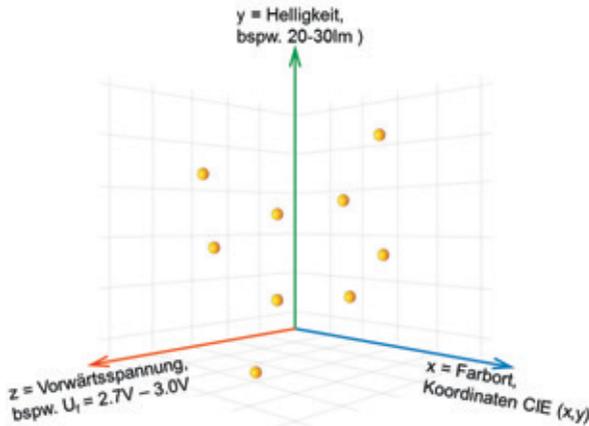


Abb. 2 3-Way binning of LEDs

1.1 Die lichtemittierende Konversionsschicht der LED

Ein Beispiel für eine produktionsbedingte, chargenübergreifende Variable hinsichtlich des Farbortes stellt die Anmischung der farbgebenden Phosphorkonversionsschicht dar, die in Verbindung mit dem blau-emittierenden Halbleiterkristall (=Chip) durch additive Farbmischung weißes Licht erzeugt, siehe Abbildung 3. Diese Leuchtstoffschicht beeinflusst den Farbort, die Farbwiedergabe und die CCT der LED. Je nach chemischer Zusammensetzung des Leuchtstoffs werden Farbtemperaturen beispielsweise von 2000K bis 6500K eingestellt.

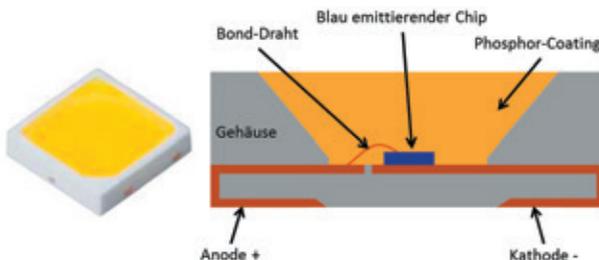


Abb. 3 Nichia SMD-LED, Phosphorkonversionsschicht

Die in der Phosphorschicht enthaltenen Farbteilchen können chargenbedingte Abweichungen aufweisen. Das voran beschriebene ist bereits beim Einkauf der LEDs oder der LED-Module zu beachten. Aber auch während der Betriebsdauer verändern sich Farbe und Helligkeit der Module durch Einwirkungen auf die Phosphorschicht. Diese Effekte erschweren in anspruchsvollen Applikationen das Erreichen absolut homogener CCT-Verteilungen mit den gleichen Weiß-/Farbtönen insbesondere nach dem Austausch von LED-Modulen.

1.2 Farbortverschiebung und Farbortstabilität

Ein Grund für die Veränderung des Farbortes während des Betriebs resultiert aus der Wärme die sich über die Zeit nicht unerheblich auf die Phosphorschicht auswirkt, wie in den LM-80-08 Berichten der LED Hersteller ersichtlich wird. Während der Betriebszeit, erfährt die Schicht eine natürliche Alterung, die sogenannte Degradation, welche sich auf die Farbzentren der enthaltenen Farbteilchen und somit auf den Farbort auswirkt. Die Änderung dieses Farbortes nennt man Farbortverschiebung oder auch „Color-Shift“ wobei die CCT der LED in der Regel in den kaltweißeren Bereich driftet. Bestimmt man diese Verschiebung auf den fest definierten Farbort der Referenz-LED (@ 2700K) eines Herstellers, spricht man von der Farbortstabilität. Die Daten geben Aufschluss darüber, welche Farbveränderung die LED in Abhängigkeit von der Betriebsdauer [h], der Ambient Temperatur [C°] und der Bestromung [mA] erfährt. Werte der Farbortverschiebung werden durch $\Delta u'v'$, welches eine andere Darstellung von CIE-Koordinaten darstellt, beziffert. Eine $\Delta u'v' = 0,001$ bedeutet einen Farbdrift um eine MacAdams Ellipse. Die Werte sind grundlegend dem LM-80-08 Report der betreffenden LED zu entnehmen, der u.a. die lichttechnischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Zeit betrachtet, wie zu sehen in Abbildung 4.

Data Set 1 : 55 °C, 65 mA

Actual Case Temperature [T _s]	55.0 °C
Actual Ambient Temperature [T _A]	54.2 °C
Drive Current [I _f]	65 mA
Measurement Current	65 mA

NOTES:

T_s and T_A were measured during initial setup.

TABLE 1-4
Chromaticity Shift

LED No.	Chromaticity Shift $\Delta u'v'$											
	0 h	500 h	1000 h	2000 h	3000 h	4000 h	5000 h	6000 h	7000 h	8000 h	9000 h	10000 h
n	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Avg.	0.0000	0.0006	0.0006	0.0006	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0008	0.0008	0.0008	0.0009
Med.	0.0000	0.0005	0.0006	0.0006	0.0007	0.0007	0.0008	0.0007	0.0007	0.0008	0.0008	0.0009
σ	0.0000	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Min.	0.0000	0.0004	0.0005	0.0005	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0007
Max.	0.0000	0.0008	0.0008	0.0008	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011

Abb. 4 Nichia LM-80-08 Report NFSL757G_R8000

Um die Farbortstabilität ermitteln zu können, wird die Farbortverschiebung $\Delta u'v'$ dem LM-80-Report unter der zu betrachtenden Betriebsdauer entnommen. Exemplarisch ermitteln wir den Wert der Farbortverschiebung von $\Delta u'v' = 0,0007$ unter der Betriebszeit von 6.000 h. Die Streuung der Farbortverschiebung mit deren oberer und unterer Grenze, um die

Daten der Referenz LED, kann man nun unter Zuhilfenahme eines Softwaretools anzeigen lassen wie in Abbildung 5 zu sehen.

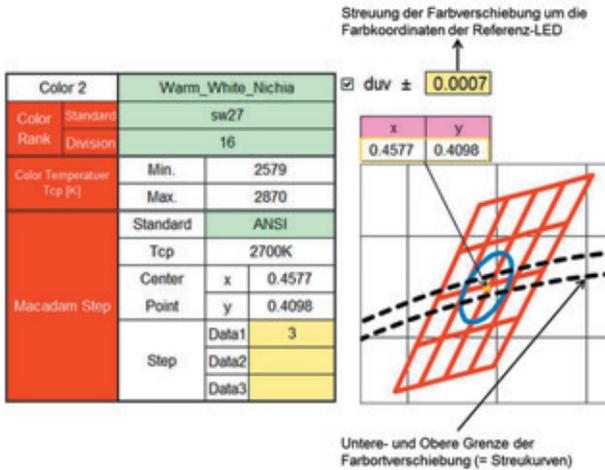


Abb. 5 Nichia Color Rank Tool 2: Streuung $\Delta u'v'$ um die Daten der Referenz LED @ 2700K

Ausgehend vom Punkt der Referenzkoordinaten CIE = (x = 0.4577; y = 0.4098) ist nun vertikal zur oberen und unteren Grenze die maximale Farbverschiebung der LED, unter Berücksichtigung der im LM80-Report angegebenen Betriebsbedingungen (T_a ; T_s ; I_f), abzulesen. Die ermittelte Streuung (Verschiebung) ist als gleichförmig in der Vertikalen als auch in der Horizontalen anzunehmen wie in Abbildung 6 zu sehen.

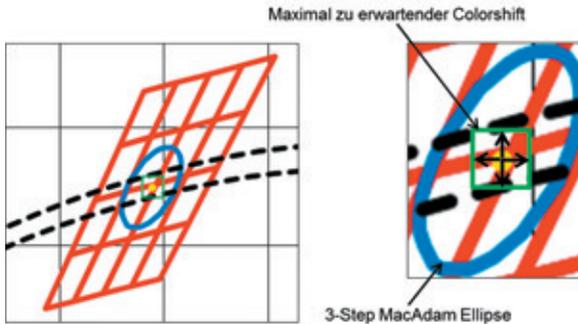


Abb. 6 Nichia Color Rank Tool 2 Bereich des Colorshiftes

In Abbildung 6 wird der Bereich ersichtlich, in dem die LED Ihren maximalen Farbdrift unter den angegebenen Bedingungen erfährt, siehe grünes Quadrat. Die LED driftet während der Degradation i.d.R. in den kälteren Bereich ab. Somit ist ausgehend vom Mittelpunkt die rechte Seite (wärmere Seite) bei der Bestimmung der Farbortverschiebung zu vernachlässigen. Es ist zu erkennen, dass die Referenz LED während einer Betriebszeit von > 6.000h den Bereich einer 3 Step MacAdams Ellipse nicht verlassen wird. Somit ist beim Austausch von LED-Modulen in der Anwendung nach einer Betriebsdauer von 6.000h eine

geringfügige Farbverschiebung zu erwarten. Eine strenge Selektion der LED Binnings kann diesen Farbdrift sehr gering halten, sodass er nicht wahrnehmbar ist.

1.3 Lumenstromdegradation über die Zeit

Eine weitere Herausforderung des Austausches von LED-Modulen stellt die Verringerung des Lichtstromes, auch durch Einwirkungen auf die Phosphorkonversionschicht, dar. Für diese Lichtstromdegradation existieren Kennzahlen ($L_x B_y$), die angeben, wie viel Prozent des ursprünglichen, initialen Lichtstroms nach einer gewissen Betriebsdauer des Moduls noch vorhanden sind. Ist ein LED-Modul beispielsweise mit $L_{90}B_{10}$ bei 60.000h gekennzeichnet, bedeutet dies, dass 90% des ursprünglichen Lichtstroms nach einer Betriebsdauer von 60.000h noch vorhanden sind (L_{90}) und maximal 10% der im Modul befindlichen LEDs unter diesem Lichtstromwert liegen (B_{10}).

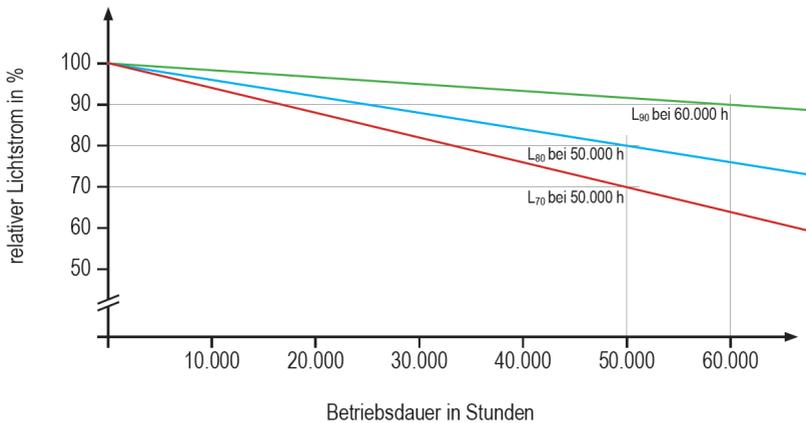


Abb. 1: Lumenstromdegradation über die Betriebszeit einer LED mit deg Kennzahl L

Um dieser Lumenstromdegradation entgegen zu wirken, gibt es mehrere Möglichkeiten. Eine Möglichkeit ist die sogenannte Lichtstromnachführung, die von einigen Herstellern eingesetzt wird. Hierbei werden die LEDs in Anbetracht der Degradation höher bestromt um wieder einen höheren Lumenstrom zu erzeugen. Ein entscheidender Nachteil hierbei ist, dass die LED durch die stärkere Bestromung wärmer wird. Im Resultat wirkt sich das auf eine schneller voranschreitende Alterung der LED und Ihrer Phosphorkonversionschicht aus. Eine höhere Farbverschiebung und eine höhere Lumenstromdegradation sind die Folge.

Eine weitere Möglichkeit ist die scharfe Selektion der LEDs hinsichtlich ihrer Binnings Vorwärtsspannung, Helligkeit und Farbort. Die strenge Selektion zu Anfang kann einen Austausch von LED Modulen auch nach einer hohen Betriebszeit erleichtern. Wenn die nachträglich eingesetzten LEDs über nahezu gleiche physikalische Eigenschaften verfügen, ist oftmals ein Austausch ohne sichtbare Unterschiede möglich. Diese Methode ist zuverlässig und ermöglicht eine zukunftssichere Planung für die Betreiber der Beleuchtungsanlage.

2 Photometrischer Code nach DIN EN 62717

Um die oben erwähnten Erkenntnisse dem Anwender und Planer übersichtlich bereitzustellen, wurde nach DIN EN 62717 der erweiterte photometrische Code eingeführt. Dieser gibt Aufschluss über lichttechnische Größen der verwendeten LED-Module. Die ersten 3 Kennziffern geben die generelle Farbwiedergabe (Ra-Index) und die korrelierte Farbtemperatur (CCT) der Module an. Die darauf folgenden 3 Kennziffern behandeln die Änderungen des Farbortes anhand von MacAdams Ellipsen sowie die Lumenstromdegradation in Abhängigkeit der Betriebsdauer.

Tabelle 1: Photometrischer Code nach DIN EN 62717

Buchstabe	1. Ziffer		2. + 3. Ziffer		4. Ziffer		5. Ziffer		6. Ziffer	
Weiß	Code	Ra-Index Initial	Code	Farbtemperatur in Kelvin Initial	Code	MacAdams Initial	Code	MacAdams nach 25% der Betriebsdauer (max. 6.000h)	Code	Lumenleistung nach 25% der Betriebsdauer (max. 6.000h)
W	7	70 - 79	20	2000 K	2	2 step MacAdams Ellipse	2	2 step MacAdams Ellipse	7	>= 70%
	8	80 - 89	22	2200 K	3	3 step MacAdams Ellipse	3	3 step MacAdams Ellipse	8	>= 80%
	9	90 - 99	24	2400 K	4	4 step MacAdams Ellipse	4	4 step MacAdams Ellipse	9	>= 90%
			25	2500 K	5	5 step MacAdams Ellipse	5	5 step MacAdams Ellipse		
			27	2700 K						
			30	3000 K						
			35	3500 K						
			40	4000 K						
		50	5000 K							
W	8		27		3		3		9	

W827/339 ist ein Beispiel des photometrischen Codes nach DIN EN 62717 anhand einer LED Lampe mit einer Farbwiedergabe von Ra >85, einer Farbtemperatur von 2700K, einer initialen MacAdams Ellipse von 3 Step, sowie auch nach einer Betriebsdauer von 6.000h und dem Lumenstromerhalt >90% nach 6.000h. Der photometrische Code beginnt immer mit „W“ → Weiß. Der erweiterte photometrische Code bietet dem Anwender die Möglichkeit des Vergleichens verschiedener LED Lampen & Leuchten oder Modulen verschiedener Generationen und sichert somit eine grundlegende, qualitative Basis an die Beleuchtungsapplikation.

3 Fazit

Um eine dauerhaft gleichbleibende Qualität der Beleuchtung in einer Applikation garantieren zu können, muss seitens der LED-Lampen & Leuchten Hersteller ein möglichst streng selektiertes Binning der eingesetzten LED verwendet werden. Hierdurch können Degradationseffekte, wie Farbortverschiebung und Lumenstromdegradation über die Betriebszeit, minimal gehalten werden. Um auch einen lichttechnisch qualitativ hochwertigen Austausch nach Jahren gewährleisten zu können, muss darauf geachtet werden, dass auch LEDs der neueren Generation sich im Bereich des Farbortes der älteren Generation befinden. Die Beleuchtung mit LEDs bietet uns heutzutage viele neue Möglichkeiten mit stets wachsender Anzahl von Applikationsbereichen. Die Qualität der Beleuchtung darf hierbei nicht vergessen werden, was Hersteller und Planer in die Pflicht nimmt auf die richtigen Komponenten zu setzen um nachhaltig gutes Licht in die Anwendung zu bringen.

SSL LEDs und die Anwendung der neuesten Spektralwertfunktionen – Die Geburt eines neuen Weißbinning

Wilm, A.; Horst, C.; Heidel, G.

Osram Opto Semiconductors GmbH, Leibnizstraße 4, 93055 Regensburg

Problemstellung

Der Trend zu immer höherer Lichtqualität und besonders zu besserer Farbkonsistenz zwischen weißen LED Lichtquellen ist nun bei 1SDCM angekommen und diese sollte nun keine wahrnehmbaren Farbunterschiede mehr aufweisen. Aber die Realität zeigt, dass selbst ein 1 Step MacAdam Binning in realen Anwendungen der Allgemeinbeleuchtung nicht vor wahrnehmbaren Farbunterschieden schützen kann.

Das Problem ist der CIE 1931 2° xy Farbraum welcher auf der ganzen Welt zum Binning von LEDs verwendet wird. Er ist akkurat bei einer Beurteilung eines 2° Beobachterfeldes, aber in den meisten Anwendungen wird die Farbkonsistenz nicht anhand einer kleinen Fläche mit 17mm Durchmesser im Abstand von 0,5m beurteilt (entspricht dem 2° Beobachterfeld) sondern auf größeren Flächen mit mindestens 90mm Durchmesser (entspricht mindestens einem 10° Beobachterfeld). Deswegen gibt ein Binning im 2° Sichtfeld nicht die Realität wieder.

Dies ist der Grund, warum ein perfektes 1SDCM Binning oder sogar Lichtquellen mit exakt den selben Farbkoordinaten im 2° Farbraum aber mit unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung, nicht vor wahrnehmbaren Farbunterschieden in normalen Anwendungsbedingungen schützen kann.

Ziel

Verständnis der physiologischen Gründe für die unterschiedliche Wahrnehmung unter 2° und 10° Beobachterfeldgröße und Visualisierung der Effekte von einem engen 2° Binning und dessen mögliche Farbabweichungen im 10° Beobachterfeld.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Der Wechsel des Farbraums von CIE 1931 2° xy zu dem neuen CIE 2015 10° ermöglicht ein LED binning das deutlich näher an den realen Anwendungsbedingungen orientiert ist und bietet somit eine bessere Farbkonsistenz für alle Bereiche der Allgemeinbeleuchtung.

Realisierungsgrad

Dies ist kein Science Fiction sondern schon heute in existierenden Produkten implementiert um so eine besser Lichtqualität zu gewährleisten. Das neue TEN° Binning Feature der SOLERIQ® S 13 CRI80 CoB LED von OSRAM Opto Semiconductors bietet das Beste von beiden Farbräumen. Das 3SDCM 2° binning garantiert die Kompatibilität zu existierenden Standards und Spezifikationen und das 3UNIT 10° Binning beurteilt die Farbunterschiede in einem realistischeren Farbraum.

General Lighting LEDs and the application of the latest color matching functions - Genesis of a new white binning

Wilm, A.; Horst, C.; Heidel, G.

Osram Opto Semiconductors GmbH, Leibnizstraße 4, 93055 Regensburg

Issue

The trend towards higher light quality and especially better color consistency between white LED light sources is now down to 1SDCM which should provide no visible color differences. But reality shows that even a 1 step MacAdam binning cannot prevent visible color differences in real applications of general lighting.

The problem is the CIE 1931 2° xy color space which is currently used for LED binning around the world. It is correct for a 2° field of view, but most applications judge white consistency not based on a small 17mm diameter spot in 0,5m distance (equivalent to 2° field size) but on larger surfaces with more than 90mm (equivalent to at least 10° field size). Therefore a binning according to a 2° field size does not reflect the reality.

This is the reason, why a perfect 1SDCM binning or even light sources with exactly the same color coordinates in the 2° color space but different spectral compositions cannot prevent visible color differences in real and normal application conditions.

Aim

Understanding the physiological reasons for the different perception under 2° and 10° field of view and illustrating the effects of a narrow binning at 2° and the possible color variations under a 10° field size.

Description of the innovation/»best practice«

The change of the color space from the CIE 1931 2° to the new CIE 2015 10° enables a LED binning closer to real application conditions and provides a better color consistency for general lighting applications.

Level of realization

This is no science fiction but already implemented in existing products providing better light quality. The new TEN° binning feature of the SOLERIQ® S 13 CRI80 CoB LED from OSRAM Opto Semiconductors offers best of both worlds. A compatible 3SDCM 2° binning to comply with current standards and specifications and a 10° binning to measure the color consistency in a more realistic color space.

General Lighting LEDs and the application of the latest color matching functions

Wilm, A.; Horst, C.; Heidel, G.

Osram Opto Semiconductors GmbH, Leibnizstraße 4, 93055 Regensburg

Summary

Light quality of LED is getting more and more important for general lighting applications and color consistency of white LEDs is one important point. Over the last years the binning of LEDs got tighter and tighter and now LEDs are also offered in 1SDCM single bins with the expectation of no color differences. Unfortunately different light sources with even exactly the same color coordinates cannot prevent visible color differences because the used CIE 1931 2° color space does not correlate with the observation under normal application conditions in general lighting. To solve this problem a binning in the new CIE 2015 10° color space is necessary. The new TEN° binning feature from OSRAM Opto Semiconductors is a first step towards a revolutionary new binning of LEDs which would impact the complete lighting industry and provides a smart solution to the color consistency problem.

Motivation

Many people in the lighting industry know: Do not mix light sources with same CCT but different CRI values or you will see different white tones. But why can metameric light sources still look different? Spot lights and wall washer applications have very high requirements on the consistency of white light because even slight differences can be easily recognized. But why can light sources with even a 1SDCM single step MacAdam color binning look different? How can we solve this race for a tighter color binning in a smart and effective way?

A detailed description of the problem with metameric spectra

Metameric spectra should by definition provide the same color or white impression. Therefore, if different light sources are measured to be exactly the same there should be no difference in the perception of the resulting white tone. Reality shows that spectra with identical color coordinates but different spectral composition due to different CRI values, different manufacturer and especially different excitation wavelength of the blue chip can result in different perceptions of white.

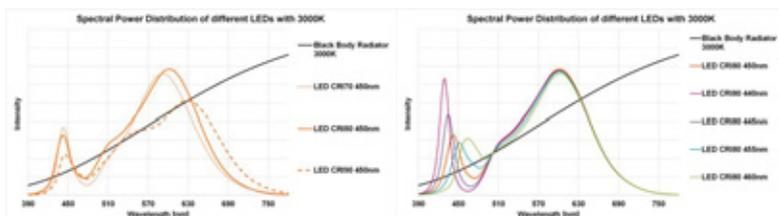


Figure 1: Example spectra of 3 different CRI and 5 different excitation wavelength of the blue chip



Figure 2: Identical color coordinates in the CIE 1931 2° compared to variations in the new 2015 10°. A visual evaluation of the shown spectra would lead to different visible white tones even if the measured color coordinates are exactly the same.

The CIE 1931 2° xy color space is used for measurement of white light sources in the complete lighting industry. This color space is judging and measuring the white appearance of the light based on a 2° field of view. If white surfaces are judged in reality the field of view is much larger and at least a 10° field of view.

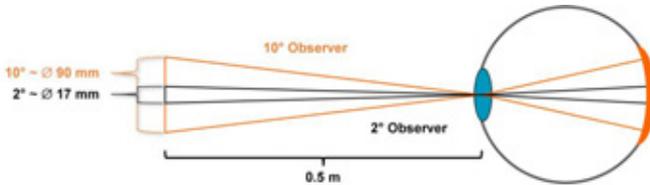


Figure 3: Field of view of a 2° and 10° observer

Unfortunately the pigment density in our eyes is not constant over the field size. The ratio between the blue, green and red cones is changing over the field of view.

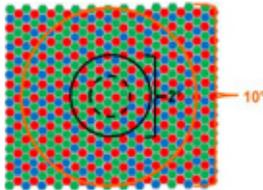


Figure 4: Schematic distribution of the pigment density over field of view

The pigment density ratio of the blue receptors compared to green and red is then increasing over the field of view until it stays constant starting from around 7°. From there onwards the ratio between the blue, green and red cones is more or less constant.

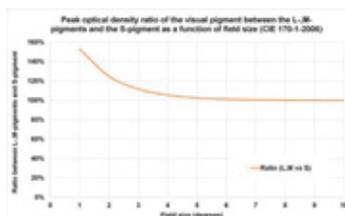


Figure 5: Variation of the blue vs green and blue pigment density ratio over the field of view

This variation of the pigment density in our eyes is causing a different color perception of light with different spectral composition if judged under e.g. 2° and 10° field of view. All light sources today are measured and binned under a 2° field of view but used and judged in the final application under more than 10° field of view. This is the reason why different spectra which are measured in the CIE 1931 2° xy color space could appear different when observed in reality at a larger surface.

Background of the 2° and 10° color matching functions

In 1931 the CIE recommended a first model of a standard observer with a 2° viewing angle. It was based on the work of Wright and Guild and these two independent research groups showed almost the same results for color matching functions (CMF) to describe human color perception. The maximum saturation method was used to determine the CMF where a reference surface was presented with a monochromatic attraction and a RGB primary source on the test surface was modified by the test person to replicate the reference color. Test and reference surface together where observed under a 2° field of view.

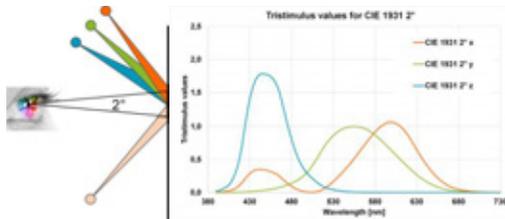


Figure 6: 2° Color matching experiment and resulting CIE 1931 2° color matching functions

To get the CMFs ($\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$) the primary light sources were transformed into imaginary primary sources X, Y & Z. The transformation values were chosen in the way to prevent negative values in the CMFs and to make the \bar{y} -function the same as 1924 CIE $V(\lambda)$ function. CMFs for an observer field size of 10° were developed in 1964 by Stiles and Burch in a similar way providing a 10° field of view.

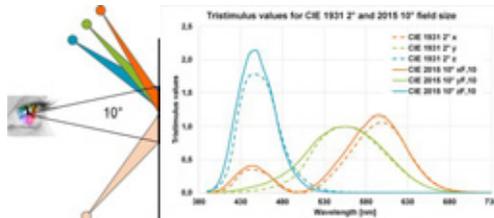


Figure 7: 10° color matching experiment and difference between the CIE 1931 2° and 2015 10°

In many researches insufficiencies of that CMFs were detected. They especially provide deviations in short and middle range sensitivities ($\bar{y}(\lambda)$ & $\bar{z}(\lambda)$). An alignment with the 1931 CIE 2° CMFs result in a greenish tint of test source in many experiments.

In 2006 new physiologically-based color matching functions of Stockman and Sharpe were recommended by the CIE Technical Committee 1-36. Stockman and Sharpe tried to find the real sensitivities of the human color receptors – the cones. There are three different types of cones: one with a sensitivity in a range of long wavelength (L-cones), one in the

middle range (M-cones) and one in the short range (S-cones). To find the sensitivity functions, named cone fundamentals $\bar{T}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$, for each cone type, the researchers used measurements made in both with normal trichromats (all cone types existing) and color deficient blind observers (one or two cone types are missing). To find the $\bar{T}(\lambda)$ and $\bar{m}(\lambda)$ cone fundamentals deuteranopes and protanopes were used as subjects. With them the sensitivity towards a color attraction of a single cone type could be isolated and measured by overexciting the other type. To find the $\bar{s}(\lambda)$ cone fundamentals measurements with normal trichromats under intense adaptation conditions and with monochromats who lack functioning M- and L-cones were combined with an analysis of the 10°-color matching function data of Stiles and Burch made in 1958. The final cone fundamental estimates resulted from a linear transformation of the 10°-CMFs guided mainly by the cone spectral sensitivity data. Out of their researches Stockman and Sharpe proposed color matching functions for 2°- and 10°-viewing conditions. The latest publication “CIE 170-2:2015: Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 2: Spectral Luminous Efficiency Functions and Chromaticity Diagrams” is providing also a complete color space based on the new fundamental color matching functions from 2006.

What are the challenges to implement the new 10° color matching function in LED production and measurement?

The new white binning in the CIE 170-2:2015 color space has big advantages but also some requirements when implemented in the LED measurement and testing. In order to harvest the benefits of the new cone fundamental based spectral tristimulus values for the 10° field size a spectroradiometer measurement is necessary in the production. The often used tristimulus test heads which are using 3 optical filters to generate the X,Y and Z tristimulus values would have to be mechanically upgraded with new filter curves in order to measure in the 10° color space.

Beyond the measurement equipment existing standards and regulations are also a challenge for the introduction of the new 10° color space. Most of the specifications are based on the CIE 1931 2° color space and in order to comply with the existing and the new color space a double binning is unavoidable during the introduction phase of the new binning.

In order to solve this problem we first bin the LED according to the calculated xy color coordinates in the CIE 1931 2° observer. With the same spectral measurement we can also calculate the color coordinates in the new CIE 2015 10° observer and bin the LED in this more realistic color space as well.

Beside the measurement and binning in a new color space we are also proposing the use of the CIE 1976 UCS transformation from xy to u'v'

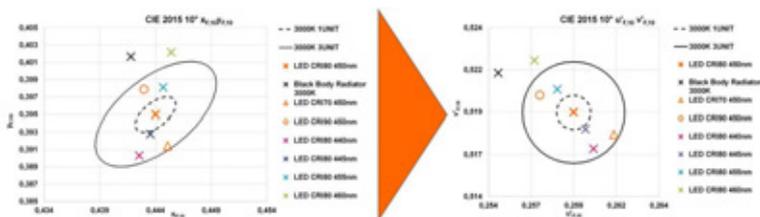


Figure 8: Applying the CIE 1976 UCS transformation to the CIE 2015 10° xy color coordinates

By applying the UCS transformation the resulting color space is more uniform and the MacAdam ellipses are almost circles. In this more uniform color space, a color distance can be used directly for a light quality judgement whereas in a xy color space one would have to first consider the orientation relative to MacAdam ellipse to judge the color consistency. In our definition, a 1UNIT is similar to 1SDCM and defined as a distance of 0,001 in the u'v' color space.

Benefits and advantages for color consistency using the 10° color space

The following estimation based on simulated virtual production data shows the effect and benefit of the 10° binning. For this simulation the excitation wavelength of the blue chip has been varied around 450nm by $\pm 7,5\text{nm}$ at 4000K and CRI80.

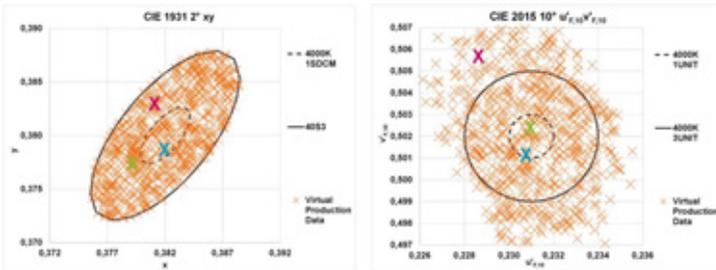


Figure 9: Example of a simulated production data for a 3SDCM bin in the 2° and 10° color space

The implementation of the TEN° binning feature in the production and therefore also in the LED products enables a binning of the LED under real application conditions (10° field of view) rather than under a small experimental setup (2° field of view). The left picture shows the LEDs binned in a 3SDCM white bin in the CIE 1931 2° color space. The same LEDs are also measured in the CIE 2015 10° color space and the large scatter shows that LEDs which have a color difference of 3SDCM in the 2° color space can have a significantly larger color difference, up to 7.4UNIT, in the 10° color space. Especially if a very tight color binning is requested and a premium price is paid for a 1SDCM bin in 2° this can be very problematic. It suggests that no color differences between the LEDs are visible but it cannot prove that is also applies under realistic conditions.

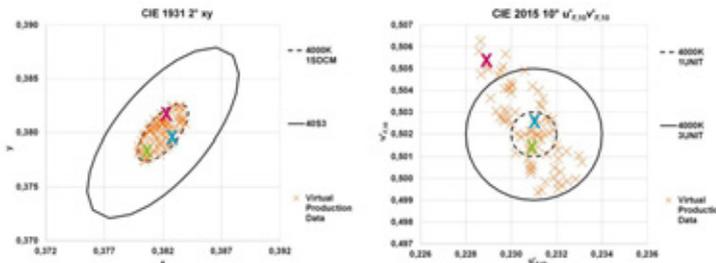


Figure 10: Example of a simulated production data for a 1SDCM bin in the 2° and 10° color space

The LED is binned in the 2° color space in a very tight 1SDCM color bin and no visible color differences between the LEDs are expected. If the same spectra are evaluated according to the 10° observer, the color differences between the LED can be up to 4.9UNIT in the 10° color space. This means that even at a 1SDCM color binning a significant difference in white perception may be visible in the application. The TEN° binning feature as it is implemented in the current version of the SOLERIQ® S 13 CRI80 is now limiting the color differences in both color spaces.

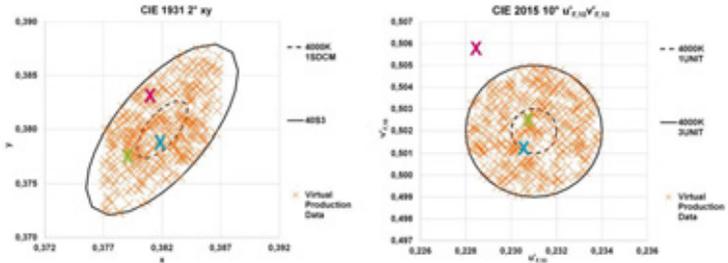


Figure 11: Example of a simulated production distribution with TEN° binning feature

The LEDs are fulfilling the existing standards and specifications based on the CIE 1931 2° xy color space and the color differences are there limited to 3SDCM. Additionally the LED is binned in the CIE 2015 10° u'F10, v'F10 color space and the color differences are limited also to 3UNIT in the 10° color space.

This example shows that a very tight binning in the 2° color space only cannot prevent color differences under realistic application conditions which are more similar to a 10° field of view. This can only be achieved if the spectrum is evaluated in the 10° color space and color differences are also limited there.

Conclusion and next steps

Changing the color space for LED binning for a complete industry is not an easy step. On the other hand the higher light quality requirements and high cost pressure makes the move towards a more realistic color space inevitable. 85 year after the publication of the 1931 2° xy color space and with the introduction of a new light source technology the change to the 2015 10° color space is the smart answer for the binning challenges of the lighting industry in the LED era.

References

- CIE 170-1:2006: *Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes - Part 1*
- CIE 170-2:2015: *Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 2: Spectral Luminous Efficiency Functions and Chromaticity Diagrams*
- ISO 11664-5:2009(E) / CIE S 014-5/E:2009: *Colorimetry - Part 5: CIE 1976 L*u*v* Colour Space and u', v' Uniform Chromaticity Scale Diagram*

Beleuchtungssanierung in Krankenhäusern

Stefan Gramm & Roman Jakobiak; *daylighting.de*

Problemstellung und Forschungsfragen

Aufgrund des in der Regel hohen Kühlbedarfs in Krankenhäusern kann eine energieeffiziente Beleuchtung durch die Reduktion interner Wärmequellen zusätzlich zur Senkung der Betriebskosten beitragen. Die langen Nutzungszeiten bis hin zum Rund-um-die-Uhr-Betrieb lassen Investitionen in eine energieeffiziente Beleuchtung gerade im Krankenhaus als sinnvoll erscheinen. Dabei stellt sich die Frage, wie hoch die Energieeinsparpotenziale verschiedener Sanierungsmaßnahmen bei der Beleuchtungstechnik in Krankenhäusern ausfallen können.

Stand der Wissenschaft/Technik

Eine komplexe Gebäudetechnik verbunden mit hohen Anforderungen an das Raumklima bewirkt in Krankenhäusern einen hohen spezifischen Energiebedarf. In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Forschungsprojekt *Krankenhaus[®]* wird der Energieumsatz verschiedener Funktionsstellen in Krankenhäusern durch die TU Berlin ermittelt. Eine detaillierte Untersuchung der Beleuchtungsanlagen im Bestand erfolgt im Rahmen einer Querschnittsanalyse durch *daylighting.de*.

Forschungshypothesen

- Die durch eine Sanierung der Beleuchtungsanlage zu erzielenden Betriebskosteneinsparungen rechtfertigen den erheblichen finanziellen Aufwand.
- Der Austausch konventioneller Leuchtmittel durch LED-Retrofits erzielt ähnliche Energieeinsparungen wie neue LED-Leuchten.

Versuchsaufbau

Im Rahmen der Querschnittsanalyse werden energieeffiziente Systemlösungen einer integrierten Tages- und Kunstlichtbeleuchtung für Krankenhäuser aufgezeigt und bewertet. Dabei bildet eine konkrete Bestandssituation den Ausgangspunkt der Überlegungen. Untersucht werden Stationsflure, Bettzimmer sowie Untersuchungs- und Behandlungsräume in sechs Krankenhäusern.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Für die Sanierung mit neuen LED-Leuchten und einer kombinierten Tageslicht- und Präsenzregelung ergeben sich im Mittel Energieeinsparpotenziale von 85 % in Stationsfluren, 55 % in Bettzimmern und 70 % in Behandlungsräumen. Dabei erfordert die Realisierung dieser Potenziale eine auf den Anwendungsfall abgestimmte Strategie. Die derzeit noch langen Amortisationszeiten für LED-Leuchten (7 a, 23 a, 16 a) können durch den Einsatz von LED-Retrofits erheblich verkürzt werden (2 a, 1,5 a, 3 a), jedoch erzielen Retrofits geringere Einsparungen (43 %, 46 %, 59 %) und erfüllen die normativen Anforderungen an die Beleuchtungsstärke oftmals nicht.

Lighting renovation in hospitals

Stefan Gramm & Roman Jakobiak; *daylighting.de*

Research issues

Due to the generally high cooling load in hospitals an energy efficient lighting system contributes to the reduction in operating costs by reducing internal heat sources. Long utilization times up to round-the-clock operation justify high investments in energy efficient lighting in the hospital. This raises the question of how much energy saving can be achieved by various renovation measures of the lighting technology in hospitals.

State of science/technology

A complex building technology associated with high requirements on the indoor climate causes a high specific energy use in hospitals. In the research project *Krankenhaus*[®] (hospital+) which is funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology the energy expenditure of various functional sections in hospitals is determined by the TU Berlin. A detailed study on the renovation of lighting systems in existing hospitals is carried out as part of a cross-sectional analysis by *daylighting.de*.

Research hypothesis

- The savings in operating costs deriving from a lighting renovation justify considerable financial expenditures in the lighting system.
- LED retrofits achieve similar savings compared to new LED luminaires.

Experimental setup

As part of the cross-sectional analysis energy efficient lighting solutions for hospitals with integrated daylight and electric lighting are identified and evaluated. The existing situation is the starting point of all considerations. Hallways, bedrooms as well as treatment rooms in six hospitals are examined.

Results in comparison with previous findings

The retrofitting solution with new LED luminaires and a combined daylight and presence responsive control system achieve average energy savings of 85 % in hallways, 54 % in bedrooms and 70 % in treatment rooms. Harvesting this potential requires accurate planning. In treatment rooms solar shading systems are often used permanently for privacy protection and thus prevent the use of daylight. The relatively high payback periods for solutions with new LED luminaires (12 a, 14 a, 24 a) can be significantly reduced through the use of LED substitute lamps (2 a, 3 a, 5 a), however, these LED lamps in conventional luminaires only achieve lower energy savings (43 %, 46 %, 59 %) and often do not meet the required illuminance.

Safe exhibition of artworks with natural light

Santiago Mayorga Pinilla, Daniel Vázquez Molini, Antonio Álvarez Fernández-Balbuena, Universidad Complutense de Madrid, Paola Belloni, University Furtwangen

Abstract

The main objective of this work is to obtain a realistic and accurate method to evaluate the damage of natural light, as a function of the spatial and temporal location, using calculations involving geometric, photometric and climate aspects of the places where art exhibitions are located.

The development of a spectral damage model has been made with reference to the information provided by the standard CIE 157:2004, which describes the scope of the photochemical effect that visible light produces in the exposed oils. The possibility of having spatio-temporal damage maps provides to exhibition managers an essential tool that could define the policy of the artworks exhibition. The obtained data allow us taking decisions about the convenience of exhibiting certain kinds of artworks, and to consider not only the spatial distribution of the pieces, but also the periods of time when they have to be exhibited. In areas of high radiation, for example, pieces with low sensitivity can be displayed the whole year. In order to evaluate the influence of natural light, our research has been developed in a permanent exhibition of 54 oils from Vicente Carducho painter, located in the walls of the fifteenth century cloister of the Monastery of Santa Maria de El Paular in Rascafría (Madrid, Spain). Resulting in very interesting data that is helping to place the paintings with respect to the received natural lighting damage dose.

Safe exhibition of artworks with natural light

Santiago Mayorga Pinilla, Daniel Vázquez Molini, Antonio Álvarez Fernández-Balbuena, Universidad Complutense de Madrid, Paola Belloni, University Furtwangen

Abstract

The main objective of this work is to obtain a realistic and accurate method to evaluate the damage of natural light, as a function of the spatial and temporal location, using calculations involving geometric, photometric and climate aspects of the places where art exhibitions are located. The possibility of having spatio-temporal damage maps provides to exhibition managers an essential tool that could define the policy of the artworks exhibition. The obtained data allow us taking decisions about the convenience of exhibiting certain kinds of artworks, and to consider not only the spatial distribution of the pieces, but also the periods of time when they have to be exhibited. In order to evaluate the influence of natural light, our research has been developed in a permanent exhibition of 54 oils from Vicente Carducho painter, located in the walls of the fifteenth century cloister of the Monastery of Santa Maria de El Pualar in Rascafría (Madrid, Spain).

1 Introduction

Lighting is one of the most important factors to appreciate the artistic and historical elements but it should be very well controlled since electromagnetic radiation can damage the exposed art material /1/.

The control of light is so far based on certain regulations and guidelines, such as those contained in the CIE 157:2004 /2/. However, there are buildings in which Natural Light, so difficult to control caused by its variability, is the source of illumination, due to the type of construction or to the artistic interest.

The main objective of this work is to obtain a realistic and accurate method to evaluate the impact of Natural Light, as a function of their spatial and temporal location, using calculations involving geometric, photometric and climate aspects of the places where art exhibitions are located. This method makes easier the use of Natural Light as a primary or secondary source and, since it is a renewable energy, the need of artificial light, energy dependence and pollution can be reduced. In order to evaluate the influence of natural Light, our research has been developed in a permanent exhibition of 54 oils from Vicente Carducho painter, located in the walls of the fifteenth century cloister of the Monastery of Santa Maria de El Pualar in Rascafría (Madrid, Spain).

2 Method for spectral evaluation of daylight damage in artworks

To date several studies concerning spaces illuminated by natural Light propose methods to evaluate, use and control this type of illumination, or otherwise to avoid it /3-6/. In this research we present a method that quantifies the risk factor to which the artworks are exposed.

2.1 Previous

The Institute of Cultural Heritage of Spain (Ministry of Culture) launched a project to recondition the cloister and to restore the oils previously exposed there between 2007 and 2011. Curators and restorers from the Prado's Museum took over this work.

The study about the optimal value of radiation exposure on the artworks is based on the above references /7/. The research carried out by the UCM team, has taken into account the recommendations on how artworks should be illuminated /8,9/. The model characterizes the spectral composition of light and its intensity over time and space considering the geographic location of the cloister. The results were used in order to evaluate if the produced damage in the exhibition is under the criteria of conservation of restorer team.

We have also analysed in the calculation the influence of the responsivity of oil paintings (material used in the works), described by the model of Berlin /10/.

According to the protocols on illumination in Museums /11/ UV radiation has been neglected by using special glasses with filters placed in the windows. IR radiation was previously monitored and controlled with the temperature conditioning of the cloister. So, for the calculations carried out in this paper only radiation from 400 to 780 nm has been considered, range used by the CIE for the visible radiation.

2.2 Description of the Models

In order to obtain an accurate evaluation of daylight it is necessary to define the main parameters which have influence in the final objective. Therefore, the next models have been used:

- Geometric-Photometric simulation with illuminance measurements.
- Spectral model of Natural Light.
- Spectral Damage model.
- Meteorological model.

The relationships between these models are shown in Fig.1.

2.2.1 Geometric-Photometric Simulation

This simulation allows obtaining the illuminance values at each point of the cloister, along the year.

The geometrical part has been developed with a CAD program. This model is applied to specific software processing the photometric characteristics (DIALux), where the following aspects have been considered:

- Amount of radiation: depending on the cardinal orientation and the windows filters of different transmittances, according to the cardinal orientation, on the located on the walls in front of the oils.
- Types of day according to the climate: clear day (A; no clouds in the sky), covered day (B; sky foul covered by close) and cloudy day (C; sky partially covered by cloud), and the type of radiation: direct and/or diffuse.
- The study was conducted from January to June, using each month and at every hour of the day, from sunrise to sunset.
- The values of the reflection coefficient used for the surfaces of the cloister.

Since the interest of the study is only the vertical walls where the oils are exposed, only the illuminance values of these surfaces (whose dimensions are approximately 53 x 6,6 m) have been used to construct a 200 (horizontal) x 30 (vertical) matrix of equidistant points. The sample value has been considered to be good enough for the objective of the research, and does not increase the computational requirements. Any of the matrix values corresponds to the value in Lux of the simulation for the same point.

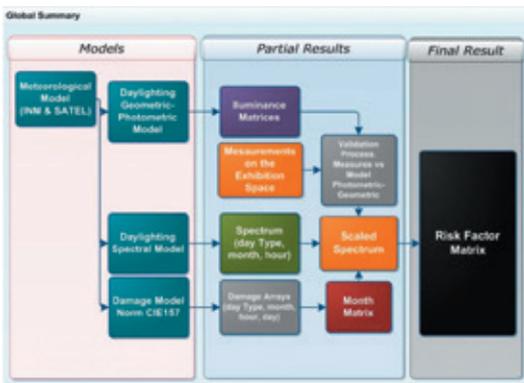


Figure 1: Organization chart of variables (Models) and partial results to obtain the Risk Factor.



Figure 2: Situation of the sensors placed in the cloister. The arrow indicates the position of the sensor on the wall of the cloister.

In order to verify the values of the photometric model, illuminance measurements of the cloister were made using sensor (Lux meter Lux-Bug Hanwell) placed on the vertical face of the wall, taking a measurement every 15 minutes, 24 hours a day, and every day since 2007 to 2013. The sensors were placed 3.67 meters above the floor of the cloister (Fig.2). This position was chosen because it is the area where Natural Light more affects the paintings and to keep safe the sensors of possible interactions with visitors.

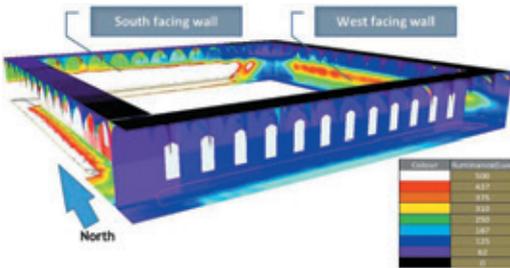


Figure 3: Simulation of the cloister illumination with DIALux.. The lux value of each colour is shown in the table of the Fig.

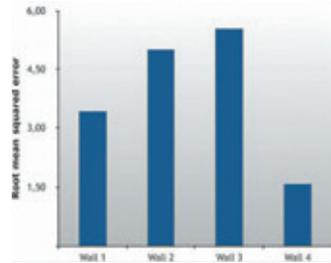


Figure 4: Comparison of Measured values with values obtained by the simulation program in Lux hour/Month

2.2.2 Spectral Model of Natural Light

The spectral characteristics and the amount of radiation of the Natural Light in El Pualar (Madrid), have been obtained. Values of the sun spectral irradiance E_{λ} in $W m^{-2}$ from sunrise to the sunset for each hour of the day and taking into account the characteristics of each month of the year are calculated according to reference models /12/, following the equation (1).

$$E_{\lambda} = E_{D\lambda} + E_{r\lambda} + E_{s\lambda} + E_{g\lambda} \quad (1)$$

where $E_{D\lambda}$ is the direct irradiance in $W m^{-2}$ and $E_{r\lambda}, E_{s\lambda}, E_{g\lambda}$ the diffuse irradiance in $W m^{-2}$. This model takes into account the latitude, the longitude, the altitude above sea level, and the cardinal orientation, and the factors influencing the atmosphere solar radiation.

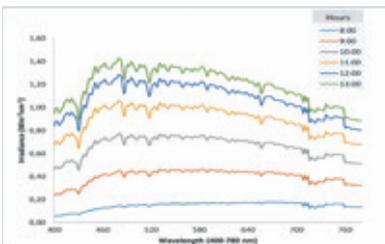
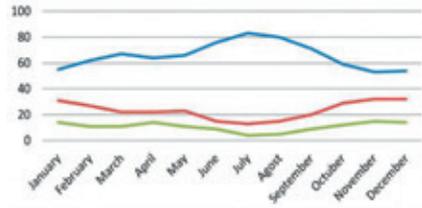


Figure 5: May 21th spectral curves, from sunrise to zenith, on a clear day. Spectral, Irradiance in $W m^{-2} nm^{-1}$.

Figure 6: Percentage of each type of day in Madrid. Colour blue: % clear day, colour red: % cloudy day, colour green: % covered day.



The calculation to know the sun position along the year, from sunrise to sunset, has been made using as a model the following equations described in /3/, for the zone where the Monastery is located. In the spectral model, the same variables used in the geometric-photometric model were used: type of day (A, B, C), and temporal aspects (month and hour of the day).

2.2.3 Spectral Damage Model

The development of this model has been made with reference to the information provided by the standard CIE 157:2004, which describes the scope of the photochemical effect that visible light produces in the exposed oils. The matrices detailing the final damage are obtained from the illuminance matrices calculated in the models above described and using the procedure that follows. Applying these criteria to the Berlin model, we get the exposure threshold of the effective radiance, choosing the material sensitivity (oil in this case) that in the standard has been considered as low sensitivity, and the response is calculated with the exponential relationship in the following equation (2):

$$s(\lambda)_{dm,rel} = \exp[-b(\lambda - 300)] \quad (2)$$

where $s(\lambda)_{dm,rel}$ defines the relative spectral responsivity on the radiant exposure standard at 300 nm; b is a constant value depending on the sensitivity of the material used in the artworks and $s(\lambda)$ and b are non-dimensional. The resulting function $s(\lambda)_{dm,rel}$, has been applied together with the spectral model $E_{e,\lambda}$, to obtain the effective irradiance E_{dm} .

The result is a function of the exposure threshold of effective irradiance of Natural Light for a period of time, and E_{dm} expression(3);

$$E_{dm} = \int E_{e,\lambda} s(\lambda)_{dm,rel} d\lambda \quad (3)$$

E_{dm} in Wm^{-2} . To take into account the effective damage, the spectrum of the incident radiation and the relative spectral response of the host material, effective irradiance has to be integrated over time in equation (4),

$$H_{dm} = \int E_{dm} dt \quad (4)$$

where H_{dm} is the Effective Radiant Exposure is the effective irradiance over time in Whm^{-2} .

The damage factor (dm) is the value that the effective irradiance exposure takes when obtained for a specific point of the cloister wall in a determined time period, considering the natural illumination conditions above described (geometric-photometric and spectral models of natural light). Therefore, in lighting studies applied to cultural heritage, especially in those using Natural Light, it is essential to consider the spectral distribution of radiation, since the dm strongly depends on the wavelength of the radiation /2/.

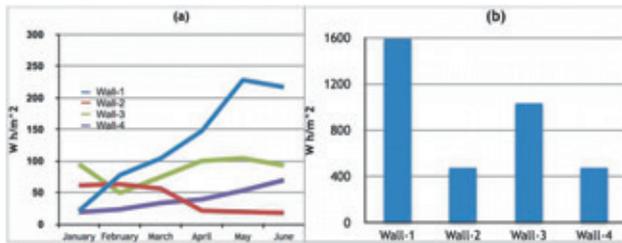


Figure 7: (a) Maximum values of H_{dm} of each wall of the cloister, as the Berlin model. (b) Maximum annual aggregate value of H_{dm} for the points in the walls receiving more radiation.

H_{dm} provides a value that is an amount of energy per time. In this model a numerical measured standard value is proposed, the Global Risk Factor (GRF_A), which is the result of the comparison with the illuminant A, and it is easier to interpret. The value obtained for the GRF_A indicates how many times the illuminated area exceeds or equals the Illuminant A, being unity for areas having the same H_{dm} .

The GRF_A parameter serves as a standard measurement. It reports about the possible damage that the artworks in an exhibit with Natural Light would suffer compared to a source of constant illumination pattern. The constant radiation source chosen is an incandescent lamp of 50 Lux (Illuminant A, $H_{dmA} = 0.2628 \text{ Whm}^{-2}$), recommended for sensitive materials under Berlin model [10](#).

The computing power of the GRF_A and its flexibility, make this method to be a very useful tool for restorers and designers of exhibitions, expression (5):

$$GRF_A = H_{dm}/H_{dmA} \quad (5)$$

2.2.4 Meteorological model

In order to know the amount of radiation of the geographic location of the Monastery (Rascacfría, Madrid), it is necessary to estimate the distribution of the different types of days in each month of the year. We have analysed statistical values from the Satel satellite [13](#). These data provide the frequency at which the three day types.

3 Results: Application to the cloister of Santa Maria de El Paular

3.1 Results Geometric Photometric Model

Fig. 3 shows the illuminance distribution on March 7 at 10 am for a clear day. It is shown that South and West walls are the areas receiving the greatest radiation in this hour and in this day, being the North wall the least radiated.

The illuminance values measured during period 2007-2013 have been compared to the values obtained using the photometric model. For this purpose, we have used the value of the photometric model that matches the position of the Lux meter. The fitting of the theoretical model to the measured data is good enough (in the worst situation, East wall, a deviation less than 6% is found) (Fig. 4).

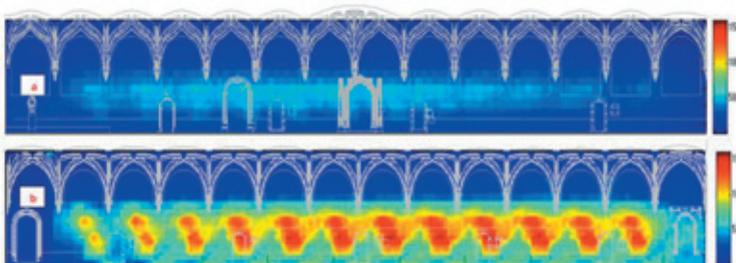


Figure 8: Values of GRF_A on the South (a) and West (b) walls of the cloister from January to June compared with incandescent lamp 50 Lux.

3.2 Results from the Natural Light Spectral Model

The radiation spectral distribution for each type of day and the solar position have been calculated. Fig.5 shows an example for May 21th on a clear day from sunrise to sunset.

3.3 Meteorological Model

The frequency of each of the three types of days is showed in Fig.6.

3.4 Effective damage on the vertical walls

The results determine the H_{dm} value, corresponding to the different walls of the cloister, divided into arrays of 200x30 points. This model allows deriving the H_{dm} for different areas and periods of the year. Although in general, values do not exceed the CIE 157:2004 recommendations, which for low responsivity are set to $850 Whm^{-2}$, analysing each point of the walls, areas in which this value is far exceeded are found, since they are more exposed to direct sunlight. fig.7(a) shows the evolution in time (from January to June) of the maximum values of H_{dm} choosing areas that receive more radiation on each wall. Fig.7(b) presents the maximum accumulated value of H_{dm} for the same points of each wall.

3.5 Global Risk Factor (GRF_A)

Fig. 8 represents the accumulated GRF_A for six months in the walls 1 (West facing) and 4 (South facing) of the cloister. The information contained in this fig. allows the people responsible of maintaining the cloister to appreciate how the radiation acts in each area and each month. In some parts of the West wall, the accumulated value of GRF_A over six months is 150 (Fig. 8(b)). If this GRF_A is considered as a high value, it is possible either to reduce the transmittance of the filter window or to generate mechanisms to protect the most exposed areas in the concrete hours and months with more incident radiation.

The study can be applied for each art work, every space, every hour, every month. Information is collected with the aim of making more efficient the use of Natural Light as a renewable energy in that place. However, regions receiving more radiation on the wall 4 (East) have a GRF_A lower, less than 80.

4 Discussions and Conclusions

The advantages of the use of Natural Lighting in architecture are widely accepted (energy saving, not polluting, renewable source, psychological comfort, circadian cycle, colour reproduction). However, its application in museums has been long disputed due primarily to the difficulty of controlling and evaluating it properly.

The detailed and precise analysis carried out in this study can be used to obtain reliable values of the risk that makes the use of the daylight an optimal source of lighting applying a reasonable and noncomplex methodology. The calculation system applies Natural Light spectral distribution to evaluate the impact (relative damage) on each area of the artwork, taking into account the level of radiation estimated at every point and every moment. It will be also necessary to calculate if this value is relevant enough or if it would be more convenient to relocate the artworks, or to use filters with more protection.

It is necessary to use the spectral information when calculating the relative damage of Natural Lighting. The obtained values are different to those obtained when we only analyse the illuminance, since the spectral distribution of the daylight changes substantially depending on time, type of day and the orientation of the studied point.

The possibility of having spatiotemporal damage maps provides to exhibition managers an indispensable tool that could define the policy of the artworks exhibition (right location and the time when they can be exhibited).

Finally, GRF_A allows taking decisions about the convenience of exhibiting certain kinds of artworks, and to consider not only the spatial distribution of the pieces, but also the periods of time when they have to be exhibited. In areas of high radiation, pieces with low sensitivity can be displayed the whole year, or alternatively it is possible to select periods of time when the GRF_A is lower to display the most light-sensitive works.

For the latter case, since this cloister is located in a very touristic area with visitor mainly in summer, one could think of exhibiting these sensitive works in more protected areas in summer time. Areas with lower GRF_A would be the most convenient to exhibit the artworks permanently.

5 References

- [1] Cuttle C. Damage the museum objects due to light exposure. *Lighting Research & Technology* 1996, 28 (1): 1-9.
- [2] International Commission on Illumination. Control of damage to museum objects by optical radiation. CIE Publication 157, Vienna: CIE, 2004. ISBN 978 3 901906 27 5
- [3] Del Hoyo-Melendez J. An evaluation of daylight distribution as an initial preventive conservation measure at two Smithsonian Institution Museums, Washington DC, USA. *Journal of Cultural Heritage* 12, 2011 54–64. doi: 10.1016/j.culher.2010.05.003
- [4] Balocco C, Frangioni E. Natural Lighting in the Hall of Two Hundred. A proposal for exhibition of its ancient tapestries. *Journal of Cultural Heritage* 2010, 11: 113-118.
- [5] De Graaf T. Sustainable lighting of museum buildings, *Renewable Energy* 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.11.035.
- [6] Wilson M. Lighting in museums: Lighting interventions during the European demonstration project. Energy efficiency and sustainability in retrofitted and new museum buildings (NNES-1999-20), Vol. 25, No. 3–4, 2006, 153–169
- [7] Michalski S. The Lighting Decision. In, *Fabric of an Exhibition Preprints of Textile Symposium 97*. Ottawa: Canadian Conservation Institute, 1997, (pp. 97-104). <http://ncptt.nps.gov/wp-content/uploads/1998-31.pdf>
- [8] Saunders D, Kirby J. Wavelength dependent fading of artists pigments. In *International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works* 1994, 190–194.
- [9] Iacomussi P, Rossi G. Influence of visible radiation on radiometric properties of paints. *Surface Engineering*, 2008, 24(2), 90–97. <http://dx.doi.org/10.1179/174329408X298120>
- [10] Hilbert G. Zur Beleuchtung musealer exponate. *Restaurio*, 1991, 5: 313–321.
- [11] Lighting Research Center. Museum lighting protocol project. *Archeology and Collection Series* 1998 1-38. <http://ncptt.nps.gov/wp-content/uploads/1998-31.pdf>
- [12] Justus C. A model for solar spectral irradiance and radiance at the bottom and top of a cloudless atmosphere. *J. of Climate and Applied Meteorology* 1984, 24: 193-205.
- [13] Web information Satel. Retrieved 10 May 2013, from <http://www.satel-light.com/indexeS.htm>

Mathematical model for optimizing damage and colour fidelity in museum illumination

*Daniel Vázquez Moliní, Antonio Álvarez Fernández-Balbuena, Berta García-Fernández
Universidad Complutense de Madrid, Paola Belloni, University Furtwangen*

Abstract

Heritage preservation and exhibition of art goods are social, cultural and economic needs that show opposing requirements. The intelligent use of new light sources should allow the development of systems that combine both requirements and allow to make these art goods available to the next generations according to sustainability principles. The goal of this research is to develop light systems and sources with an optimized spectral distribution. The optimization implies to maximize the color fidelity reproduction and the same time to minimize the photochemical damage. In this way the perceived color under these sources will be similar (metameric) to technical requirements given by the restoration team uncharged of the conservation and exhibition of the goods of art. On the other hand, depending of the fragility of the exposed art objects (i.e. spectral responsivity of the material) the irradiance must be kept under a critical level. Therefore, it is necessary to develop a mathematical model that simulates with enough accuracy both the visual effect of the illumination and the photochemical impact of the radiation. Spectral reflectance of a reference painting (The woman in blue of Picasso) has been measured with a high resolution non-contact spectrophotometer. A light source has been modeled as four LEDs (red, green, blue and amber), those intensity will be varied from 0 to 100. The mathematical model is based on a merit function that optimized the individual intensity of the LED-light sources taking into account the damage function of the material and color space coordinates. Moreover the algorithm used weights for damage and color fidelity in order to adapt the model to a specific museal application.

Mathematical model for optimizing damage and colour fidelity in museum illumination

*Daniel Vázquez Moliní, Antonio Álvarez Fernández-Balbuena Berta García-Fernández
Universidad Complutense de Madrid, Paola Belloni, University Furtwangen*

Summary

Heritage preservation and exhibition of art goods are social, cultural and economic needs that show opposing requirements. The intelligent use of new light sources should allow the development of systems that combine both requirements and allow to make these art goods available to the next generations according to sustainability principles. The goal of this research is to develop light systems and sources with an optimized spectral distribution. The optimization implies to maximize the color fidelity reproduction and the same time to minimize the photochemical damage. A mathematical model is developed based on a merit function that simulates with enough accuracy both the visual effect of the illumination and the photochemical impact of the radiation. Moreover the algorithm used weights for damage and color fidelity in order to adapt the model to a specific museal application.

1 Introduction

All the countries of the European Union have a very important world heritage which must be preserved for future generations, but at the same time they must develop and provide the necessary resources to make possible that today's and tomorrow's citizens enjoy its beauty. Lighting is one of the most important factors to appreciate the artistic and historical elements but it should be very well controlled since electromagnetic radiation can damage the exposed art material (1). These two aspects, on one hand the preservation and on the other the exhibition, require frequently different and even opposite actions. The conservation intends to avoid all possible damage, during the exposition however artifacts suffer degradation. The control of light is so far based on certain regulations and guidelines, such as those contained in the CIE 157:2004 or IESNA 1996 (2,3). Nowadays an advanced lighting system based on LED can change its output flux and its spectral distribution (4-8). The main objective of this work is to develop a method for optimizing the spectral distribution taking into account the colour reproduction of an specific art good and the damage due to visible radiation. An example of the proposed method will be showed for the paint of Picasso Woman in Blue.

2 Method for spectral distribution optimization

The proposed method try to improve the spectral distribution of the light source which will be used to illuminate a specific paint taking into account the fidelity of colour reproduction and the damage that this light source can cause. Therefore both the colour reproduction and the damage are specific for this unique paint and these two parameters will be evaluated using spectral reflectance of the paint with the required resolution.

2.1 Previous work

“Woman in blue” is an emblematic painting by Picasso with an interesting story. The painting needed a restoration as it was a long time since it was discovered and was first restored in the 1940s. The aim of this restoration was to recover the original faithful image. Besides many other analysis techniques, spectral measuring with a non-invasive technique along with colorimetric analysis of the painting has been performed. This was done in order to evaluate the visible result of the restoration process and as a control tool for future changes. A 140-point matrix has been used as a control to evaluate the spectral reflectance changes in the restoration process. An analysis of the spectral reflectance by the principal components has been carried out (9).



Fig.1.- Woman in blue Pablo Picasso 1901.

2.1.1 Description of the Models

In order to obtain an accurate evaluation of spectral distribution of light source it is necessary to define the main parameters which are relevant for the final objective. Therefore, the procedures described in the following have been used: Spectral reflectance Characterization, Colour reproduction analysis, Spectral Damage model, Optimization Algorithm definition.

2.1.2 Spectral reflectance characterization

Spectral characterization of a paint is a powerful tool in order to evaluate its conservation status and the perceived effect of the restoration process and therefore it is frequently measured in many paints. I. At the end of a restoration process, the spectral reflectance is a very important tool to evaluate the visible results. In the restoration process of the painting “Woman in blue”, the currently existing varnish layer should be removed. Therefore, the spectral information about this coat was most important for the curator to take the final decision whether applying a new varnish layer, and what kind of varnish to use (10). The painting spectral reflectance was measured with a PR 655-spectrascan spectrophotometer

in a rectangular matrix of 14 rows by 10 columns. The Lighting system and the spectrophotometer were set up in front of the painting, moved by a x,y lineal, computer-controlled motor. The lighting system was composed of a Köhler projector with an incandescent lamp at 6500K color temperature which only lighted a square of 15 x10 cm. This Color temperature was selected in order to get enough blue spectral radiance. A diaphragm was mounted in the projection system to reduce the energy irradiation onto the painting. A calibrated reference white (Spectralon by Labsphere) was placed on the same plane as the painting, and it was measured after completing each column.

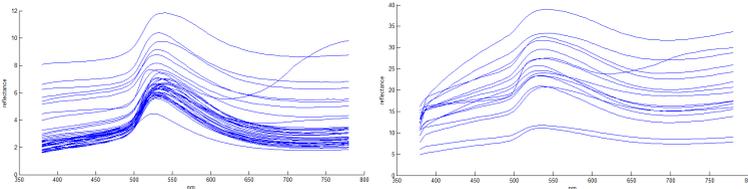


Fig.2.- Measured reflectances for two areas: Green background (left) and Green ribbon trimming of the skirt (right).

2.1.3 Colour reproduction analysis

In order to evaluate colour reproduction the first step is to define what are the ideal conditions, is to say what is the ideal light source for seeing the paint. It is a very difficult decision since there are many criteria with very different results. So, for example, sometime it can be indicated to use the same light source as the artist used (11), or sometimes it can be better to use the light source with higher gamut volume or others (12). Colour was evaluated with CIELab space (13). For doing this first was to calculate point to point the Lab coordinates of the selected matrix points using the spectral reflectance $\rho(\lambda)_{i,j}$ of the paint and the

Spectral distribution curve of objective illuminant $S_o(\lambda)$. When the system calculate an SPD for a processed illuminant $S_p(\lambda)$ this will have another L'a'b' coordinates. The distance between both coordinates will be the colour distance which will be used in the algorithm.

$$\Delta E = \sqrt{(L' - L)^2 + (a' - a)^2 + (b' - b)^2}$$

It is important to take into account that the magnitude of any colour difference can be represented by a vector, which is indicated by the symbol ΔE , and takes account of the changes on all three dimensions. The scales of the three dimensions have been so chosen that when the colour difference is just discernible in aside-by-side comparison, ΔE has a value of one since in this condition the human eye is a very responsive discriminator. This will be a very important in a function of the optimization algorithm.

2.1.4 Spectral Damage Model

The spectral damage model is based on methodology proposed by CIE (14,15). Responsivity of material can have high variations levels mainly when spectral behaviour is taking into account

And frequently used materials have been studied in deep. In the CIE method since the visual effect is analysed in colour reproduction analysis, the damage model is developed using only absorbed energy in visual range from 400 to 780 nm. We have take UV-A radiation from 380 to 400 out of the calculation because nowadays most of the museum use this kind of filters. Responsivity of materials used in paint can be represented by an exponential function as

$$S_{(\lambda)} = \exp(-b(\lambda - 300))$$

which is normalized to 300nm. Although the threshold of the effective radiant exposure ($W h/m^2$), is to say, what radiation will cause a just noticeable colour change $\Delta E = 1$, can be very different, ranging from 175 to water colours on rag paper to 850 for oil Paint on canvas, the b parameter is not very different. Nevertheless in this method since all the paint will be studied as a hole is not very important a few variations of b parameter, since it has a role like a scale factor in all the calculated SPD.

2.1.5 Optimization algorithm

The final, most important and difficult task is to define conservation criteria and to translate these criteria in parameters. Each one of these parameters will have its own weight in the optimization function: C_1, C_2, \dots, C_m . Optimization algorithm must use two different information data: one is about colour reproduction and other is about damage. The system calculate, with required resolution, the colour and damage for all the points of the Paint. Depending on the type of light source used, its the spectral distribution can be modelled by parameters $k: k_1, k_2, \dots, k_n$. Algorithm start with a specific spectral distribution which is defined by seed parameters. Then system calculates point by point, using the spectral reflectance the colour in CIELab coordinates, using the absorptance the damage associated with that illuminant. When all the points have been calculated then the algorithm uses weight parameters in order to evaluate how good is the calculated SPD. Then using Nelder-Mead the algorithm (16) takes a decision about how to change parameters k_i . (Fig.2)

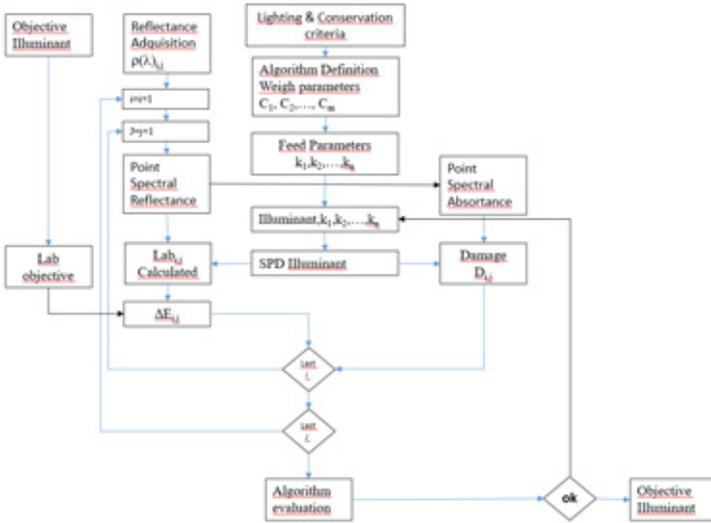


Fig.2.- Logic diagram of algorithm

After a number of reiterations or when the solution is stable the algorithm end and give us the vector with k_i parameters which are the final solution.

3 Results: Application to a Picasso paint

The optimisation algorithm has been applied to the paint “Woman in blue”. In this case the Reflectance matrix is a 14 x 10 matrix with spectral step of 4 nm. The spectral power distribution of the LED red, amber, green and blue, which are been used in this test is showed in figure 3.

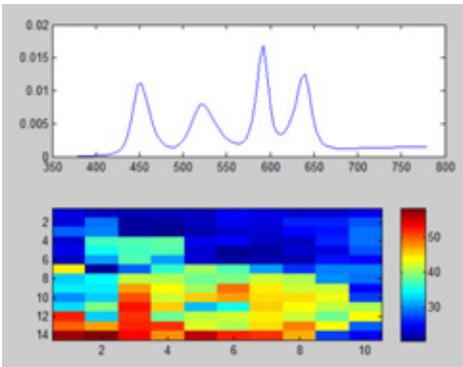


Fig.4.- upper) spectral distribution of seed, lower) $\square E$ in CIE Lab units.

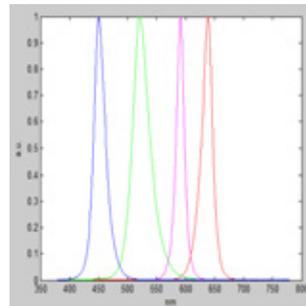


Fig.3.- Normalized spectral distribution of LED

In our optimisation the seed parameters give the initial spectral distribution of light source, which is showed in figure 4.

In the lower part of this figure distance CIELab ΔE between the paint lighted with objective source and seed source is showed. The average ΔE is around 40. During the optimisation process the algorithm continues to improve the merit function. The objective of the process is to reduce as much as possible damage factor a colour distance. Figure 5 shows how the damage factor evolves .

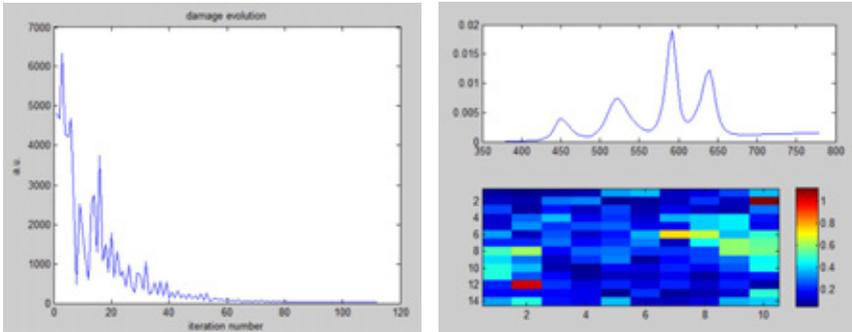


Fig.5.- Evolution of Damage factor in the calculation process (left), spectral distribution of final light source and ΔE in CIELab units (right)

At the end of the calculation process the value of the damage and ΔE are very improved. Figure 6 shows the spectral distribution of the final, optimised light source and the corresponding ΔE . In this example, ΔE is higher than 1 only in one point, which was a goal of the system, but it is in average lower than 0,5 and therefore there is not visual difference between optimized light source and the objective.

4 Discussions and Conclusions

A methodology for improving spectral distributions of light sources applied to Museums has been developed. Methodology requires the knowledge of point to point spectral reflectance. Decisions about exhibition and conservation criteria must be taken before starting the optimization program. The algorithm looks for an optimized solution where the parameters are improved applying the designed merit function. An example of the application of this algorithm to a Pablo Picasso paint has been showed.

5 References

- [1] Cuttle C. Damage the museum objects due to light exposure. *Lighting Research & Technology* 1996, 28 (1): 1-9
- [2] Illuminating Engineering Society of North America, *Museum and Art Gallery Lighting: A Recommended Practice* (IESNA, 1996).
- [3] Santiago Mayorga Pinilla, Daniel Vázquez, Antonio Álvarez Q1 Fernández-Balbuena, Carmen Murob, Javier Muñoz. Spectral damage model for lighted museum paintings: Oil, acrylic and Gouache, *Journal of Cultural Heritage* xxx (2016) xxx–xxx
- [4] Andrew Chalmers and Snjezana Soltic, Towards the OptimumLight Source Spectrum, *Advances in OptoElectronics* Volume 2010, Article ID 596825
- [5] Arūnas Tuzikas,1,* Artūras Žukauskas,1 Rimantas Vaicekavskas,2Andrius Petruelis,1 Pranciškus Vitta,1 and Michael Shur3, Artwork visualization using a solid-state lighting engine with controlled photochemical safety, *OPTICS EXPRESS*, Vol. 22, No. 14
- [6] João Manuel Maciel Linhares,* Paulo Daniel Araújo Pinto, and Sérgio Miguel Cardoso Nascimento, Colour rendering of art paintings under CIE illuminants for normal and colour deficient observers, *J. Opt. Soc. Am. A/Vol. 26*, No. 7/July ,pp1668-1677,2009
- [7] R.S.Berns, Rejuvenating the Appearance of Cultural Heritage Using Colour and Imaging Science Techniques, *AIC Colour* 05
- [8] A.Tuziksa, Artwork visualization using a solid-state lighting engine with controlled photochemical safety, Vol. 22, No. 14, *Opt. Express* (2014)
- [9] Technical report MUJER EN AZUL, PABLO PICASSO. RESTAURACIÓN DEL MUSEO REINA SOFIA. <http://www.museoreinasofia.es/sites/default/files/colecciones/restauracion/informe-mujerazul.pdf>
- [10]R.S.Berns, Exploring the optical properties of picture varnishes using imaging techniques, *Studies in Conservation*, Vol. 48, No. 2 (2003), pp. 73-82.
- [11]Santiago Mayorga Pinilla, Daniel Vazquez Molini, Antonio Alvarez Fernandez-Balbuena, Gabriel Hernandez Raboso, Juan Antonio Herraes, Marta Azcutia, Angel Garcia Botella, Advanced daylighting evaluation applied to cultural heritage buildings and museums: Application to the cloister of Santa Maria El Paular, *Renewable Energy* 85 (2016) 1362e1370
- [12]João Manuel Maciel Linhares, Paulo Daniel Araújo Pinto, and Sérgio Miguel Cardoso Nascimento, Colour rendering of art paintings under CIE illuminants for normal and colour deficient observers, *J. Opt. Soc. Am. A/Vol. 26*, No. 7/July 2009
- [13]COLOURIMETRY,CIE 15: 2004
- [14]Control of damage to museum objects by optical radiation, CIE 157:2004,
- [15]On the deterioration of the exhibited museum objects by optical radiation, CIE 89/3 1991
- [16] JA Nelder, R Mead , A simplex method for function minimization, *The computer journal*, vol 7, pp 308-313, 1965

LED-Beleuchtung für Mensch und Tier in einem Milchviehstall unter Berücksichtigung der biologischen Wirksamkeit

Dipl.-Ing. (FH) Daniel Werner, Fachhochschule Bielefeld, FB IuM, FSP ITES

Dipl.-Ing. (FH) Michael Schneider, Fachhochschule Bielefeld, FB IuM, FSP ITES

M. Sc. Maïke Müller, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Prof. Dr. Eva Schwenzfeier-Hellkamp, Fachhochschule Bielefeld, FB IuM, FSP ITES

Prof. Dr. Klaus Reiter, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Problemstellung

Die Lichtbedingungen in einem Milchviehstall müssen das Sehvermögen von Mensch und Rind berücksichtigen. Licht besitzt als Zeitgeber eine essentielle Funktion für Mensch und Tier. Steht es zur richtigen Tageszeit in der angemessenen Menge und der richtigen spektralen Zusammensetzung zur Verfügung, wirkt es sich positiv auf das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit aus. Erhöhte Anforderungen an eine Leuchte werden durch die Schadgasbelastung, die Feuchtigkeit sowie ein erhöhtes Schmutzaufkommen gestellt. Eine bundesweit durchgeführte Befragungsaktion zeigte zusätzliche Anforderungen und Wünsche der Landwirte in Bezug auf die Beleuchtungssituation im Milchviehstall.

Ziel

Ziel des aktuellen Forschungsvorhabens I_LED_Milchvieh (Intelligente LED-Leuchte für die Funktionsbereiche „Fressen“, „Liegen“ und „Laufen“ in der Milchviehhaltung; Förderung erfolgt aus Mitteln des Zweckvermögens des Bundes bei der Landwirtschaftlichen Rentenbank) ist eine angepasste Beleuchtung für Mensch und Tier zur Steigerung von Wohlbefinden, Gesundheit und Produktivität sowie zur Förderung von Arbeitssicherheit und -komfort. Im Weiteren wird die Steigerung der biologischen Wirksamkeit durch zusätzliche Blauanteile in der künstlichen Beleuchtung untersucht.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Entwickelt wurde eine Leuchte mit sowohl weißen LEDs (*Farmers White*) als auch mit einer Mischung aus weißen und blauen LEDs (*Cow White*). Erfasst wird das Tierverhalten in Bezug auf unterschiedliche Beleuchtung mittels kontinuierlicher Videoüberwachung und Aktivitätserfassung. Zusätzlich erfolgt eine Akzeptanzerfassung und Bewertung der Beleuchtungssituation im Milchviehstall durch die Auszubildenden sowie das Stallpersonal des Versuchs- und Bildungszentrums Landwirtschaft Haus Düsse.

Realisierungsgrad

Die lichttechnischen Vermessungen der Leuchten im Labor sowie in der Stallumgebung wurden erfolgreich abgeschlossen. Die Versuchsdurchführung der LED-Hauptversuchsphase sowie zweier Kontrollversuchsphasen mit NAV-Beleuchtung begann im Anfang November und endet Anfang März 2016.

LED illumination for humans and animals in a dairy barn regarding to biological effectiveness

Dipl.-Ing. (FH) Daniel Werner, Bielefeld University of Applied Sciences, Faculty of Engineering and Mathematic, Research program ITES

Dipl.-Ing. (FH) Michael Schneider, Bielefeld University of Applied Sciences, Faculty of Engineering and Mathematic, Research program ITES

M. Sc. Maïke Müller, Bavarian State Research Center for Agriculture, Institute for Agricultural Engineering and Animal Husbandry

Prof. Dr. Eva Schwenzfeier-Hellkamp, Bielefeld University of Applied Sciences, Faculty of Engineering and Mathematic, Research program ITES

Prof. Dr. Klaus Reiter, Bavarian State Research Center for Agriculture, Institute for Agricultural Engineering and Animal Husbandry

Issue

Light conditions in a dairy barn have to take account to the human's and cattle's visual capacities. Lighting has an essential function as a circadian pacemaker for animals and human beings and it has a positive effect on well-being and efficiency when there is enough lighting at the right time with the right spectral composition. LED lights in a dairy barn have tough demands because of increased gas pollution, moisture and contamination. A nationwide survey shows additionally farmer requirements regarding to lighting situation in a dairy barn.

Aim

The objective of the research project "I_LED_Milchvieh" (smart LED-lighting of the functional areas "feeding", "lying" and "walking" in the dairy husbandry; supported by funds of the German Government's Special Purpose Fund held at Landwirtschaftliche Rentenbank) is to develop a smart LED light for human beings and animals to increase well-being, physical health and productivity and to promote occupational safety and working comfort. Besides, blue light is implemented in the artificial lighting to analyze the biological effectiveness.

Description of the innovation/»best practice«

The LED light was developed with white LEDs (*Farmers White*) and with a combination of white and blue LEDs (*Cow White*). Regarding different illumination, the animal behavior is analyzed by a permanent video and activity monitoring. Additionally, the acceptance and evaluation of the lighting situation in the dairy barn has been made by apprentices and staff of the Agricultural Center "Haus Düsse".

Level of realization

The technical light measurement was successful in the laboratory and in the dairy barn. The main experiment with the LED light and two control experiments with high-pressure sodium vapour lamps began in November 2015 and ended in March 2016.

LED-Beleuchtung in einem Milchviehstall unter Berücksichtigung der biologischen Wirksamkeit

Dipl.-Ing. (FH) Daniel Werner, Fachhochschule Bielefeld, FB IuM, FSP ITES

Dipl.-Ing. (FH) Michael Schneider, Fachhochschule Bielefeld, FB IuM, FSP ITES

M. Sc. Maike Müller, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Prof. Dr. Eva Schwenzfeier-Hellkamp, Fachhochschule Bielefeld, FB IuM, FSP ITES

Prof. Dr. Klaus Reiter, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Zusammenfassung

Licht ist unerlässlich für Mensch und Tier. Das „richtige Licht“ wirkt sich positiv auf das Verhalten und Wohlbefinden aus. In vielen Milchviehställen ist keine ausreichende Beleuchtung vorhanden. Bei der Gestaltung der Beleuchtung von Rinderställen sind die Berücksichtigung des Sehvermögens von Mensch und Rind sowie der Lichtwirkung auf das Tier elementar. Eine neue LED-Leuchte mit einem angepassten Lichtspektrum für Mensch und Tier wird in einem Versuchsstall untersucht. Die Auswirkungen auf die Arbeit der Landwirte und das Verhalten der Tiere wird erfasst und mit der Ausgangssituation unter Natriumdampf-Beleuchtung verglichen. Sowohl bei der Befragung der Landwirte als auch bei der Verhaltensbeobachtung der Tiere konnten erste Anzeichen positiver Effekte der LED-Beleuchtung festgestellt werden.

1 Problemstellung

Licht wird von Mensch und Tier zum Sehen und zur Steuerung der inneren Uhr benötigt [Pho16]. Steht es zur richtigen Tageszeit in der angemessenen Menge und der richtigen spektralen Zusammensetzung zur Verfügung, beeinflusst es die Gesundheit, das Wohlbefinden sowie die Leistungsfähigkeit positiv [Jan00]. Zudem benötigt der Mensch ausreichend Licht für die Arbeitssicherheit und den -komfort. Die Tiere benötigen im Weiteren ausreichend Licht zur Orientierung, zur Steuerung des Tag-Nacht-Rhythmus und der Fruchtbarkeit.

Im Milchviehstall werden durch die Schadgasbelastung, die Luftfeuchtigkeit sowie ein verstärktes Schmutzaufkommen erhöhte Anforderungen an die Stallbeleuchtung gestellt. Zusätzlich kann durch die unterschiedliche Lichtwahrnehmung und -wirkung von Mensch und Tier nur eine bedarfsorientierte Beleuchtung als Kompromiss umgesetzt werden.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Für eine optimale Beleuchtung im Milchviehstall ist ein fundiertes Wissen über das Sehvermögen der Kuh essentiell. Rinder besitzen ein sehr weites Gesichtsfeld von 330°, da ihre Augen lateral am Kopf liegen. In nur 30° dieses Bereiches ist dreidimensionales Sehen möglich [Gra97] [Win09]. Im Vergleich zum Menschen ist die Sehschärfe um ein Drittel reduziert und nur im Nahbereich kann scharf gesehen werden, da die Eigenschaft, durch Linsenverformung zu fokussieren, fehlt [Bou01]. Rinder verfügen über ein sehr gu-

tes Dämmerungssehen, da die vorhandene reflektierende Schicht (*Tapetum lucidum*) das eintreffende Licht durch Reflektion verstärkt [Win09]. Die Anpassung an unterschiedlich helle Umgebungen (Adaptation) erfolgt deutlich langsamer als beim Menschen [Smi09] [Ryb89]. Daher sollte der Stall sehr gleichmäßig ausgeleuchtet und Schattenbildung reduziert werden. Rinder haben ein gutes Auflösungsvermögen für Bewegungen. Sie sehen bis zu 60 Bilder pro Sekunde [Kol84]. Es ist daher nicht vorteilhaft, wenn die Leuchten gepulst gedimmt werden (Frequenz < 60 Hz), da die Tiere das Flimmern wahrnehmen würden. Das Farbsehen ist eingeschränkt, da Rinder Dichromaten sind, also nur zwei verschiedene Zapfentypen besitzen. Der S-Zapfen besitzt eine maximale Sensitivität im Bereich von 455 nm, der M/L-Zapfen bei 554 nm [Jac98].

Neben der Bedeutung für das Sehen hat Licht einen großen Einfluss auf den circadianen Rhythmus, die Fruchtbarkeit und die Produktivität der Tiere. Der Melatoninspiegel sollte tagsüber gering und in der Nacht hoch sein [Dah00]. Vermutlich bewirkt der blaue Anteil des Spektrums die effektivste Suppression der Melatoninbildung, wie das auch beim Menschen der Fall ist [Bra01]. Lawson und Kennedy [Law01] stellten fest, dass bei Holstein-Färsen die Melatoninproduktion ab einer Beleuchtungsintensität von 200 lux über einen längeren Zeitraum unterdrückt werden konnte. Allerdings reichten bereits 50 lux aus, um den Melatoninanstieg zu verzögern. Studien zur Wirkung der spektralen Zusammensetzung des Lichts beim Rind fehlen derzeit. In einer norwegischen Studie wurden die Produktivität und die Fruchtbarkeit von Norwegischem Rotvieh während des Winters bei unterschiedlicher Beleuchtung untersucht. Reksen et al. [Rek99] fanden Verbesserungen in vielen Fruchtbarkeitsparametern durch Beleuchtungsdauern von über 12 Stunden.

3 Forschungshypothese

Ein Lichtspektrum mit erhöhten Blauanteilen und eine gleichmäßige Ausleuchtung des Stalles wirken sich positiv auf das Verhalten von Milchkühen und den Arbeitskomfort von Landwirten aus.

4 Versuchsaufbau und Forschungsmethodik

Für die Umsetzung einer Leuchte mit tier- und menschengerechtem Lichtspektrum wurde im Forschungsvorhaben I_LED_Milchvieh (Intelligente LED-Leuchte für die Funktionsbereiche „Fressen“, „Liegen“ und „Laufen“ in der Milchviehhaltung; Förderung erfolgt aus Mitteln des Zweckvermögens des Bundes bei der Landwirtschaftlichen Rentenbank) eine Stalleuchte bestehend aus einer Kombination von weißen LEDs (*Farmers White*) und einer Mischung von weißen und blauen LEDs (*Cow White*) optimiert und mit dem Industriepartner DeLaval weiterentwickelt.

Als Testumgebung wurde ein Liegeboxenlaufstall mit 21 Hochboxen, 18 Tiefboxen sowie einem 1:1 Fressplatz- zu Liegeboxenverhältnis auf dem Versuchs- und Bildungszentrum Landwirtschaft Haus Düsse gewählt. Die Fütterung der Tiere erfolgte durch ein halbautomatisches Fütterungssystem. Der Melkvorgang wurde vollautomatisch durch einen Melkroboter (AMS: automatisches Melksystem) übernommen. Für den Versuch erfolgte eine Auswahl von 15 Fokustieren, die mit ALT-Pedometer (Aktivität, Liegezeit und Temperatur) ausgestattet und per Videoerfassung überwacht wurden. Wesentliches Auswahlkriterium der Tiere war, dass diese sich während der gesamten Versuchszeit im Liegeboxenlaufstall befanden und entsprechend zum Versuchsende nicht mehr als 300 Laktationsta-

ge vorlagen. Zum Versuchsstart befanden sich die ausgewählten Tiere zwischen der 1. und 6. Laktation und wurden bereits zwischen 55 Tagen und 196 Tagen gemolken. Die Versuchsdauer wurde mit 102 Tagen geplant.

Im ersten Untersuchungszeitraum wurde der Stall mit der ursprünglich installierten Natriumdampfbeleuchtung (NAV) illuminiert. Nach einer Wartung der Beleuchtungsanlage wurde eine durchschnittliche horizontale Beleuchtungsstärke von 137 lx in 0,2 m Bewertungshöhe mit einer Gleichmäßigkeit g_1 (E_{\min} zu E_{\max}) von 0,16 messtechnisch erfasst. Im zweiten Versuchszeitraum konnten mit der neu entwickelten LED-Leuchte eine mittlere Beleuchtungsstärke von 158 lx mit einer Gleichmäßigkeit g_1 von 0,56 gemessen werden. Abgeschlossen wurde der Versuch mit einer dritten Phase, in der als Kontrolle erneut mit der Ursprungsbeleuchtung illuminiert wurde. Gesteuert wurde die Beleuchtung über eine Zeitschaltuhr sowie einen Dämmerungsschalter. Als Einschaltzeit der Beleuchtungsanlage wurde 06:00 Uhr und als Ausschaltzeit 22:00 Uhr vorgegeben. Während der Nacht wurde nur eine Orientierungsleuchte in unmittelbarer Umgebung des AMS, über alle Versuchsphasen hinweg, einschaltet.



Abb. 1: Versuchsstall mit ursprünglicher NAV- (links) und neuer LED-Beleuchtung (rechts)

Abb. 2: Neu entwickelte LED-Leuchte mit einer Kombination von weißen LEDs (*Farmers White*) und einer Mischung von weißen und blauen LEDs (*Cow White*)

Das Empfinden des Menschen konnte durch zwei Befragungsaktionen bei unterschiedlichen Beleuchtungssituationen ermittelt werden. Zum Ende der LED- und der Kontrollphase wurden jeweils die Mitarbeiter des Rinderbereichs sowie die Auszubildenden des Versuchs- und Bildungszentrums Landwirtschaft Haus Düsse, insgesamt 13 Personen, die regelmäßig im Stall arbeiten, befragt.

Für die Beurteilung des Verhaltens der Tiere wurde die Methodik der Verhaltensbeobachtung gewählt. In der Stallumgebung wurden dazu Erfassungsmedien zur Überwachung des Tierverhaltens installiert. Anhand der Analyse verschiedener Verhaltensparameter der Tiere wurde die Wirkung des Lichts auf das Verhalten der Tiere erfasst. Aktivitäts- und Ruhephasen wurden mittels ALT-Pedometern festgehalten. Genaue Beobachtungen zum Sozialverhalten, zum Komfortverhalten, zum Melkverhalten und zum Fressverhalten konnten durch Kameraüberwachung während der gesamten Versuchsphasen durchgeführt werden.

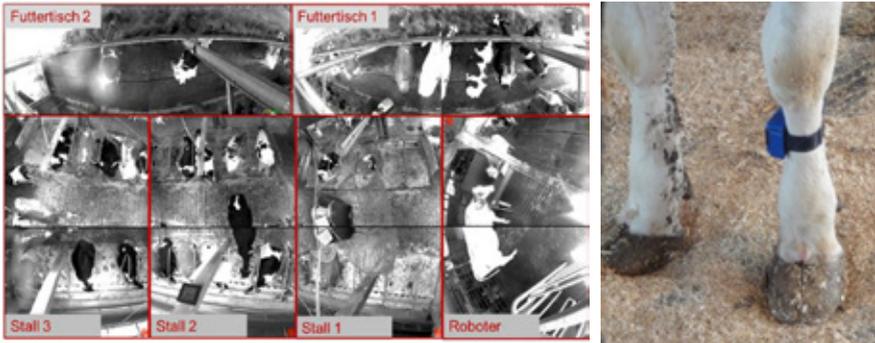


Abb. 3: Kameraaufnahmen des Videoüberwachungssystems - sechs Überwachungskameras erfassen den gesamten Stall und zeichnen durchgehend das Verhalten der Tiere auf

Abb. 4: ALT-Pedometer am Bein eines Fokustieres. Erfassung von Aktivität, Liegedauer und Temperatur

5 Ergebnisse einer Befragungsaktion

Der Vergleich zwischen der aktuellen Beleuchtungssituation mit NAV und der neuen LED-Beleuchtung wurde durch eine Befragung der im Versuchsstall arbeitenden Leute möglich. Die Beleuchtungssituation LED wurde dabei mit „gut“ und die Beleuchtungssituation NAV mit „ausreichend“ bewertet.

Auf die Fragestellung „Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als positiv?“, wurde bei der LED Beleuchtung vermehrt die Helligkeit und Beleuchtungsintensität, die Farbwahrnehmung sowie die Gleichmäßigkeit benannt. In der späteren Befragung unter Natriumdampfbeleuchtung wurden als positive Gesichtspunkte das „warme Licht“ und der „gemütliche“ Eindruck aufgeführt.

Auf die Fragestellung „Was empfinden Sie an der Beleuchtungssituation als negativ?“ gaben die Befragten bei der LED-Beleuchtung Blendung, Farbwahrnehmung sowie die Optik und Anschaffungskosten als Antwort zurück. Unter der Natriumdampfbeleuchtung wurde verstärkt die Helligkeit und Beleuchtungsintensität kritisiert. Als weitere Negativaspekte wurden die beeinträchtigte Farbwahrnehmung sowie die Gleichmäßigkeit benannt.

6 Erste Ergebnisse der Verhaltensbeobachtungen

Die tägliche Liegedauer von 15 Tieren wurde über die jeweilige Beleuchtungsphase des Versuchs gemittelt (Abb. 5a). Die Tiere lagen im Mittel in der ersten Natriumdampf-Phase 8,4 Stunden am Tag. Die mittlere Liegedauer erhöhte sich auf 9,6 Stunden je Tag in der LED-Phase und auf 9,8 Stunden je Tag in der zweiten Kontroll-Phase unter Natriumdampf-Beleuchtung. Die Erhöhung der Liegedauer mit der neuen LED-Beleuchtungssituation könnte teilweise auf die positive Lichtwirkung des geänderten Spektrums zurückgeführt werden.

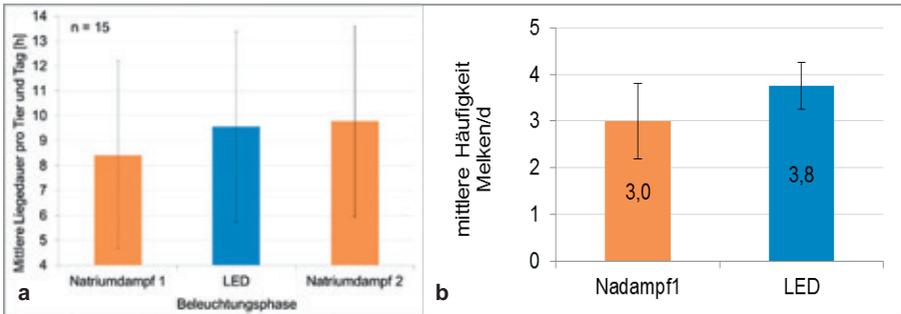


Abb. 5a: Mittlere Liegedauer pro Tier und Tag in Stunden - dargestellt ist der Mittelwert der Liegedauer aus den Pedometerdaten über 15 Fokustiere in den drei Versuchsphasen

Abb. 5b: Mittlere Häufigkeit der Melkungen pro Tag in den Versuchsphasen auf Einzeltierbasis. Ausgewertet wurde anhand der Videoaufzeichnungen mithilfe von Verhaltensbeobachtungssoftware Interact. Je Versuchsphase (Natriumdampfbeleuchtung = Nadampf1 bzw. LED-Beleuchtung = LED) wurden vier Tage (96 h Videomaterial) analysiert.

Die Tiere wurden in einem automatischen Melksystem (AMS) von Lely gemolken, zu welchem sie freien Zugang hatten. Die Zwischenmelkzeit war auf fünf Stunden eingestellt, d.h. eine Kuh konnte maximal 4,8 Melkungen pro Tag erreichen. Das Einzeltier zeigte im Mittel 0,8 Melkungen mehr je Tag in der LED-Phase als in der Kontrollphase unter Natriumdampfbeleuchtung (Abb. 5b). Hintergrund der häufigeren Melkungen könnte eine Aktivierung des Stoffwechsels und Steigerung der Produktivität sein, wie Plaut und Casey [Pla11] darlegen. Sie nehmen an, dass die Photoperiode über sogenannte *Clock*-Gene Einfluss auf den endokrinen Status der Tiere hat und folglich die Milchproduktion beeinflussen kann [Pla11]. Auch eine Veränderung des biologischen Rhythmus` könnte zu regelmäßigerem Melken führen.

Fazit

Die Befragung des Stallpersonals des Versuchsstalls ergab erste Hinweise auf einen positiven Eindruck der LED-Beleuchtung. Auch die Untersuchungen des Tierverhaltens weisen auf positive Effekte der LED-Beleuchtung hin. Dazu sind weitere Untersuchungen notwendig.

Literaturverzeichnis

- [Bou01] Bouissou, M.F., Boissy A., Le Neindre P., Veissier I.: The social behavior of cattle. In: Social Behaviour in Farm Animals. Hrsg.: Keeling L.J. und H.W. Gonyou, CAB International Wallingford, Oxon, New York, 113-145, 2001
- [Bra01] Brainard G. C., Hanifin J. P., Greeson J. M., Byrne B., Glickman G., Gerner E., Rollag M. D.: Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor, *The Journal of Neuroscience* 21, 6405-6412, 2001
- [Dah00] Dahl G. E., Buchanan B. A., Tucker H. A.: Photoperiodic Effects on Dairy Cattle: A Review, *Journal of Dairy Science* 83, 885-893, 2000
- [Gra97] Grandin T.: The design and construction of facilities for handling cattle, *Livestock Production Science* 49, 103-119, 1997
- [Jac98] Jacobs G. H., Deegan II J. F., Neitz J.: Photopigment basis for dichromatic color vision in cows, goats, and sheep, *Visual Neuroscience* 15, 581-584, 1998
- [Jan00] Janni K.: Lighting Dairy Facilities, University of Minnesota, Minnesota, 2000
- [Kol84] Kolb E.: Vom Leben und Verhalten unserer Haustiere, S. Hirzel Verlag, Leipzig, 1984
- [Law01] Lawson T. A., Kennedy A. D.: Inhibition of nighttime melatonin secretion in cattle: threshold light intensity for dairy heifers, *Canadian Journal of Animal Science* 81, 153-156, 2001
- [Løv15] Løvendahl P., Munksgaard L.: An investigation into genetic and phenotypic variation in time budgets and yield of dairy cows, *Journal of Dairy Science* 99, 408-417, 2015
- [Pho16] Photonik Forschung Deutschland, VDI Technologiezentrum GmbH (Hrsg.): Gesund durch besseres Licht, Pressemitteilung vom 26.06.2015 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), <https://www.bmbf.de/de/gesund-durch-besseres-licht-1162.html>, letzter Zugriff 01.02.2016
- [Pla11] Plaut K., Casey T.: Does the circadian system regulate lactation? *Animal* 6:3, 394-402, 2011
- [Rek99] Reksen O., Tverdal A., Boe K. E., Ropstad E.: Effect of photointensity and photoperiod on milk yield and reproductive performance of Norwegian red cattle, *Journal of Dairy Science* 82, 810-818, 1999
- [Ryb89] Ryba N., Uhl R.: In vitro dark adaptation and preservation of electrical light responses in the retina from bovine eyes, *Experimental Brain Research* 74, 618-624, 1989
- [Smi09] Smith J. D., Greenlee J. J., Hamir A. N., Richt J. A., West Greenlee M. H.: Retinal Function and morphology Are Altered in Cattle Infected with the Prion Disease Transmissible Mink Encephalopathy, *Veterinary Pathology* 46, 810-818, 2009
- [Win09] Winckler C.: Nutztierethologie, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, Hohenheim, 2009

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

Funke, C., Schierz, Ch.

TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau, D

Problemstellung und Forschungsfragen

In der Innenbeleuchtung hat sich das Unified Glare Rating Verfahren (UGR-Verfahren) zur Bewertung der psychologischen Blendung durchgesetzt. Strukturierte LED-Leuchten können jedoch nicht mit dem UGR-Verfahren bewertet werden, da sich die Bestimmung der leuchtenden Fläche in der Praxis schwierig gestaltet.

Stand der Wissenschaft/Technik

Die CIE-Schrift 117 zum UGR-Verfahren schlägt verschiedene feste Leuchtdichteschwellen zur Bestimmung der leuchtenden Fläche von Leuchtstofflampenleuchten vor. Ebenfalls für derartige Leuchten wurde von WOLF [vgl. LiTG-Publikation 20:2003; Dissertation S. Wolf 2004] ein adaptives Verfahren basierend auf der Leuchtdichteverteilung im Raum vorgeschlagen. Für LED-Leuchten existiert bisher keine Schwellendefinition. Von HARA [Hara auf CIE-Tagung 2015] wurden für LED-Leuchten ein Korrekturfaktor zur Bestimmung der effektiven Leuchtdichte vorgestellt. Das empirische Modell dafür muss noch validiert werden.

Forschungshypothesen

- Zur Berechnung der effektiv leuchtenden Fläche bei LED-Leuchten muss das Leuchtdichtebild der Auflösung des Auges und der rezeptiven Felder angepasst werden, da die „wahrgenommene“ Auflösung bei Blendung durch LEDs eine wichtige Rolle spielt.
- Der Korrekturfaktor nach HARA und das optimierte Verfahren zur Bestimmung der leuchtenden Fläche sind geeignet zur Blendungsbewertung von LED-Leuchten in Innenräumen.

Versuchsaufbau

Die Versuche fanden in einem büroähnlichen Raum mit einer variablen Blendquelle statt (vgl. [Funke auf Licht 2014 und CIE-Tagung 2015]). Dabei beurteilten jeweils 30 Probanden die psychologische Blendung bei verschiedenen Hintergrundleuchtdichten (42-190 cd/m²), Blendwinkeln (0° bis 30°) und Leuchtdichtestrukturen ($L_{\max}/L_{\min} = 1$ bis 1000). Insgesamt wurden 19170 Blendurteile abgegeben.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Im Wesentlichen konnten die beiden Forschungshypothesen bestätigt werden. Darüber hinaus konnte in Übereinstimmung mit anderen Wissenschaftlern festgestellt werden, dass die Leuchtdichtestruktur zwar bereits bei 30° Blendwinkel einen (geringen) Einfluss auf das Störimpfinden hat, besonders deutlich wird der Effekt aber erst bei 0°. Weiterhin wurde festgestellt, dass der Abstand der LEDs keinen Einfluss auf das Blendempfinden hat.

What is the effective luminance or effective area of non-uniform LED luminaires for discomfort glare rating with UGR?

Funke, C., Schierz, Ch.

TU Ilmenau, Lighting Engineering Group, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau, D

Research issue

In indoor lighting, the Unified Glare Rating (UGR) has been standardized for the assessment of discomfort glare. In fact, non-uniform LED luminaires cannot be rated with UGR as it is difficult to determine the luminous area in practice.

State of science/technology

In CIE report 117 on UGR, several fixed luminance thresholds for the determination of the luminous area of fluorescent lamps are suggested. Alternatively, an adaptive method for the estimation of luminance thresholds based on the luminance distribution in the room was proposed by WOLF [see LiTG publication 20:2003; Dissertation S. Wolf 2004]. In contrast, for non-uniform LED luminaires, a defined luminance threshold does not exist. However, HARA [Hara on CIE conference 2015] presented a correction factor model to calculate the effective luminance of non-uniform LED luminaires. In fact, the underlying empirical model still needs to be validated.

Research hypotheses

- In order to calculate the effective luminous area of LED luminaires, the luminance picture has to be adapted due to the resolution of the eye and the receptive fields, because the 'perceived' resolution has an important impact on discomfort glare.
- The correction factor according to HARA and the optimised procedure for the determination of the luminous area are both suitable for discomfort glare rating of LED luminaires in indoor environments.

Experimental setup

The experiments were conducted in an office-like room with a variable glare source (see [Funke at Licht 2014 and CIE conference 2015]). Within the tests, 30 subjects rated discomfort glare at various background luminances (42 to 190 cd/m²), glare angles (0° to 30°) and luminous patterns ($L_{\max}/L_{\min} = 1$ to 1000). All in all, 19,170 glare assessments has been taken.

Results in comparison with previous findings

Basically, both research hypotheses could be verified. Moreover, in agreement with other scientists, we observed, that the luminous pattern already had a (small) impact on perceived glare, but the effect was considerably high at direct view into the luminaire. Furthermore, the distance of LEDs inside the luminaire had no significant effect on discomfort glare in this study.

What is the effective luminance or effective area of non-uniform LED-luminaires in discomfort glare rating with UGR?

Funke, C., Schierz, Ch.

TU Ilmenau, Lighting Engineering Group, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau, D

Abstract

Since LED light spots usually are smaller than 0.0003 sr for typical indoor distances, luminaires with visible LED cannot be rated with Unified Glare Rating (UGR). In order to determine the impact of the luminous structure of the glare source on the subjective discomfort appraisal, we conducted a psychometric study. In this study it could be found that the luminous structure of non-uniform luminaires has an impact on the subjective discomfort appraisal. Especially the luminance of the relatively dark parts of the luminaire affects the subjective discomfort assessment and the average luminance of the glare source. Basically, both the effective luminous area and the effective luminance method are suitable to assess discomfort glare of non-uniform LED luminaires.

1 Introduction

In indoor lighting applications the UGR method has been standardised for the assessment of discomfort glare. It has been developed for glare source sizes ranging from 0.0003 sr to 0.1 sr [1]. In the UGR formula (1), the main impacts on discomfort are the number of glare sources n , the average luminance of glare sources L_s , the projected solid angle of the glare source Ω_s , the position index P and the background luminance L_b .

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

However, luminaires with visible LEDs cannot be rated with UGR. For non-uniform luminaires it is difficult to define the average luminance and the projected solid angle of the glare source. Is it possible to average the whole geometric surface of the luminaire or do only the LED light spots have to be taken into account? If only the LED light spots are assessed as the glare source, the resulting UGR value strongly depends on the resolution of the measuring device. Besides, since LED light sources are very small and have high luminance levels, a variation of the effective glare spot size results in different values of " $L_s^2 \cdot \Omega_s$ " and therefore different UGR values.

2 Investigation method

In order to determine the impact of the luminous structure of the glare source on the subjective discomfort appraisal, we conducted a psychometric study based on the following research hypotheses:

- In order to calculate the effective luminous area of LED luminaires, the luminance picture has to be adapted due to the resolution of the eye and the receptive fields, because the 'perceived' resolution has an important impact on discomfort glare.

- The correction factor according to HARA and the optimised procedure for the determination of the luminous area are both suitable for discomfort glare rating of LED luminaires in indoor environments.

For this study, we designed a full-scale test room with a 0.6 m x 0.6 m recessed glare source in the ceiling, which could be varied in the luminance and the luminous flux of the visible LED, the number and distance of the visible LED, the luminance of the immediate vicinity of the LED and the size of the homogeneous lighting immediate vicinity. For the variation of the aspects above we have chosen a layout, which was adapted from Eberbach [2] (see figure 1). By comparing the results of series 1 and 2, it is possible to test the summation of LED light sources for discomfort glare. Pattern number 5 represents the uniform glare source at different luminance levels. The comparison of the results within series 3 shows the impact of the LED spot distance inside a luminaire. By means of the fourth series the influence of the homogeneous lighting immediate vicinity shall be investigated.

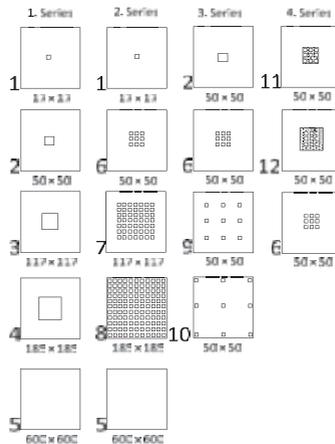


Figure 1: Luminance patterns of the glare source, sorted in four series. The shaded areas represent the “darker” parts and the white ones the “bright” parts of the glare source.

The study was conducted in an office-like test room (see figure 2), which was equipped colour-neutral. In the ceiling of the room the variable glare source was installed. Additionally, nine ambient light sources were installed in order to maintain a fixed ambient luminance when the glare source was varied. All luminaires had a correlated colour temperature between 4000 K and 4500 K. Each of the twelve patterns (see figure 1) was presented with various luminances for the “bright” and the “dark” parts of the glare source, altogether 71 light situations. Each light situation was presented at seven different tasks and viewing directions (see figure 2 and table 1). The main visual task during the test was a concentration performance test (CPT), which was presented on a computer screen in front of the subject. In addition to the visual CPT, an aural CPT was done. After 15 seconds to complete the task, the subject stated the calculation result and his discomfort glare rating. In order to consider the task difficulty, also an easy task (point fixation) was presented. Task 1 and task 4 were repeated once after six months to check the repeatability of the glare estimations. The subjective discomfort assessment was done by

the multiple criterion Söllner scale. In total 19,170 glare assessments have been performed.

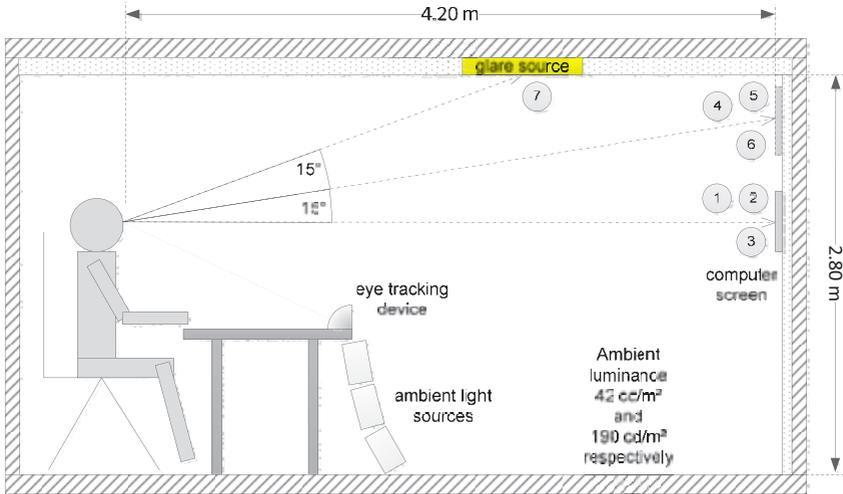


Figure 3: Position of the test person in the test room. The numbers 1 to 7 represent different tasks and viewing directions.

Each task was performed by 30 subjects (13 women, 17 men). Therefrom four were employees of the lighting engineering group at the TU Ilmenau. The other 26 subjects had no experience in lighting and were aged between 20 and 33 years (mean: 25.1 years). All test persons had a minimum visual acuity of 0.6 for near and far distances. Eight subjects used contact lenses during the test.

Table 1: List of tasks, viewing directions and ambient luminances

Task number	Task	time for task	θ (angle to glare source)	Background luminance L_b
1	CPT	15 s	30°	42 cd/m ²
2	CPT	15 s	30°	190 cd/m ²
3	Aural CPT	15 s	free view	42 cd/m ²
4	CPT	15 s	15°	42 cd/m ²
5	CPT	15 s	15°	190 cd/m ²
6	Point fixation	7 s	15°	42 cd/m ²
7	Short gaze in glare source	7 s	0°	42 cd/m ²

3 Results

In previous publications from the authors [3; 4] it was shown, that the LED pitch has no influence on discomfort glare and that the luminous area of LEDs can be aggregated by means of glare perception. This was observed for all of the investigated viewing angles, tasks and background luminances. On the other hand, the surrounding background of the LED luminaire has a negative influence on discomfort glare ratings even at low luminance levels. In this study, we would like to present two possible methods to handle non-uniformity of glare sources: the **effective luminous area** and the **effective luminance**. The first method is an improvement of the luminous element detection procedure published in [4]. In the second method, instead of ascertaining the effective glare source size, the effective luminance is estimated by correcting the average luminance of the glare source. This approach is mainly promoted by HARA [5; 6].

3.1 Determination of effective luminous area of the glare source

The CIE report no. 117 [1, p. 25ff.] proposes different methods to determine the luminous part of the luminaire. For example, in fluorescent lamps' applications, if the luminance of a luminous element is higher than 500 cd/m^2 , the element is considered as a glare source. For non-uniform LED luminaires, there is no information provided. In our study, we tested the 500 cd/m^2 definition above as well as the luminous element detection method proposed by WOLF [7]. He calculates an adaptive luminance threshold from all luminance pixels inside a room in order to determine the luminous parts of the luminaire. In the present study, we measured the luminance distribution from the subject's position with two imaging luminance measurement devices (ILMD), both with a resolution of 1.3 megapixel, but one equipped with fisheye lens and the other with 25-mm-lens, in order to get a high resolution of the glare source luminance values (see figure 4 and 5).

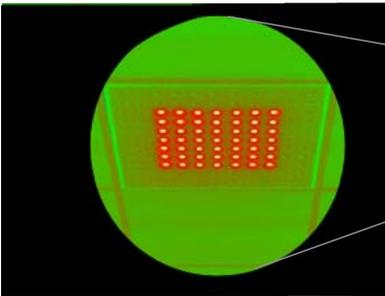


Figure 4: Luminance picture of glare source

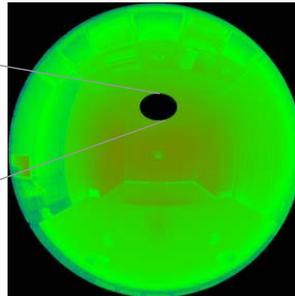


Figure 5: Luminance picture of test room

In addition to [4], before calculating luminance thresholds or UGR values, we transformed the high resolution image of the glare source into the 'appropriate' resolution. This resolution should be according to the resolution of the eye from the observer's position and at the observer's viewing angle. This means, that the appropriate resolution changes, if the subject is looking into another direction. Therefore, the highly resolved luminance picture of the glare source (e.g. figure 4, resolution: $0,014 \text{ }^\circ/\text{px}$, or $6,6 \cdot 10^{-8} \text{ }^\circ/\text{sr}$ respectively) needs to be downscaled correspondingly. The downscaling process was done in three steps:

1. Downscaling the picture resolution according to the visual acuity of the human eye at the relevant viewing angle of the observer [8]

2. Cutting the very high luminance values according to cone saturation of the human eye due to adaption mechanisms [9]
3. Downscaling the picture resolution according to size of the perceptive fields (= size of receptive fields) of the human eye at the relevant viewing angle of the observer [10]

After downscaling the highly resolved luminance picture, the luminance thresholds according to [7] can be calculated and the luminous parts of the luminaire can be identified. Alternatively, the fixed luminance threshold of 500 cd/m² can be used to determine the luminous elements of the glare source. Subsequently, the UGR values of the contiguous 'glaring' pixels can be calculated and finally aggregated into the UGR value of the whole luminaire. In our study, both the fixed and the adaptive luminance threshold method generated UGR values which correlated very well with the subjective glare assessments (R² always greater than 0.9).

3.2 Determination of effective luminance of the glare source

In order to estimate the actual luminance, HARA proposed a correction factor, which is multiplied with the average luminance of the glare source [5, 6]. This correction factor can be calculated using the 'uniformity' of the glare source, which is defined as the average luminance of glare source divided by the maximum pixel value of the glare source from perpendicular view [6]. The correction factor is calculated using equation (2) [6]. Of course, for uniform glare sources, the correction factor is equal to one.

$$k = 10^{-0.15 \cdot U} = U^{-0.15} \tag{2}$$

In our study we compared the theoretical correction factor with the 'subjective' correction factor, which can be derived from the psychometric glare assessments of lighting situations with a uniform glare source. Figure 6 suggests, that the correction factor model using equation (2) is good to describe discomfort glare, especially when the subject looks directly into the glare source (green squares). If the glare source is in the periphery of the subjects visual field, the calculated UGR values tend to be too critical.

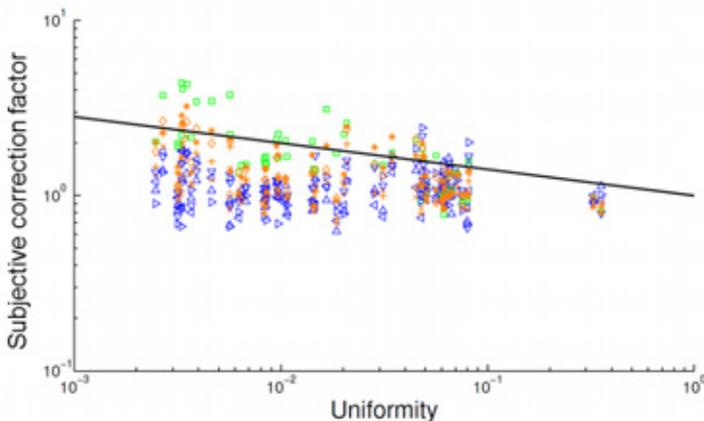


Figure 6: Subjective correction factor versus calculated uniformity. The black descending line represents the theoretical values according to equation (2).

4 Discussion

All in all, both research hypotheses could be verified. The effective luminous area method, described in this paper, appears to be appropriate to assess discomfort glare in indoor environments, because the best-fit lines are very close and have very high coefficients of determination ($R^2 > 0.9$). On the one hand, this method is adapted from physiological properties of the human eye, which makes it suitable to describe the 'perceived' resolution of the eye. On the other hand, it is still quite complicated to use and may be simplified a bit in the future for practical applications. In contrast, the correction factor according to HARA is very easy to use but it is still a bit too critical for most lighting applications. Eventually, for this procedure the 'appropriate' resolution of the glare source still needs to be defined.

This study was supported by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the research project UNILED (support code: 13N10751). The authors express their sincere gratitude to the BMBF for funding the study.

References

- [1] CIE (1995): Technical Report 117:1995. Discomfort Glare in Interior Lighting. Vienna: CIE.
- [2] Eberbach, K. (1974): Der Einfluss der Leuchtdichtestruktur von Lichtquellen auf die Blendempfindung. *Lichttechnik* 6, p. 283–286.
- [3] Funke, C.; Schierz, Ch. (2014): Untersuchung zur Erweiterung des UGR-Blendungsverfahrens für strukturierte LED-Leuchten. *LICHT 2014*, The Hague, Proceedings.
- [4] Funke, C.; Schierz, Ch. (2015): Extension of the Unified Glare Rating Formula for Non-Uniform LED Luminaires. 28th Session of the CIE, Manchester, 2015, Proceedings Vol. 1; Part 2, p. 1471-1480.
- [5] Hara, N.; Hasegawa, S. (2011): Study on discomfort glare rating of the luminaire with LED array. Workshop on discomfort glare: Sun City, 14th July 2011.
- [6] Hara, N. (2015): CIE JTC7 (D3/D1) - Discomfort caused by glare from luminaires with a non-uniform source luminance. First Meeting of Joint Technical Committee 7 of the CIE, Manchester, 02nd July 2015.
- [7] Wolf, St. (2004): Entwicklung und Aufbau eines Leuchtdichte-Analysators zur Messung von Blendungskennzahlen. Dissertation, publication series of the Lighting Engineering Group of the Technische Universität Ilmenau, Nr. 7, Der Andere Verlag Osnabrück, ISBN 3-89959-280-8.
- [8] Anderson, S.J.; Mullen, K.T.; Hess, R.F. (1991): Human peripheral spatial resolution for achromatic and chromatic stimuli: Limits imposed by optical and retinal factors, *Journal of Physiology*, Nr. 442, p. 47–64.
- [9] Valeton, J.M., von Norren, D. (1983): Light adaptation of primate cones: An analysis based on extracellular data, *Vision Research*, Bd. 23, Nr. 12, S. 1539–1547.
- [10] Strasburger, H. (2003): Indirektes Sehen. Formerkennung im zentralen und peripheren Gesichtsfeld, *Lehr- und Forschungstexte Psychologie*, Neue Folge 13, Hogrefe: Göttingen.

Anwendbarkeit einer spektralen Blendempfindlichkeit zur Bewertung der psychologischen Blendung breitbandiger Stimuli

*Niedling, Mathias / Völker, Stephan
Technische Universität Berlin / Fachgebiet Lichttechnik*

Problemstellung und Forschungsfragen

Ein Einfluss der spektralen Zusammensetzung einer Blendquelle auf deren Störwirkung ist schon seit langem bekannt und immer wieder Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Die Ergebnisse sind bisher jedoch nicht konsistent. Vor dem Hintergrund der Einführung der LED in die Straßenbeleuchtung wird dieses Thema erneut diskutiert. Dabei stellt sich die Frage, inwieweit ein erhöhter Blauanteil im Spektrum einer Blendquelle zu einer Erhöhung der psychologischen Blendung führt und worauf dieser zurückzuführen ist.

Stand der Wissenschaft/Technik

Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass bei gleicher Hornhautbeleuchtungsstärke durch Kfz-Scheinwerfer HID-Lampen störender bewertet werden als Glühlampen (Flannagan, 1999 / Bullough, 2002). Gleiches gilt für LEDs in Kraftfahrzeugscheinwerfern (Sivak, 2005). Daraufhin verfolgten zahlreiche Arbeiten das Ziel, eine Blendempfindlichkeitskurve durch additive Zusammensetzung schmalbandiger Reize zu ermitteln (Fekete, 2010, Bullough, 2009). Deren Ergebnisse differieren jedoch deutlich. Eine Vorhersage der psychologischen Blendung realer breitbandiger Blendreize basierend auf der jeweils ermittelten Blendempfindlichkeitskurve wurde nicht überprüft.

Forschungshypothesen

Es existiert keine allgemeingültige Blendempfindlichkeitskurve. Eine solche Sensitivitätskurve eignet sich somit nicht zu Quantifizierung von psychologischer Blendung.

Versuchsaufbau

In einem Laborversuche wurde bei gleichmäßiger Adaptationsbeleuchtung (2π -Geometrie) verschiedenfarbige schmal- und breitbandige Blendreize unter mesopischen Bedingungen bewertet.

Ergebnisse

Eine durch additive Zusammensetzung der schmalbandigen Reize ermittelte Blendempfindlichkeitskurve zeigt keine Übereinstimmung mit der Blendungsbewertung der breitbandigen Reize. Vielmehr zeigte die Kurve nach Berücksichtigung der Hornhautbeleuchtungsstärke durch Transformation einen Zusammenhang mit der Stimulierung der Blauzapfen.

Applicability of a spectral glare sensitivity to discomfort glare evaluation of broadband stimuli

*Niedling, Mathias / Völker, Stephan
Technische Universität Berlin / Fachgebiet Lichttechnik*

Research issue

An influence of a glare sources SPD on discomfort glare is already known and often focussed in scientific studies. Nevertheless the results are inconclusive and physical mechanism of discomfort glare are not clarified until today. The question, in which way the short wavelength part of the spectrum increases glare perception, is not answered finally.

State of science/technology

A lot of research studies showed a higher glare rating for high-intensity discharge headlamps compared to headlights with tungsten halogen while producing the same illuminance at the subjects' eye (Flannagan1999, Bullough2002). The same effect was shown for LED-headlights compared to other light sources (Sivak, 2005). Subsequently researchers tried to create a glare sensitivity curve and to find physical mechanism determining that curve (Fekete2010, Bullough2009). On the one hand, these curves differ significantly. On the other hand, the applicability of the detected curve to discomfort glare evaluation of broadband stimuli was never tested.

Research hypothesis

A general glare sensitivity curve does not exist. Such a curve is not suitable to determine physical mechanism of discomfort glare and therefore glare evaluation.

Experimental setup

In a laboratory study different narrow band and broad band stimuli were shown under mesopic conditions. The influence of the glare sources SPD on discomfort glare was figured out.

Results

An additive composed glare sensitivity curve of the narrow band stimuli showed a poor fit for glare prediction of broad band stimuli. Considering the illuminance at the subjects' eye produced by the narrow band stimuli, a relation of the blue cone signal and the glare perception was figured out.

Anwendbarkeit einer spektralen Blendempfindlichkeit zur Bewertung der psychologischen Blendung breitbandiger Stimuli

*Niedling, Mathias / Völker, Stephan
Technische Universität Berlin
Sekretariat E6, Einsteinufer 19, 10587 Berlin*

Zusammenfassung

In einem Versuch wurde die Anwendbarkeit einer ermittelten spektralen Blendempfindlichkeitskurve zur Bewertung der psychologischen Blendung breitbandiger Blendstimuli überprüft. Die Blendempfindlichkeitskurve wurde dabei additiv aus der Bewertung schmalbandiger Stimuli zusammengesetzt. Es zeigte sich keine Übereinstimmung der ermittelten Kurve mit der Bewertung der breitbandigen Stimuli. Nach Berücksichtigung der entsprechenden Hornhautbeleuchtungsstärke der schmalbandigen Stimuli zeigte sich vielmehr eine Übereinstimmung der Blendungsbewertung mit der Stimulierung der Blauzapfen.

1 Problemstellung und Stand der Forschung

Der Einfluss der spektralen Zusammensetzung einer Blendquelle auf deren Störwirkung ist schon seit langem bekannt und immer wieder Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. So zeigte de Boer bereits 1955 (de Boer, 1955), dass die Bewertung der psychologischen Blendung von der Lichtquelle abhängt. In der Arbeit wurden die zulässigen Leuchtdichten verschiedener Lampentypen bestimmt, die eine gleiche Störwirkung erzeugten. Dabei zeigte sich, dass für Natriumdampflampen im Schnitt 1,25-mal höhere Leuchtdichten zulässig waren als für Entladungslampen mit erhöhtem Blauanteil. Dieser Einfluss des Spektrums wurde dann auch in der Blendungsbewertung für ortsfeste Straßenbeleuchtung über einen Korrekturwert für die „Lichtart“ berücksichtigt (vgl. Glare control mark G, LiTG, 1981). Das Bewertungsmodell hat sich jedoch nicht bis in die Gegenwart durchgesetzt und auch der Faktor für die Lichtfarbe findet in aktuellen Norm für ortsfeste Straßenbeleuchtung keine Berücksichtigung (vgl. Blendindex, DIN-EN 13201).

Das Phänomen der erhöhten Blendung bei erhöhter kurzwelliger Strahlung im Spektrum zeigte sich erneut nach der Einführung der Gasentladungslampe in den KrAFFfahrzeugscheinwerfer. Der Einsatz des sogenannten Xenonlichtes führte dabei zu vermehrten Beschwerden über höhere Blendung. In zahlreichen Untersuchungen wurde daraufhin festgestellt, dass trotz gleicher Hornhautbeleuchtungsstärke durch den Scheinwerfer die Störwirkung bei Darbietung eines Scheinwerfers mit Gasentladungslampe im Vergleich zum Scheinwerfer mit Glühlampe höher ist (Flannagan, 1992 & 1999, Bullough, 2002). Das gleiche Phänomen beobachtete Sivak (Sivak, 2005), als er den Einfluss des wiederum erhöhten Anteils kurzwelliger Strahlung bei Verwendung von phosphorkonvertierten LEDs in Scheinwerfern untersuchte. Der Autor kommt dabei zu dem Ergebnis, dass mit zunehmender Stimulierung der Blauzapfen durch die Blendquelle die psychologische Blendung ansteigt. Zur Stützung dieses Befundes sind jedoch nach Sivak's Meinung weitere Untersuchungen notwendig.

In der Folge versuchten verschiedene Autoren, physiologische Mechanismen für die Blendempfindlichkeit zu determinieren (Fekete, 2010 / Bodrogi, 2011 / Kimura-Minoda, 2011 / Akashi, 2013). Dabei erstellten sowohl Fekete als auch Bodrogi Blendempfindlichkeitskurven, welche durch die Bewertung schmalbandiger Stimuli additiv zusammengesetzt wurden. Fekete zeigt die Blendquelle dabei auf zwei unterschiedlichen Positionen und findet signifikante Unterschiede zwischen den Darbietungspositionen. Basierend auf den eigenen Ergebnissen formuliert die Autorin folgenden mathematischen Zusammenhang zur Abbildung einer Sensitivitätskurve von psychologischer Blendung (DG= Discomfort glare).

Fekete et al. 2010 – $V_{DG}(\lambda)$

$$V_{DG}(\lambda) = \{a * V'(\lambda) + b * [1,62 * L(\lambda) + M(\lambda)]\} + c * [L(\lambda) - M(\lambda)] + d * [1,62L(\lambda) + M(\lambda)] - e * S(\lambda)$$

mit $L(\lambda)$, $M(\lambda)$, $S(\lambda)$ = Sensitivitätskurven der Rot-, Grün und Blauzapfen und den Koeffizienten a-e für die beiden Darbietungspositionen (Tabelle 1).

Tabelle 1 Koeffizienten der spektralen Blendempfindlichkeit nach Fekete 2010

	a	b	c	d	e
Position 1	0,963	0,0613	0,719	0,082	-1-395
Position 2	0,606	0,157	0,751	0,109	-2,3452

Bodrogi et al. überprüft in seiner Arbeit den Beitrag verschiedener visueller Pfade zu der von ihm ermittelten Blendempfindlichkeitskurve. Dabei zeigt sich, dass die Ergebnisse der Versuchspersonen stark differieren. Einzig der Beitrag der Blauzapfen zur ermittelten Blendempfindlichkeitskurve ist bei allen Probanden 0.

Auch Kimura-Minoda et al. und Akashi et al. zeigten in Ihren Arbeiten schmalbandige Blendreize und bestimmen aus den jeweiligen Ergebnissen mathematischen Modelle zur Abbildung einer spektralen Blendempfindlichkeit. Kimura-Minoda et al. beschreiben dabei eine sogenannte *glare mechanism function GMF*. Akashi et al. bestimmen eine *äquivalente Blendleuchtdichte L_{GM}* zur Bestimmung der psychologischen Blendung.

Kimura-Minoda et al. 2011 – *Glare mechanism function*:

$$GMF = \int L_{e\lambda}(V(\lambda) + k_1|r - g|_{\lambda} + k_2|y - b|_{\lambda})d\lambda$$

mit: r-g und y-b = spektrale Empfindlichkeit des rot-grün und gelb-blau-opponent chromatic channels, k1 und k2 - Wichtungsfaktoren

Akashi et al. 2013 – *äquivalente Blendleuchtdichte L_{GM}* :

$$L_{GM} = 10^c * \int_{380}^{780} I(\lambda)\{V(\lambda) + k_1S(\lambda) + k_2V'(\lambda)\}d\lambda$$

mit c=Helmholtz-Kohlrausch-Effekt Korrekturfaktor nach Ware und Cowan, 1983, $I(\lambda)$ =spectral radiant power distribution, k1 und k2 = Koeffizienten

Die verschiedenen Modelle zeigen, dass unterschiedliche Methoden zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Dies lässt den Schluss zu, dass eine allgemeingültige spektrale Blendempfindlichkeit nicht existiert. Ein davon abgeleitetes Modells zur Abbildung der psychologischen Blendung kann somit ebenfalls kritisch betrachtet werden. Ferner wurde die Anwendbarkeit der jeweils ermittelten Modelle auf reale breitbandige Blendstimuli nie über-

prüft und deren Gültigkeit validiert. Es bleibt also weiter fraglich, wie die erhöhte Blendempfindlichkeit im kurzwelligeren Strahlungsbereich abgebildet werden kann.

2 Ergebnisse

Zur Klärung dieser Frage wurden eigene Versuche durchgeführt. Dabei wurden erstmalig sowohl schmalbandige als auch breitbandige Blendstimuli (simulierte reale Spektren) in einer Untersuchung dargeboten (Kierdorf, 2012). Die schmalbandigen Reize wurden dabei einmal mit gleicher Strahldichte und einmal mit gleicher Leuchtdichte (entspricht gleicher Hornhautbeleuchtungsstärke) gezeigt. Die breitbandigen Reize wurden ebenfalls auf eine gleiche Hornhautbeleuchtungsstärke eingestellt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dabei auch eine Blendempfindlichkeitskurve additiv aus der Darbietung der schmalbandigen (strahldichtegleichen) Stimuli zusammengesetzt. Abbildung 1 zeigt die ermittelte spektrale Blendempfindlichkeitskurve (rot) im Vergleich zur $V(\lambda)$ -Kurve (blau). Es zeigt sich eine Verschiebung des Maximums hin zu kürzeren Wellenlängen sowie eine Änderung der Krümmung beider Kurvenflanken.

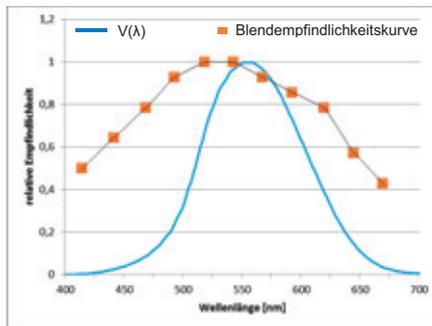


Abbildung 1 spektrale Blendempfindlichkeit (Kierdorf, 2013)

Um eine Vorhersage der psychologischen Blendung basierend auf der ermittelten Blendempfindlichkeitskurve zu prüfen, wurden die dargebotenen breitbandigen Spektren mit dieser Kurve gefaltet. Das nach der Faltung ermittelte numerische Integral wurde dann mit der Blendungsbewertung der breitbandigen Stimuli ins Verhältnis gesetzt und das Bestimmtheitsmaß ermittelt. Mit $R^2=0,2025$ zeigt sich, dass die ermittelte spektrale Blendempfindlichkeitskurve nicht geeignet ist, die Bewertung der psychologischen Blendung der breitbandigen Blendstimuli vorherzusagen.

Ferner wurde ein Zusammenhang der Blendungsbewertung mit der Stimulierung der Blauzapfen durch die Blendquelle geprüft. Mit $R^2=0,97$ zeigte dieser Parameter eine sehr gute Modellanpassung (Niedling 2013). Daraufhin wurde überprüft, ob die ermittelte Blendempfindlichkeitskurve diesem Befund widerspricht. Dazu wurden die einzelnen Stimuli gezielt analysiert. Da diese in der Untersuchung mit jeweils gleicher Strahldichte gezeigt wurden, erzeugt jeder Stimulus aufgrund der Wichtung mit der $V(\lambda)$ -Kurve eine unterschiedliche Hornhautbeleuchtungsstärke. Diese lag im Bereich von 0,06 lx bis 5 lx. Die ermittelte Blendempfindlichkeitskurve zeigt folglich eine Interaktion der Hornhautbeleuchtungsstärke

und des Spektrums der Blendquelle. Da der Hornhautbeleuchtungsstärke durch die Blendquelle eine determinierende Bedeutung für deren Störwirkung zukommt (Völker, 2016 / Tashiro, 2011), muss diese bei der Interpretation der Daten berücksichtigt werden. Dazu wurde die Bewertung jedes schmalbandigen Stimulus auf die jeweils erzeugte Hornhautbeleuchtungsstärke bezogen. Die so ermittelten Werte wurden auf eins normiert und gemeinsam mit den Empfindlichkeitskurven der Blauzapfen ($S(\lambda)$) in einem Diagramm abgetragen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung beider Graphen. Auch die Darbietung schmalbandiger Stimuli scheint somit bei Berücksichtigung der entsprechenden Hornhautbeleuchtungsstärke den Zusammenhang der Blauzapfenstimulierung und der Blendungsbewertung zu stützen. Die Anwendbarkeit des beschriebenen Vorgehens setzt dabei allerdings einen streng linearen Zusammenhang zwischen der Hornhautbeleuchtungsstärke und der Blendungsbewertung voraus, wovon jedoch nicht ausgegangen werden kann. Die Transformation ist somit als rein mathematische Berechnung zu betrachten. Der ermittelte Zusammenhang wird jedoch zusätzlich durch die Darbietung der schmalbandigen Stimuli mit gleicher Hornhautbeleuchtungsstärke gestützt. Der Verlauf dieses Untersuchungsteils zeigt eine gute Übereinstimmung mit den transformierten Werten.

Sowohl die Blendungsbewertung von breitbandigen als auch die von schmalbandigen Stimuli zeigte demnach in dieser Untersuchung einen Zusammenhang mit der Stimulierung der Blauzapfen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Bullough (Bullough, 2009), der die Blendempfindlichkeit mittels der $V(\lambda)$ -Kurve und einem Beitrag der Blauzapfen abbildet.

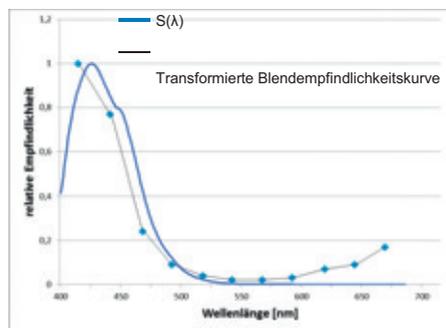


Abbildung 2 Blendempfindlichkeitskurve bezogen auf Hornhautbeleuchtungsstärke

Quellen

Akashi, Y., Asano, S., Kakuta, Y. (2013): Visual mechanisms of discomfort glare sensation caused by LEDs. Proceedings of CIE Century Conference Paris / France. CIE

Boer, J. B., Heemskerck Veeckens, J. F. T. (1955): Observations on discomfort glare in street lighting. Influence of the colour of light. CIE, Zürich

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., and van Derlofske, J. (2002): Discomfort and disability glare from halogen and hid headlamp systems: Sae technical paper series 2002-01-0010
- Bullough, J. D. (2009): Spectral sensitivity for extrafoveal discomfort glare. *Journal of Modern Optics*, 56(13):1518-1522.
- DIN EN 2003. DIN EN 13201. Straßenbeleuchtung. Berlin: DIN
- Fekete, J., Sik-L'Enyi, C., and Schanda, J. (2010). Spectral discomfort glare sensitivity investigations. *Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, 30(2):182-187. Bodrogi 2011
- Flannagan, M. J., Sivak, M., Gellatly, A., and Luoma, J. (1992): A field study of discomfort glare from high-intensity discharge headlamps: Report no. umtri- 92-16.
- Flannagan, M. J. (1999): Subjective and objective aspects of headlamp glare: effects of size and spectral power distribution: Report no. umtri.99-36. Bullough 2002
- Kierdorf, Daniel (2012): Einfluss der spektralen Zusammensetzung einer Blendquelle auf die physiologische und psychologische Blendung unter mesopischen Bedingungen. Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik. Masterarbeit
- Kimura-Minoda, T. and Ayama, M. (2011). Evaluation of discomfort glare from color leds and its correlation with individual variations in brightness sensitivity. *Color Research & Application*, 36(4):286-294.
- LiTG Publikation 10 (1981): Methoden zur Bewertung der Blendung in der Strassenbeleuchtung
- 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., and Flannagan, M. J. (2005): Blue content of led headlamps and discomfort glare: Report no. umtri-2005-2.
- 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
- Völker, S. (2016): Blendung im nächtlichen Straßenverkehr, Technische Universität Berlin – unveröffentlichtes Manuskript

Simulation psychologischer Blendung mit Head Mounted Displays

Roland Greule, Marc Briede*, Alexandra Ehrlitzer*, Matthias Kuhr*, Johannes Schlenger** und Nino Wessolowski*** (* Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg; ** thyssenkrupp Marine Systems; *** Medical School Hamburg)*

Problemstellung und Forschungsfragen

Diese Pilot-Studie überprüft in wie weit psychologische Blendung (pB) von Lichtquellen als Reflex auf Bildschirmen in einer virtuellen Umgebung mit einem heute erhältlichen Head Mounted Display (HMD) darstellbar ist.

Stand der Wissenschaft/Technik

Während direkte Blendung durch Simulationssoftware wie Relux bei der Lichtplanung berücksichtigt werden kann, sind kaum Erfahrungen für pB in der VR-Simulation überliefert.

Fragestellung

Die Fragestellung ist, inwieweit Menschen eine pB in der Virtual Reality (VR) vergleichbar empfinden wie in der Realität (R). Weiteres Ziel der Pilotstudie ist die Sammlung von Erfahrungen bei der Simulation von pB. Mit dem Ziel, dass zukünftig eine reale Überprüfung der Blendung wegfallen kann und Innenräume bereits im virtuellen Prototypen lichttechnisch richtig eingeschätzt werden können.

Versuchsaufbau

Zur Überprüfung der Fragestellung wird ein Bildschirmarbeitsplatz in einem Schiffsinnenraum eingerichtet. Auf einem spiegelnden 24"-Display von Philips wird ein Blendreflex mit einer LRCLS LED-Leuchte von LINKSrechts erzeugt. Eben dieser Raum wird mit einem Laserscanner vermessen, nachmodelliert, texturiert und in der CryEngine simuliert. Als HMD dient eine Oculus Rift DK2. N = 21 Probanden durchlaufen eine Sehaufgabe (Landolt Ring Task) und eine standardisierte Leseaufgaben mit und ohne pB jeweils in R und VR. Die vier Szenarien werden in zufälliger Reihenfolge gegeben und verschiedene Skalen zur Sehleistung, Sehkombfort, empfundene pB und emotionales Wohlbefinden ermittelt.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Mit einer Mehrebenenanalyse (Mixed Model) werden sowohl in den Zielgrößen zwischen VR und R als auch in den Zielgrößen zwischen pB und nicht pB bedeutsame Unterschiede gefunden. Das bedeutet, dass die Probanden signifikante Unterschiede zwischen VR und R wahrnehmen. Diese Unterschiede werden auch mehrheitlich größer eingeschätzt als der Unterschied zwischen pB und nicht pB. Dennoch wird, wenn eine Blendung vorliegt, diese in etwa vergleichbar zwischen VR und R wahrgenommen. Das deutet darauf hin, dass virtuelle Prototypen zukünftig auch Aussagen über die Lichtplanung zulassen. Jedoch muss die VR realitätsnäher gestaltet werden, vor allem hinsichtlich der Auflösung des HMD.

Discomfort glare simulation with head mounted displays

Roland Greule, Marc Briede*, Alexandra Ehrlitzer*, Matthias Kuhr*, Johannes Schlenger** and Nino Wessolowski*** (* University of Applied Sciences Hamburg; ** thyssenkrupp Marine Systems; *** Medical School Hamburg)*

Research issue

This pilot study examines how far discomfort glare from artificial light sources as a reflection on a monitor can be represented in a virtual reality (VR) with state of the art head mounted displays (HMD).

State of science/technology

While direct glare can be calculated by light planning software like Relux, there is a lack of experience in discomfort glare simulations in a virtual reality.

Research hypothesis

The question is to what extent sensations of discomfort glare in a virtual reality equals the sensation in reality. Another intention of the study is to gain experience in the simulation of discomfort glare. In future, an estimation of the photometrical data of interior spaces should be possible even in virtual prototypes without the need of accessing the real space or construction.

Experimental setup

On that account a research study is conducted in a ship-like room, showing a reflected glare on the Philips 24" working screen. The glare is generated by a LINKSrechts LRCLS LED light. This room is measured with a laser scanner, modelled, textured and simulated in the CryEngine. The Oculus DK2 serves as the HMD. N = 21 subjects were presented a visual task (Landolt rings) and a standard reading task in the real as well as in the virtually modelled room with and without discomfort glare rising from the reflection. These four scenarios were presented in random order and several scales regarding visual performance, visual comfort, perceived discomfort glare and emotional well-being were determined.

Results in comparison with previous findings

With a mixed model analysis significant differences as well in key targets between VR and reality as in key targets between glare and non-glare can be found. So, the subjects perceive significant differences between VR and reality. These differences are judged higher by the majority than the differences between glare and non-glare. But an existent glare is assessed similar in both, the virtual and the real surrounding. This could imply that virtual prototypes allow statements about light planning issues. But the VR needs to be closer to reality at least with respect to the HMD's screen resolution.

Simulation psychologischer Blendung mit Head Mounted Displays

Roland Greule, Marc Briede*, Alexandra Ehrlitzer*, Matthias Kuhr*, Johannes Schlenger** und Nino Wessolowski*** (* Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg; ** thyssenkrupp Marine Systems; *** Medical School Hamburg)*

Zusammenfassung

Psychologische Blendung durch eine künstliche Lichtquelle im Innenraum kann durch den UGR (Unified Glare Rating) quantifiziert werden. Während die UGR-Berechnung für Büroräume mit Software wie Relux möglich ist, stellen komplexe und ungleichmäßig ausgeleuchtete Arbeitsräume Lichtplaner vor große Herausforderungen. Auf mittlere Sicht ist es daher sinnvoll, wenn nicht gar notwendig, die Abschätzung psychologischer Blendwirkung im virtuellen Raum vorzunehmen. Dazu wurde eine Pilotstudie im Innenraum mit einem Blendreflex auf dem Arbeitsmonitor durchgeführt. Die VR wurde dabei wesentlich schlechter im Sehkomfort beurteilt als der reale Raum. Es zeigte sich außerdem, dass die Blendung in ihrer psychologischen Wirkung im realen und virtuellen Raum ähnlich eingeschätzt wird, was den Schluss nahe legt, dass eine virtuelle Blendungsbewertung möglich ist.

1 Einleitung

Bei der Lichtplanung von Arbeitsplätzen in Innenräumen dürfen vorgegebene Grenzwerte der psychologischen Blendwirkung von künstlichen Leuchten nicht überschritten werden (DIN EN 12464-1, 2003). Das Maß psychologischer Blendung kann dabei durch den UGR (CIE, 1995), Unified Glare Rating dargestellt werden.

Bei der Berechnung des UGR durch Software wie Relux oder DIALux werden vereinfachte Annahmen getroffen: es werden nur bestimmte Blickpunkte mit horizontalem Blickwinkel in die UGR-Berechnung einbezogen. Bei der Betrachtung von Blendreflexen auf dem Arbeitsmonitor erweisen sich diese Vereinfachungen als fatal, da Körpergröße, Sitzposition und der daraus resultierende Blickwinkel entscheidenden Einfluss auf die Blendung haben (SareyKhanie, Andersen, 't Hart, Stoll, & Einhäuser, 2011). Nach DIN EN 12464-1 und dem amerikanischen IESNA Lighting Handbook (IESNA, 2000) sollen Blendreflexe auf dem Monitor zwar vermieden werden, aus US-Studien von 1996 (Boyce, 2003, S. 190) geht aber bspw. hervor, dass fast ein Fünftel der Befragten über ihren Büroarbeitsplatz angaben, durch Reflexe der Beleuchtung schlechter arbeiten zu können.

Einen neuen Ansatz für Ergonomiebetrachtungen bietet die Simulation des Arbeitsplatzes in der virtuellen Realität, kurz VR. Sie bietet insbesondere bei Großprojekten ein enormes Sparpotenzial finanzieller und materieller Ressourcen.

2 Theoretischer Hintergrund

Der UGR wird in dem Technical Report CIE 117-1995 näher beschrieben und gilt im Gegensatz zur einer physiologischen Blendung nur für die psychologische Blendwirkung (discomfort glare) künstlicher Lichtquellen in einem Innenraum. Der relevante Bereich der di-

mensionslosen UGR-Skala reicht von 10 (gerade eben wahrnehmbare Störung) bis 30 (unerträgliche Blendwirkung) (CIE, 1995).

Die DIN EN 12464 Teil 1 gibt Grenzwerte des UGR vor, um die Blendung an Arbeitsstätten zu begrenzen. Dabei sind „die Leuchten so auszuwählen, einzusetzen und anzuordnen, dass Reflexionen hoher Leuchtdichte [auf dem Bildschirm oder der Tastatur] vermieden werden“ (ZVEI, 2005).

Das Erleben einer virtuellen Realität entspricht (noch) nicht der Erfahrung in der realen Welt. Das liegt zum Teil an der Hardware für die VR-Brillen, bestehend aus einem Head Mounted Display (HMD) und Bewegungssensoren. Nutzer einer VR-Brille leiden teilweise an Simulatorkrankheit, engl. Simulator Sickness, die nach einer VR-Sitzung über Fragebögen erfasst werden kann. Je weniger eine Person das virtuelle Erlebnis von einer Erfahrung in der realen Umgebung unterscheiden kann, desto präsenter ist die VR für sie. Diese sog. VR Presence stellt das Maß einer gelungenen Übersetzung der Realität in die VR dar.

3 Studie reale vs. virtuelle Blendung

„Die Aussagen zur psychologischen Blendung bei Bildschirmreflexen im virtuellen und realen Raum sind vergleichbar. Damit bietet die Untersuchung von Reflexblendung im virtuellen Raum eine Ergänzung zur lichttechnischen Planung von Innenräumen.“

Um diese These zu bestätigen, wurde eine Studie im Innenraum durchgeführt. Als Raumbeleuchtung diente eine LED-Leuchte Typ LRRLS direkt über dem Probanden, und der Blendreflex wurde mit einer LRCLS – jeweils von LINKSrechts – erzeugt. Diese war mit einem Filter $\frac{1}{2}$ Frost versehen, um die hellen LEDs im Blendreflex als möglichst homogene Fläche wahrzunehmen. Um einen Vergleich zwischen realer und virtueller Umgebung durchzuführen, wurde der Versuchsraum per Laserscan vermessen, abfotografiert und inklusive aller für die Studie verwendeten Möbel und Geräte in der CryEngine simuliert.

1.1 Methodischer Ablauf

Die Probanden erhielten innerhalb des Versuches zwei Sehaufgaben auf einem vor ihnen stehenden Monitor in der realen und virtuellen Umgebung jeweils mit und ohne Blendreflex auf dem Monitor. Daraus ergaben sich vier Versuche, deren Reihenfolge zufällig war, um mögliche Trainings- oder Ermüdungseffekte bei Sehaufgaben gleichmäßig über alle Untersuchungsszenarien zu verteilen.

Die erste Sehaufgabe war jeweils ein Standardtext zum Leseverständnis (Veitch, 1995). Die zweite Aufgabe bestand aus der Identifizierung 13 aufeinanderfolgender Landoltringe (Veitch, 1995) (Rea, 1986), deren Öffnung nach oben, unten, links oder rechts wies.

Nach jedem Versuch wurde ein Fragebogen mit folgenden Items ausgegeben:

- Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen (MBDF) mit 12 Items (Steyer, Schwenkmezger, Notz, & Eid, 1997).
- Simulator Sickness nach (Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal, 1993). In dieser Studie wurde der ungewichtete Gesamtmittelwert zu Kontrollzwecken gebildet.
- Frage zur psychologischen Blendung mit deutschen Items nach De Boer, siehe (Reidenbach, Dollinger, Ott, Janßen, & Brose, 2008).

- Augenermüdung: Mittelwert gebildet aus den Items „überanstrengte Augen“, „Schwierigkeiten mit der Sehschärfe“ und „verschwommene Sicht“ (Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal, 1993).
- Sehkombfort nach (Gall, Gall, & Borg, 1999).

Am Ende der Versuchsreihe wurde die VR Presence mit einem angepassten Fragebogen nach (Slater, Usoh, & Steed, 1994) abgefragt.

1.2 Versuchsaufbau

Die Versuchsperson saß am Tisch und musste die Leseaufgaben im realen Raum an einem 24“ Monitor Philips 243V5QHAB/00 mit spiegelndem Display durchführen. Die virtuellen Versuche wurden mit einer Oculus Rift DK2 als VR-Brille durchgeführt.

Abb. 1 zeigt ein Foto des Versuchsaufbaues aus Sicht der Probanden. Der Screenshot aus der zur Simulation genutzten CryEngine (Abb. 2) zeigt den virtuellen Raum. Man erkennt die Leuchte zur Erzeugung des Blendreflexes hinter der rechten Schulter des Avatars.



Abb. 1: Foto aus Probandensicht.



Abb. 2: Screenshot aus der CryEngine, Ansicht seitlich.

1.3 Lichtplanung in Relux

Der Versuchsraum wurde in ReluxPro (Version 2016.1.1.0) modelliert und vorab eine Blendungsberechnung durchgeführt. Um den Monitor in Relux als Selbstleuchter abbilden zu können, wurde dieser mit einer LMK mobile Leuchtdichtekamera vermessen und durch eine modifizierte Flächenleuchte (ReluxNet) in Relux ersetzt. Da eine Reflexblendung nicht in die Berechnung des UGR einbezogen wird (Heiss, 2016), wurde die Leuchte dupliziert, auf den Monitor gesetzt (s. Abb. 3) und um den Monitor-Reflexionsgrad modifiziert.

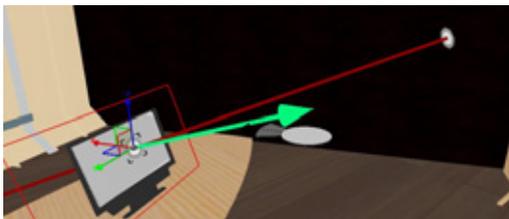


Abb. 3: Die Blendleuchte wird am Ort des Reflexes auf dem Monitor in ReluxPro simuliert.

1.4 UGR-Bestimmung mit Leuchtdichtebildern

Während der Studie wurden mit einer LMK mobile HDR-Leuchtdichtebilder aufgenommen, um eine anschließende Blendungsberechnung mit LabSoft und einem in der Beta-Phase befindlichen UGR-Plug-In von Technoteam durchzuführen, siehe Abb. 4.

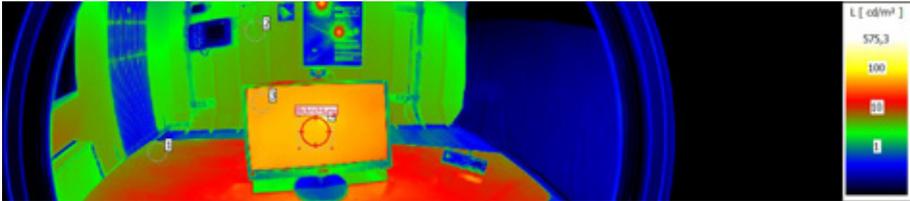


Abb. 4: Auswertung eines Leuchtdichtebildes mit LabSoft.

1.5 Vergleich Relux-Simulation vs. realer Raum

Die in LabSoft ermittelten Kontrollpunkte wurden mit einem in Relux gerenderten Raytracing-Bild verglichen und zeigten lediglich geringe Abweichungen (< 8 % auf dem Monitor, 16 % im Hintergrund). Umso stärker fällt der Unterschied des jeweils ermittelten UGR-Wertes auf: 18,5 in Relux und 5,4 in LabSoft, was auf verschiedene Berechnungsmethoden mit unterschiedlicher Ermittlung der Hintergrundleuchtdichte zurückzuführen ist.

Zwar wird der UGR als sehr robust gegenüber Schwankungen der Hintergrundleuchtdichte angegeben (CIE, 1995), es zeigt sich aber, dass eine Berechnung je nach zu Grunde gelegtem Modell sehr unterschiedlich ausfallen kann. Dies spricht umso mehr dafür, die Blendungsbestimmung über subjektive Methoden im virtuellen Raum zu ergänzen.

4 Ergebnisse

Zur Analyse der Daten wurde das Verfahren der gemischten Modelle (Mixed Model) gewählt. Dadurch ist es möglich, den Einfluss mehrerer unabhängiger Variablen auf die Zielgröße sowie deren Wechselwirkung exakt zu bestimmen. Tab. 1 zeigt die Hauptergebnisse des Verfahrens, den Effekt (Slope), dessen Größe direkt auf der verwendeten Skala interpretierbar ist, sowie eine Signifikanzaussage. Bei der Ermittlung der Randmittelwerte konnten keine Wechselwirkungen berücksichtigt werden, deshalb können die dargestellten Mittelwertsunterschiede und errechnete Effekte kleine Unterschiede aufweisen. Zur Interpretation wurden die errechneten Werte des Mixed Models herangezogen.

An der Studie nahmen $n=21$ Personen von 21 bis 61 Jahren teil (M 32,5; S 10,14). Die 8 Frauen (38,1 %) und 13 Männer (61,9 %) verfügten alle mindestens über einen abgeschlossenen Hochschulabschluss. Es gab $n=8$ Brillen- und $n=3$ Kontaktlinsen-Träger.

Die psychologische Blendung wurde mit einer modifizierten De-Boer-Skala abgefragt. Umgerechnet ergeben sich UGR 18 für den realen und UGR 24 für den virtuellen Raum.

Zur Überprüfung des Einflusses der Kontrollgrößen wurden zunächst durch Korrelationsgleichungen die zwei Kontrollgrößen mit dem höchsten Zusammenhang mit der jeweiligen Zielgröße berechnet. Diese beiden Kontrollgrößen wurden dann jeweils in der Analyse durch das Mixed Model berücksichtigt. Unter Einbezug der Kontrollgrößen bleiben die zuvor beschriebenen Effekte weitestgehend vergleichbar (hier nicht weiter dargestellt).

Tab. 1: Effekte (mit Signifikanz: * <5%, ** <1%, *** <0,01%) nach dem Mixed Model und Randmittelwerte.

Variable	Effekte (Mixed Model)			Randmittelwerte (S)			
	Virtual Reality	Blendung	Wechselwirkung	Real o. Bl.	VR o. Bl.	Real m. Bl.	VR m. Bl.
Sehkomfort Bildsch. (0-4)	1,9***	1,0**	0,0	3,7 (0,14)	2,1 (0,14)	3,0 (0,14)	1,2 (0,14)
Sehkomfort Raum (0-4)	0,8*	0,3	-0,5	2,4 (0,11)	2,4 (0,11)	2,3 (0,11)	2,2 (0,11)
Blendung n. DeBoer (0-7)	-2,5**	-4,9***	1,3	0,4 (0,28)	0,7 (0,28)	2,6 (0,28)	5,8 (0,28)
Augenermüdung (0-4)	-0,3	-0,6	0,5	0,4 (0,11)	0,6 (0,11)	0,5 (0,11)	0,6 (0,11)
MDBF Gut-Schlecht (0-4)	0,2	0,2	-0,1	3,4 (0,10)	3,4 (0,10)	3,4 (0,10)	3,2 (0,10)
MDBF Wach-Müde (0-4)	0,4	0,2	-0,5	3,0 (0,13)	3,0 (0,13)	3,0 (0,13)	3,0 (0,13)
MDBF Ruhe-Unruhe (0-4)	0,3	0,0	0,1	3,4 (0,12)	3,2 (0,12)	3,2 (0,12)	3,0 (0,12)

5 Diskussion

Beim Sehkomfort im Raum und auf dem Bildschirm ergibt sich ein höherer Einfluss der VR / Realität als der Blendung / Nichtblendung. Dies ist in erster Linie durch die verhältnismäßig schlechte Auflösung der Oculus Rift zu erklären. Bei der empfunden Blendung als auch bei der empfunden Augenermüdung ist der Einfluss der gegebenen Blendung hingegen stärker als der Einfluss der Realität bzw. VR. Signifikante Wechselwirkungen wurden dabei in keiner von 9 Testungen festgestellt. Dies weist auf einen vergleichbaren Einfluss der Blendung in der Realität und der VR hin und gleichsam auf die Validität der virtuellen Blendungsprüfung.

Die Umsetzung der Studie orientierte sich an einer präzisen Umsetzung der realen Umgebung, und die Durchführung der realen und virtuellen Versuche fand im gleichen physischen Raum statt. Hinzu kommt, dass der Proband sich nicht im Raum bewegen konnte und seine Hände aus seinem Gesichtsfeld halten sollte, um eine möglichst hohe VR-Präsenz zu erreichen. Diese ergab im Mittel 2,61 (S 0,83) auf einer Skala von 0 bis 4.

Um Blendung in einem virtuellen Prototypen insgesamt beurteilen können, wären insbesondere Untersuchungen direkter Blendung bei unzureichender Dynamik der heutigen HMDs sehr aufschlussreich. Hierbei kommen computergrafische Effekte wie ein Glühen oder eine Korona um die Lichtquelle zum Einsatz, die eine stärkere Blendung zu simulieren (Spencer, Inc, Shirley, Zimmerman, & Greenberg, 1995).

6 Danksagung

Ein besonderer Dank geht an die LINKSrechts Ingenieurgesellschaft, Dr.-Ing. Udo Krüger sowie Tobias Porsch von der TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Dr. Gerd Bruder der Universität Hamburg und Ingbert Zimmermann der Technischen Universität Berlin.

7 Literatur

- Boyce, P. R. (2003). *Human Factors in Lighting* (2nd Ed.). London: Taylor & Francis.
- CIE, C. i. (1995). *Discomfort glare in interior lighting*. Wien: Commission internationale de l'Éclairage (CIE).
- DIN EN 12464-1. (2003). *Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten. Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen*. Beuth-Verlag.
- Gall, J., Gall, M., & Borg, W. (1999). *Applying Educational Research: A Practical Guide*. London: Longman.
- Heiss, K. (2016). Persönliche Email.
- IESNA, I. E. (2000). *The IESNA LIGHTNING HANDBOOK* (Ninth Ed.). New York: IESNA.
- Kennedy, R., Lane, N., Berbaum, K., & Lilienthal, M. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. 3, 203-220.
- Rea, M. S. (1986). Toward a Model of Visual Performance: Foundations and Data. 15(2), 41-57.
- Reidenbach, H.-D., Dollinger, K., Ott, G., Janßen, M., & Brose, M. (2008). *Blendung durch optische Strahlungsquellen, Projekt F2185*. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).
- ReluxNet. *Ruco Licht / Flächenleuchte*. (Relux Informatik AG). Abgerufen am 11. 05 2016 https://reluxnet.relux.com/de/search/luminaires/ruco_licht/ruco___flaechenleuchte/US/#art=ruco___gfc_439-5&var=1&lamp=4-400-21-1900-_-8000-nw2700k-__&config=1000002
- SareyKhanie, M., Andersen, M., 't Hart, B., Stoll, J., & Einhäuser, W. (2011). Integration of eye-tracking method in visual comfort assessments. Lausanne, CH: Conference: CISBAT 11: CleanTech for Sustainable Buildings - From Nano to Urban Scale.
- Slater, M., Usoh, M., & Steed, A. (1994). Depth of Presence in Virtual Environments. *Presence Teleoperators & Virtual Environments*(3(2):130-144).
- Spencer, G., Inc, T., Shirley, P., Zimmerman, K., & Greenberg, D. (1995). Physically-Based Glare Effects for Digital Images. (S. 325-334). L.A., USA: Proceedings of SIGGRAPH '95.
- Steyer, R., Schwenkmezger, P., Notz, P., & Eid, M. (1997). *Der Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen*. Göttingen: Hogrefe.
- Veitch, J. A. (1995). Quantifying Lighting Quality based on Experimental Investigations of End User Performance and Preference. (S. 119-128). Newcastle upon Tyne: 3rd European conference on energy-efficient lighting, Right light three.
- ZVEI. (2005). *ZVEI-Leitfaden zur DIN EN 12464-1*. Frankfurt am Main: ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V.

Bestimmung der Schleierleuchtdichte für periphere Sehobjekte

Tatulla, C.; Maak, O.; Wolf, St.; Schierz, Ch., Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Ilmenau

Problemstellung und Forschungsfragen

Die Straßensicherheitsbewertung (z.B. EN 13201-2) verwendet die physiologische Blendung als grundlegende Bewertungsgröße für Straßenleuchten. Sie kann durch eine äquivalente Schleierleuchtdichte beschrieben werden, die sich über die gesamte Netzhaut legt, das retinale Lichtniveau anhebt und dadurch den Bildkontrast senkt.

Stand der Wissenschaft/Technik

Die foveale äquivalente Schleierleuchtdichte wird mithilfe der CIE „General Disability Glare Equation“ berechnet, die sich aber nur auf Sehobjekte in Blickrichtung bezieht. Periphere Sehobjekte, wie z.B. dunkel gekleidete Fußgänger auf dem Gehweg, werden in dieses Berechnungsmodell für foveale Wahrnehmung nicht mit einbezogen.

Forschungshypothesen

- Die äquivalente Schleierleuchtdichte unterscheidet sich für foveale und extrafoveale Wahrnehmung, wenn der Winkelabstand zwischen Blendquelle und Sehobjekt konstant bleibt.
- Die äquivalente Schleierleuchtdichte einer extrafovealen Blendquelle verteilt sich asymmetrisch über die Netzhaut.
- Mit einer Anpassung der Direct Compensation Method nach VAN DEN BERG und SPEKREIJSE, kann die äquivalente Schleierleuchtdichte einer Blendquelle für periphere Sehobjekte ermittelt werden.

Versuchsaufbau

Die Versuche verwenden einen adaptierten Aufbau der Direct Compensation Method. Der Proband sitzt im Zentrum einer Ulbricht-Halbkugel und schaut auf einen Fixationspunkt. Die Halbkugel füllt das Gesichtsfeld mit einer konstanten, gleichförmigen Beleuchtung. Das Testfeld wie auch die Blendquelle sind mechanisch im Kugelinneren befestigt und können an jede beliebige Position gesetzt werden. Beide LED-Lichtquellen flickern in Gegenphase. Die Helligkeit des Testfeldes kann mithilfe eines Potentiometers vom Probanden gesteuert werden. Die äquivalente Schleierleuchtdichte wird durch Kompensation des flickernden Streulichts im Testfeld erreicht. Dazu muss die Testfeldleuchtdichte so eingestellt werden, dass die Flickerwahrnehmung darin verschwindet. Die Augenbewegungen des Probanden werden durch Eye-Tracking kontrolliert.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Der Versuchsaufbau wird derzeit umgesetzt, sodass bisher keine Erkenntnisse gewonnen werden konnten.

Determination of veiling luminance for peripheral visual objects

Tatulla, C.; Maak, O.; Wolf, St.; Schierz, Ch., Lighting Engineering Group, Technische Universität Ilmenau

Research issue

The standard for road safety assessment (e.g. EN 13201-2) uses disability glare as an important evaluation parameter for road lighting luminaires. Disability glare can be described as an equivalent veiling luminance laying over the whole retina, which adds to the retinal light level and reduces contrast of the retinal image.

State of science/technology

The foveal equivalent veiling luminance can be calculated with the CIE General Disability Glare Equation, but it refers only on targets in the line of sight. Peripheral targets, e.g. dark-clad pedestrians on the sidewalk, are not taken into account in the equations for foveal vision.

Research hypothesis

- The equivalent veiling luminance differs for foveal and extrafoveal vision in case of constant angular distance between glare source and target.
- The equivalent veiling luminance of an extrafoveal glare source is distributed asymmetrically over the retina.
- With an adaptation of the direct compensation method, introduced by VAN DEN BERG and SPEKREIJSE, the equivalent veiling luminance of a glare source is determinable for peripheral targets.

Experimental setup

The experiments will use an adapted setup of the direct compensation method. The subjects are placed in center of a hemisphere with their head fixed by a chin rest and looking on a fixation point. The hemisphere represents the field of view with a constant, uniform adaptation background luminance, so that the subject will adapt to a defined state. Two LED light sources will be presented. Both, test spot and glare source, are mechanically attached to the hemisphere and can be set at any position. They flickering in counterphase and are aligned to the monocular examined subject. The test spot luminance can be adjusted by the subject via a control dial. The equivalent veiling luminance can be determined by compensating the flickering straylight of the glare source with the flickering light in the test spot due to adjusting the test spot luminance and obtaining the point of flicker disappearance. Meanwhile subject's eye movements are controlled by an eye tracking system. The non-examined eye is covered by a blindfold.

Results in comparison with previous findings

The investigations are still in progress and expected findings are not yet figured out.

Bestimmung der Schleierleuchtdichte für periphere Sehobjekte

Tatulla, C.; Maak, O.; Wolf, St.; Schierz, Ch., Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Ilmenau

Zusammenfassung

Die Begutachtung der Straßen- und Fahrzeugbeleuchtung in verschiedenen Beleuchtungsszenarien ist Teil der genormten Straßensicherheitsbewertung. Sie verwendet die physiologische Blendung als grundlegende Bewertungsgröße für Leuchten im Straßenverkehr. Diese Form der Blendung wird mithilfe eines störenden retinalen Lichtschleiers beschrieben. Seine Abhängigkeit vom Einfallswinkel wurde bis jetzt nur für foveale Sehobjekte ermittelt und in mathematische Augenmodelle überführt. Dabei befinden sich im alltäglichen Straßenverkehr die wichtigsten Sehobjekte zumeist in der Peripherie des Sichtfeldes. Deswegen ist es Ziel der vorgestellten Forschungsarbeit, die retinale Schleierleuchtdichte für Sehobjekte in der Netzhautperipherie zu ermitteln und aus den gewonnenen Daten ein angepasstes Berechnungsmodell für die physiologische Blendung zu entwickeln.

1 Einführung

1.1 Visuelle Blendung

Die Blendung ist ein Zustand, der als unangenehm empfunden wird oder ein Herabsetzen der Sehfunktion zur Folge hat, verursacht durch eine ungünstige Leuchtdichteverteilung oder durch zu hohe Kontraste [1]. Durch die visuelle Beeinträchtigung infolge der Blendung entsteht auch eine Sicherheitsgefährdung der Verkehrsteilnehmer im Straßenverkehr [2]. Um Risiken durch nächtliche Straßen- und Fahrzeugbeleuchtung abzuschätzen, wird anhand verschiedener Gütemerkmale die Beleuchtung von Straßen, Wegen und Plätzen nach der europäischen Norm 13201-2 bewertet [3].

Anhand ihrer Wirkung auf den Menschen lässt sich die Blendung in zwei Formen unterscheiden. Die psychologische Blendung beschreibt allgemein eine unangenehme Wahrnehmung durch die Anwesenheit von Blendquellen. Dagegen reduziert die physiologische Blendung aufgrund des retinalen Streulichts, welches durch eine helle Blendquelle entsteht, die Sehleistung [4]. Ihre funktionelle Wirkung auf das Sehen macht sie zum ausgewählten Gütemerkmal der Sicherheitsbewertung von Straßen, da sich durch die physiologische Blendung die Effekte möglicher Blendquellen im Verkehrsraum quantifizieren lassen.

Die Behinderung durch blendende Lichtquellen entsteht durch die optische Streuung des einfallenden Lichts an den imperfekten Medien im menschlichen Auge. Das führt zu einer weitläufigen Verteilung des Streulichtes auf der Netzhaut. Die Stärke des resultierenden äquivalenten Leuchtdichteschleiers ist der Maßstab für die physiologische Blendung und wird als äquivalente Schleierleuchtdichte ausgedrückt. Sie ist die Leuchtdichte eines gleichförmigen Lichtflecks, welcher die Kontrastschwelle zum selben Anteil wie die Blendquelle verändert [5]. Die äquivalente Schleierleuchtdichte kann mithilfe psychophysikalischer Konzepte quantifiziert werden.

1.2 CIE „General Disability Glare Equation“

Zusammen mit der gemessenen vertikalen Beleuchtungsstärke der Blendquelle am untersuchten Auge kann eine foveale Streulichtfunktion angegeben werden, die das retinale Streulicht am Punkt des schärfsten Sehens beschreibt. Grundlage dafür ist die von der CIE vorgestellte „General Disability Glare Equation“ [6], ein mathematisches Streulichtmodell, welches aus den Probandendaten mehrerer Streulichtstudien erstellt wurde.

In die Berechnung der Streulichtfunktion fließen verschiedene Faktoren ein, die auf anatomischen und physiologischen Eigenschaften der intraokularen Streulichtquellen (Hornhaut, Linse, Transluzenz der Augenwand, Reflexion an der Netzhaut) [7] basieren. Wichtigster Faktor ist der Winkelabstand zwischen Blendquelle und Sehobjekt. Je näher das Objekt an der blendenden Lichtquelle liegt, desto stärker ist der Lichtschleier, der sich über die retinale Projektion des Objektes legt. Außerdem erhöht sich bei wachsender Exzentrizität der Blendquelle der Einfluss der Augenwandtransluzenz. Die Alterung der Augenlinse führt zu ihrer Vergilbung und pathologisch zur Bildung eines Katarakts. Einfallendes Licht wird folglich mit dem Alter stärker gestreut. Die Pigmentierung der Augenwand und des Fundus beeinflussen ebenfalls maßgeblich die Lichtstreuung.

1.3 Problematik

Die CIE „General Disability Glare Equation“ basiert lediglich auf fovealen Messergebnissen. Ob und wie sich die Verteilung des Streulichts in Richtung der Netzhautperipherie verändert, ist unbekannt. Die einzig bekannten Untersuchungen zum extrafovealen Streulicht stammen von STILES und CRAWFORD aus dem Jahre 1937 [8]. Sie zeigen, dass die bekannten Modellfunktionen das Streulicht in der Netzhautperipherie unzureichend beschreiben und damit keine ausreichende Vorhersage für periphere Sehaufgaben liefern [9-11]. Jedoch befinden sich beim größten Teil der Gefahrensituationen im Straßenverkehr die wichtigen Sehobjekte, also z.B. dunkel gekleidete Fußgänger, in der Peripherie des Sichtfeldes (dem Straßenrand/ auf dem Gehweg). Sie liegen nicht in der Blickrichtung des Fahrers und somit außerhalb der zentralen Wahrnehmung. Trotzdem werden zur Sicherheitsbewertung ausschließlich mathematische Modelle für die foveale Betrachtung verwendet [3]. Um ihre Validität zu überprüfen, müssen ähnlich zu den bereits erfolgten Studien Untersuchungen mit einer auf das periphere Messziel angepassten Methode durchgeführt werden.

2 Forschungshypothesen

- Die äquivalente Schleierleuchtdichte unterscheidet sich für foveale und extrafoveale Wahrnehmung, wenn der Winkelabstand zwischen Blendquelle und Sehobjekt konstant bleibt.
- Die äquivalente Schleierleuchtdichte einer extrafovealen Blendquelle verteilt sich asymmetrisch über die Netzhaut.
- Mit einer Anpassung der Direct Compensation Method nach VAN DEN BERG und SPEKREIJSE [12], kann die äquivalente Schleierleuchtdichte einer Blendquelle für periphere Sehobjekte ermittelt werden.

3 Methode

3.1 Direct Compensation Method

Die bisherigen Erkenntnisse zur retinalen Streulichtverteilung bei fovealen Sehobjekten wurden hauptsächlich von der niederländischen Forschungsgruppe um Thomas VAN DEN BERG gewonnen. Sie nutzten ab 1986 die von ihnen entwickelte Direct Compensation Method, um die physiologische Blendung anhand des intraokularen Streulichts zu erforschen. Diese Methode schätzt direkt die Menge des Streulichts für unterschiedliche Winkelabstände der Blendquelle zum Sehobjekt [13].

Bei der Direct Compensation Method beobachtet der Proband monokular einen Bildschirm (siehe Abb. 1), auf dem mittig ein kreisrundes, dunkles Testfeld mit 1° Radius platziert ist. Das Testfeld wird von einem schmalen, ringförmigen Feld mit einer zeitlich konstanten, homogen verteilten, hohen Leuchtdichte umschlossen, dem sogenannten Separationsring. Auf der umgebenden Bildschirmfläche werden vier ringförmige Blendquellen mit unterschiedlichen effektiven Radien konzentrisch um das Testfeld projiziert ($3,5^\circ$ / $7,0^\circ$ / $13,6^\circ$ / $25,4^\circ$). Die einzelnen Blendquellen flickern mit 8 Hz, der Frequenz maximaler Flickerempfindlichkeit beim menschlichen Sehen. [14, 15]

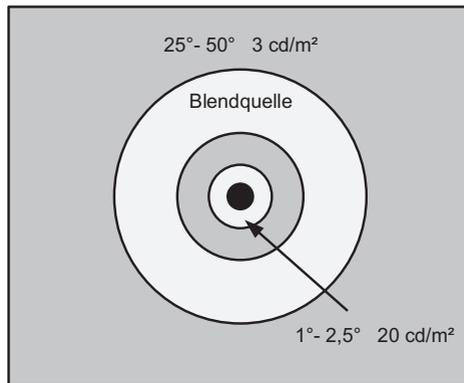


Abb. 1: Räumliche Konfiguration des Bildschirms bei der Direct Compensation Method von van den Berg [verändert nach 13]. Zentral sitzt das dunkle Testfeld, welches ein anpassbares Kompensationslicht präsentiert. Es wird umgeben von einem schmalen, hellen Separationsring. Die restliche periphere Bildschirmumgebung besitzt nur eine geringe Leuchtdichte. Es wird beispielhaft eine der Blendquellen mit einer mittleren Distanz zum Zentrum von 7° gezeigt.

Gibt das Testfeld selbst kein Licht ab, nimmt der Proband in diesem ein Flickern wahr, welches durch die intraokulare Lichtstreuung des einfallenden Blendquellenlichtes entsteht. Diese Flickerwahrnehmung kann durch Anpassung der Leuchtdichte der exakt gegenphasig flickernden Testfeldlichtquelle reduziert bzw. ausgelöscht werden. Das nennt man Kompensation des Streulichts. Die Testfeldleuchtdichte am Punkt der Kompensation entspricht direkt dem Anteil des Streulichts, welches auf die foveale Netzhautebene fällt [14].

3.2 Anforderungen an den Versuchsaufbau

Aufgrund der gewählten Methodik und dem Ziel der Messungen müssen bestimmte Anforderungen an die Gestaltung des Versuchsaufbaus gestellt werden. Zum einen wird eine flickernde Blendquelle benötigt. Die Frequenz des Flickers muss so gewählt werden, dass das Flickern vom Probanden sehr gut wahrgenommen werden kann. Das Testfeld muss exakt gegenphasig zur Blendquelle flickern, damit die Flickerwahrnehmung ausgelöscht werden kann. Außerdem muss die Leuchtdichte des Testfeldes vom Probanden gesteuert werden können.

Bei der ursprünglichen Direct Compensation Method liegt das Testfeld mittig auf dem Bildschirm und soll vom Probanden fixiert werden. Durch diese Anordnung kann die äquivalente Schleierleuchtdichte nur für die Fovea bestimmt werden. Bei einer Abwandlung für extrafoveale Sehobjekte müssen Blendquelle wie auch Testfeld im gesamten Gesichtsfeld positionierbar gestaltet werden, um Untersuchungen in der Netzhautperipherie durchzuführen. Zusätzlich muss für den Probanden ein zentraler Fixationspunkt installiert werden. Das Einhalten der Fixation sollte zur Fehlerminimierung durch eine Eye-Tracking-Kamera kontrolliert werden.

3.3 Versuchsaufbau

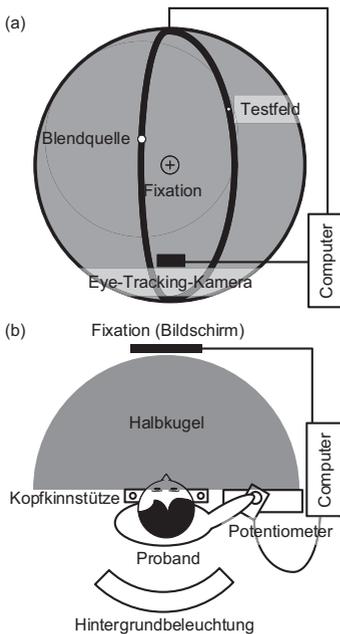


Abb. 2: Versuchsaufbau mit einer Ulbricht-Halbkugel.
(a) Frontansicht (ohne Probandensitzplatz)
(b) Draufsicht (mit Probandensitzplatz)

Für die Experimente wird ein adaptierter Aufbau nach der Direct Compensation Method verwendet. Die Verlegung des Testfeldes in die Sichtfeldperipherie sowie die Realisierung einer beliebig positionierbaren Blendquelle bringt einige Herausforderungen bei der Gestaltung des Aufbaus mit sich. Die Konstruktion und Umsetzung erfolgt im Rahmen einer Masterarbeit.

Die Grundlage des gesamten Aufbaus bildet eine Ulbricht-Halbkugel (siehe Abb. 2) mit einem Radius von 0,75 m. Der Proband sitzt zentral vor der Halbkugel und schaut, fixiert von einer Kopfkinnstütze, auf eine Auslassung an der hinteren Kugelhülle. Hinter der Auslassung befindet sich ein Bildschirm, auf dem sich ein zeitlich und örtlich variabler Fixationspunkt abgebildet wird. Die Augenbewegungen des Probanden werden durch eine im Halbkugelinneren angebrachten Eye-Tracking-Kamera kontrolliert.

Das Innere der Halbkugel füllt das Gesichtsfeld des Probanden mit einer konstanten, gleichförmigen Beleuchtung, sodass dieser auf einen definierten Zustand adaptiert. Die

Beleuchtung des Kugellinneren geschieht durch eine Leuchte, welche oberhalb und leicht hinter dem Probanden angebracht ist.

Es werden dem Probanden zwei LED-Lichtquellen präsentiert. Das Testfeld wie auch die Blendquelle sind mechanisch auf Trägern am Kugellinneren befestigt und können an beliebige Positionen im Gesichtsfeld gesetzt werden. Beide Lichtquellen flickern exakt in Gegenphase und sind auf den Probanden ausgerichtet. Die Leuchtdichte des Testfeldes kann mithilfe eines Potentiometers vom Probanden selbst gesteuert werden. Die Leuchtdichte der Blendquelle wird von Versuchsleiter gesteuert.

Der Fixationsbildschirm, die Eye-Tracking-Kamera, die beiden Lichtquellen sowie das Potentiometer werden von einem Computer gesteuert. Das nicht-untersuchte Auge wird während der Messungen mithilfe einer Augenklappe abgedeckt.

4 Datengewinnung

Während des Versuches werden dem Probanden verschiedene Sichtfeldszenarien gezeigt. Das bedeutet, dass für unterschiedliche Positionskombinationen von Blendquelle und Testfeld die jeweilige äquivalente Schleierleuchtdichte ermittelt wird. Die Zusammenführung der erhobenen Daten ermöglicht es, eine Aussage über den Verlauf der retinalen Streulichtverteilung zu treffen.

Die Ermittlung der äquivalenten Schleierleuchtdichte erfolgt über psychophysikalische Methoden. Der Kompensationspunkt, das Auslöschfen der Flickerwahrnehmung im Testfeld, ist eine Wahrnehmungsschwelle (Absolutschwelle). Deswegen eignen sich Schwellenbestimmungsverfahren am besten zur Datengewinnung während der Versuchsdurchführung. Die Bestimmung der äquivalenten Schleierleuchtdichte soll mithilfe der Grenzverfahren im aufsteigenden und absteigenden Verfahren erfolgen. Im aufsteigenden Verfahren wird die Testfeldleuchtdichte vom Nullpunkt bis zur Flickerauslöschung gesteigert. Im Gegensatz dazu wird im absteigenden Verfahren die zu starke Testfeldleuchtdichte bis zum Kompensationspunkt gesenkt. In jeweils drei auf- und absteigenden Durchläufen werden sechs Übergangspunkte ermittelt. Ihre Mittelung ergibt die gesuchte äquivalente Schleierleuchtdichte des Versuches.

5 Ausblick

Nach der Umsetzung des Versuchsaufbaus werden Pilotstudien die Anwendbarkeit der abgewandelten Methode zeigen. Sind diese positiv abgeschlossen, werden Querschnittstudien für verschiedene Testparadigmen (Position von Blendquelle und Testfeld im Gesichtsfeld) und unterschiedlichen Probandeneigenschaften (Alter, Augenfarbe, Katarakt) durchgeführt. Danach erfolgt eine Analyse der gewonnenen Daten, um aus ihnen eine abgewandelte CIE „General Disability Glare Equation“ zu entwickeln. Dadurch entsteht das angepasste mathematische Modell der physiologischen Blendung unter peripherer Wahrnehmung, das Hauptziel dieser Forschung.

Literatur

- [1] DIN EN 12665:2011-09: Licht und Beleuchtung – Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung. Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- [2] Ranney, T. A.; Simmons, L. A.; Masalonis, A. J. (2000): The immediate effects of glare and electrochromic glare-reducing mirrors in simulated truck driving. In: *hum factors* 42 (2), S. 337–347.
- [3] DIN EN 13201-2:2016-06: Straßenbeleuchtung – Teil 2: Gütemerkmale. Berlin: Beuth Verlag, 2016.
- [4] van den Berg, T. J. T. P. (1995): Analysis of intraocular straylight, especially in relation to age. In: *Optom Vis Sci* 72 (2), S. 52–59.
- [5] Aslam, T. M.; Haider, D.; Murray, I. J. (2007): Principles of disability glare measurement: an ophthalmological perspective. In: *Acta Ophthalmol Scand* 85 (4), S. 354–360.
- [6] Vos, J. J.; Cole, B. L.; Bodmann, H. W.; Colombo, E. M.; Taekuchi, T.; van den Berg, T. J. T. P. (2002): CIE equations for disability glare. Wien: CIE (CIE publication, 146).
- [7] van den Berg, T. J. T. P. (1995): Analysis of intraocular straylight, especially in relation to age. In: *Optom Vis Sci* 72 (2), S. 52–59.
- [8] Stiles, W. S.; Crawford, B. H. (1937): The effect of a glaring light source on extrafoveal vision. In: *Proc Roy Soc London* 122 (827), S. 255–280.
- [9] Akashi, Y.; Rea, M. (2002): Peripheral detection while driving under a mesopic light level. In: *Journal of the Illuminating Engineering Society* 31 (1), S. 85–94.
- [10] Bullough, J. D.; van Derlofske, J.; Dee, P.; Chen, J.; Akashi, Y. (2003): An investigation of headlamp glare: intensity, spectrum and size. Washington, D.C.: DOT NHTSA (DOT HS 809 672).
- [11] Aguirre, R. C.; Colombo, E. M.; Barraza, J. F. (2011): Effect of glare on reaction time for peripheral vision at mesopic adaptation. In: *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 28 (10), S. 2187–2191.
- [12] van den Berg, T. J. T. P.; Spekreijse, H. (1987): Measurement of the straylight function of the eye in cataract and other optical media disturbances by means of a direct compensation method. In: *Invest Ophthalmol Vis Sci* 28 (Suppl.), S. 397.
- [13] van den Berg, T. J. T. P. (1986): Importance of pathological intraocular light scatter for visual disability. In: *Doc Ophthalmol* 61 (3-4), S. 327–333.
- [14] IJspeert, J. K.; de Waard, P. W. T.; van den Berg, T. J. T. P.; de Jong, P. T. V. M. (1990): The intraocular straylight function in 129 healthy volunteers; dependence on angle, age and pigmentation. In: *Vision Res* 30 (5), S. 699–707.
- [15] van den Berg, T. J. T. P.; IJspeert, J. K.; de Waard, P. W. T. (1991): Dependence of intraocular straylight on pigmentation and light transmission through the ocular wall. In: *Vision Res* 31 (7-8), S. 1361–1367.

Biodynamische Beleuchtung – Anwendungen und wissenschaftlicher Hintergrund

*Wilfried Pohl, Markus Canazei, Katrin Tanzer
Bartenbach GmbH*

Problemstellung

Mit der LED steht uns mittlerweile ein digitales Leuchtmittel zur Verfügung, mit dem man (fast) beliebige spektrale Verteilungen mit zeitlicher Varianz erzeugen kann. Gleichzeitig weckte die ‚Entdeckung‘ des sogenannten ‚dritten Rezeptors‘ im Auge (ein melanopsinhaliger Fotorezeptor, der die Melatoninausschüttung im Gehirn steuert und damit den zirkadianen Rhythmus des Menschen triggert) große Erwartungen, mit einem dem tages- und jahreszeitlichen Verlauf angepassten dynamischen Licht die Gesundheit positiv zu beeinflussen (nichtvisuelle Wirkungen).

Die praktische Umsetzung solcher dynamischen Beleuchtungen ist häufig noch teuer und aufwendig, gleichzeitig ist der Nutzen noch zu wenig abgesichert.

Ziel

In unseren (Bartenbach) Planungsgruppen werden laufend dynamische Beleuchtungsanlagen für verschiedenste Anwendungen geplant und realisiert (Anwendungserfahrungen).

Parallel dazu wurde und wird in verschiedensten Forschungsprojekten wissenschaftlich untersucht, welche psychischen und gesundheitlichen Auswirkungen diese Art von Beleuchtung auf den Menschen hat.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Es werden die Erfahrungen (eigene und fremde, soweit bekannt) aus der Praxis der Umsetzung zusammengefasst.

Der allgemeine Stand der Wissenschaft in Bezug auf nichtvisuelle Wirkungen sowie die neuesten Ergebnisse aus eigenen Forschungsprojekten werden erläutert.

Realisierungsgrad

Es werden in Planungsprojekten realisierte dynamische Lichtalgorithmen und die Erfahrungen damit vorgestellt, sowie deren wissenschaftliche Begründung kritisch diskutiert.

Biodynamic Illuminations – Application and scientific Background

Wilfried Pohl, Markus Canazei, Katrin Tanzer

Issue

The LED presents us with the opportunity to generate spectral distributions (almost) at will with temporal variability. At the same time, the 'discovery' of the so-called 'third receptor' of the eye (a melanopsin-containing photo receptor which controls the release of melatonin in the brain and in that way triggers the circadian rhythm of human beings) raised expectations to influence human health in a positive way (non-visual impacts) with a dynamic illumination that can be adapted to the course of the daytime or seasonal variations.

The practical realization of such dynamic illuminations is often costly and time-consuming and at the same time their benefit is not based on enough scientific evidence yet.

Aim

In our lighting design groups at Bartenbach dynamic illuminations for various applications are planned and implemented on a day-to-day basis (experience in application).

At the same time, it is investigated scientifically in several research projects which impacts such illuminations have on the human psyche and health.

Description of the innovation/»best practice«

In this lecture our own experiences as well as others from an application point of view will be summarized.

Furthermore, the general state of science in relation to non-visual effects as well as the newest research findings from our own studies will be presented.

Level of realization

In planning projects implemented dynamic lighting algorithms and the experiences thereby will be presented and their scientific foundation will be discussed critically.

Biodynamische Beleuchtung – Anwendungen und wissenschaftlicher Hintergrund

*Wilfried Pohl, Markus Canazei, Katrin Tanzer
Bartenbach GmbH
Rinner Straße 14, 6071 Aldrans, Österreich*

Zusammenfassung

Mit der LED hat man die Möglichkeit (fast) beliebige spektrale Verteilung mit zeitlicher Varianz zu erzeugen. Die Wirksamkeit solcher Beleuchtungen und ihre Effekte auf die menschliche Gesundheit sind jedoch noch nicht wissenschaftlich fundiert und bedürfen noch intensiver Forschung. In diesem Vortrag wird der wissenschaftliche Stand von biodynamischem Licht zusammengefasst und einige eigene Forschungsprojekte vorgestellt. Die Ergebnisse einiger dieser Studien werden präsentiert, in denen diese Lichtwirkungen am Tag, in der Nacht und auch rund um die Uhr untersucht wurden. Zusätzlich werden einige umgesetzte Planungsprojekte mit biodynamischem Licht vorgestellt sowie die Schwierigkeiten, die mit solchen Installationen verbunden sind, aufgezeigt.

1 Einleitung

Eine **biodynamische Beleuchtung** variiert Tageszeit-spezifisch, bis zu 24 Stunden lang, zentrale Beleuchtungsparameter (Intensität, Lichtfarbe und Lichtverteilung), erlaubt eine belastungsfreie visuelle Informationsaufnahme und möchte spezifische nicht-visuelle Lichtwirkungen entfalten, z.B. die Stimmung und den Schlaf verbessern, die kognitive Leistungsfähigkeit und Wachheit steigern und längerfristig die menschliche Gesundheit positiv beeinflussen. Lichtlösungen integrieren dazu ein diesen Anforderungen entsprechendes Kunstlichtsystem mit einem Tageslichtsystem, so dass am Tag die primäre Lichtquelle das Tageslicht darstellt. Ergänzt werden derartige integrativen Systeme durch Sensoren, die die Präsenz von Personen und die vorhandene Tageslichtmenge erfassen um eine möglichst energieeffiziente Lichtlösung umzusetzen. Schließlich erlaubt eine biodynamische Beleuchtung den Nutzeingriff in spezifischen Parametern (z.B. Ein- und Ausschalten und Dimmen einer automatischen Lichtsteuerung). Eine derart ausgeführte biodynamische Beleuchtung ist aus unserer Sicht der Archetyp einer **Mensch-zentrierten Beleuchtung** (human centric lighting).

Seit der Entdeckung des **Fotopigments Melanopsin** im menschlichen Auge /1/, /2/, welches photochemisch maximal auf kurzwellige Strahlung im Wellenlängenbereich um 480nm reagiert /3/, hat weltumspannend intensive Grundlagenforschung zu nicht-visuellen Lichtwirkungen auf den Menschen begonnen. ExpertInnen aus unterschiedlichsten Forschungsgebieten (z.B. Endokrinologie, Chronobiologie, Physiologie, Onkologie, Epidemiologie, Neurologie, Psychiatrie, Arbeitsmedizin, Psychologie, Lichttechnik, Ergonomie, Physik) versuchen seither intensiv die unmittelbaren und langfristigen Lichtwirkungen auf neurophysiologische, endokrine, kognitive und stimmungsbezogene Parameter zu erfassen und zu beschreiben /4/,/5/.

2 Allgemeine wissenschaftliche Grundlagen

Im folgenden Kapitel sollen wissenschaftlich gut abgesicherte, akute und längerfristige nicht-visuelle Lichtwirkungen zusammengefasst werden.

2.1 Akute nicht-visuelle Lichtwirkungen

Zentrale Bezugsgröße in der nicht-visuellen Lichtwirkungsforschung stellt die Tageszeit dar, in welcher üblicherweise wenig Tageslicht vorherrscht und der Mensch schläft. Es gilt gegenwärtig als eindeutig gesichert, dass **Licht in der Nacht** (z.B. während des nächtlichen Erwachens oder im Verlauf von Nachtschichtarbeit) unzählige physiologische Parameter stark moduliert (z.B. Melatoninausschüttung, Herzrate, Körperkerntemperatur) und sowohl die Wachheit als auch die kognitive Leistungsfähigkeit steigert. Es gilt ebenfalls als gesichert, dass **Licht am frühen Morgen** (vom Zeitpunkt des Aufstehens bis zu 2 Stunden danach) maßgebliche nicht-visuelle Wirkungen entfaltet. Neben den bereits erwähnten Lichtwirkungen in der Nacht wirkt morgendliches Licht zusätzlich stark stimmungsaufhellend. Dieser Effekt wird besonders in der Lichttherapie bei Herbst-Winter-Depressionen genützt. Des Weiteren zeigen etliche Studien auf, dass **Licht am Abend** (2-3 Stunden vor dem Zu-Bett-gehen bis zum Einschlafen) besonders die Wachheit steigert und damit Einfluss auf den nachfolgenden menschlichen Schlaf nimmt.

Dahingegen gibt es nur **wenige wissenschaftliche Belege** für nicht-visuelle Lichtwirkungen (repliziert und peer-reviewed publiziert) **für die restliche Tageszeit**. So dokumentierten Forschungen bisher Lichtwirkungen unter besonderen Rahmenbedingungen (z.B. unter fehlendem Tageslicht in den Wintermonaten oder unter sehr geringer Lichtexposition oder kognitiver Erschöpfung vor der eigentlichen Lichtintervention) auf subjektive Parameter (Wachheit und Stimmung) und die kognitive Leistungsfähigkeit.

2.2 Längerfristige nicht-visuelle Lichtwirkungen

Eine Lichtexposition mit sehr hellem Licht (bis zu 10.000 lux am Auge) am frühen Morgen wird seit über 2 Jahrzehnten erfolgreich in der **medizinischen Behandlung von Herbst-Winterdepressionen** eingesetzt. Stimmungsaufhellende Wirkungen der morgendlichen Lichttherapie etablieren sich dabei bereits innerhalb der ersten Woche. Des Weiteren sind **Phasenverschiebungen zirkadianer Rhythmen** (phase advance/ phase delay) durch Licht in der wissenschaftlichen Grundlagenforschung gut dokumentiert.

Licht ist der stärkste Zeitgeber für den menschlichen zirkadianen Rhythmus. Primär ist die nächtliche Beleuchtung maßgeblich an zirkadianen Rhythmusstörungen beteiligt. Epidemiologische Studien zeigen auf ^{16/}, dass eine chronische Störung zirkadianer Rhythmen längerfristig der **menschlichen Gesundheit** schadet. So wurden beispielsweise bei nachtschichtarbeitenden Menschen erhöhte Raten für die Entwicklung einer depressiven Erkrankung, einer kardiovaskulären Erkrankung, einer Schlafstörung, der Entwicklung eines metabolischen Syndroms und einer Erkrankung des Immunsystems festgestellt.

2.3 Lichtinterventionen zur Erzielung nicht-visueller Lichtwirkungen

Wie bereits erwähnt, spielt die **Tageszeit der Lichtexposition**, vor allem in Bezug auf die Schlafzeiten, eine dominante Rolle ein. Parallel dazu ist entscheidend, welche Lichtexposi-

tion der eigentlichen nicht-visuellen Lichtintervention vorausgeht (**Lichthistorie**). In den meisten Studien werden Versuchspersonen vorher mehrere Stunden einem stark gedimmten Licht (<5 lux am Auge) ausgesetzt, um so die Empfindlichkeit für die eigentliche Lichtintervention zu erhöhen.

Schließlich ist die **ins Auge eintreffende Lichtintensität** maßgeblich für die Etablierung nicht-visueller Lichtwirkungen. Dies gilt für „weißes“ Licht (polychromatische Lichtquelle) das neben nicht-visuellen Lichtwirkungen ebenfalls die visuelle Informationsaufnahme verlustfrei ermöglicht. In Abhängigkeit von der Lichtintensität am Auge spielt das **ins Auge eintreffende Lichtspektrum** dahingehend eine nachrangige Rolle. Wiederum ist hier weißes Licht Grundlage der Lichtintervention. Forschungen zum Einfluss der **Lichtrichtung** ergeben derzeit **kein eindeutiges Bild** über die bevorzugte Einstrahlrichtung. So weisen lediglich einige wenige kleine, nicht replizierte Studien in der Nacht darauf hin, dass Licht aus dem oberen Halbraum besonders wirksam sei. Derzeit existiert nur für die Lichttherapie eine Empfehlung zur **Lichtdosis**. So wird zur Behandlung von Herbst-Winter-Depressionen eine tägliche Lichtdosis von 5000 lux-Stunden eingesetzt.

Abschließend sei erwähnt, dass in der wissenschaftlichen Forschung bisher ausschließlich die nicht-visuellen Wirkungen **zeitlich befristeter Lichtexpositionen (bis zu 6 Stunden)** zu unterschiedlichen Tageszeiten untersucht wurden. Dabei kamen hauptsächlich **Ganzfeld-Bestrahlungen oder kleine leuchtende Flächen** (Lichttherapiegeräte) zum Einsatz. Erst in den letzten Jahren wurden vermehrt nicht-visuelle Lichtwirkungen **diffus strahlender Decken-Panels** in spezifischen Raumbereichen (z.B. Bettzimmer in Kliniken, Aufenthaltsräume in Altersheimen, Schulklassen) untersucht. Im folgenden Kapitel sollen eigene Forschungsergebnisse zu nicht-visuellen Lichtwirkungen einer biodynamischen Raumbelichtung kurz vorgestellt werden.

3 Biodynamische Lichtwirkungsforschung

3.1 Biodynamisches Kunstlicht in der Nacht

Einige Studien weisen bisher darauf hin /7/, /8/, /9/, /10/, dass Lichtquellen mit stark reduzierten Blaulicht-Anteilen den menschlichen zirkadianen Rhythmus in der Nacht weniger stören und ebenso keinen negativen Einfluss auf die Stimmung und kognitive **Leistungsfähigkeit** nehmen. Die bisher untersuchten Lichtinterventionen verletzen internationale Standards für die Innenraumbelichtung. Gegenwärtig sind Leuchtdioden mit sehr geringen kurzwelligigen Strahlungsanteilen (respektive geringer ähnlichster Farbtemperatur) am Markt verfügbar, die grundsätzlich eine normgerechte Raumbelichtung ermöglichen. Im Rahmen einer randomisierten kontrollierten Studie /11/ wurden die visuellen und nicht-visuellen Wirkungen dieser Lichtquelle in einer simulierten **Nachtschichtarbeit** untersucht. Licht aus einer Lichtquelle mit reduzierten kurzwelligigen Strahlungsanteilen wirkt positiv auf das autonome Nervensystem (erhöht die parasympathische Aktivität und reduziert die Herzrate). Stimmungsbezogene und kognitive Parameter änderten sich im Vergleich zu Lichtquellen mit höheren kurzwelligigen Strahlungsanteilen hingegen nicht. Die vorliegenden Studienergebnisse weisen darauf hin, dass eine nächtliche Beleuchtung mit Lichtquellen deutlich unter 2700 Kelvin zur nächtlichen Beleuchtung auch unter Arbeitsbedingungen eingesetzt werden kann.

3.2 Integration von Tageslicht in ein biodynamisches Kunstlicht am Tag

Human Centric Lighting fokussiert gegenwärtig ausschließlich auf ein Tageszeit-angepasstes Kunstlicht. Die maximale Nutzung von Tageslicht zur Erzielung nicht-visueller Lichtwirkungen am Tag spielt dabei meist keine Rolle. Zum Aufbau einer **integrativen Kunst- und Tageslichtsteuerung** zur Erzielung nicht-visueller Lichtwirkungen wurde eine dosimetrisches Modell zur Bewertung der täglichen Lichtmenge erarbeitet. Mit Hilfe dieses Modell wird einerseits mit einem ausgewählten Tageslichtsystem im Rahmen eines laufenden geförderten Forschungsprojekts /12/ diese nicht-visuelle Lichtsteuerung demonstriert und evaluiert. Parallel dazu soll die Tauglichkeit verschiedenster Kunst- und Tageslichtsystem für diese Lichtsteuerung rechnerisch ermittelt werden. Ein zweites, gerade gestartetes Forschungsprojekt, zielt darauf ab, die psychophysiologischen und kognitiven Wirkungen einer integrativen Kunst- und Tageslichtsteuerung zur Erzielung nicht-visueller Lichtwirkungen im Büro (F&E-Gebäude der Fa. Bartenbach) zu evaluieren.

3.3 Biodynamisches Licht rund um die Uhr

Einige Studien in Altersheimen und Kliniken /13/, /14/, /15/, /16/ weisen darauf hin, dass helles Licht am Tag die Stimmung, den kognitiven dementiellen Abbau und die körperliche Erholung positiv beeinflussen können. Gegenwärtig gibt es keine veröffentlichten Studien, in denen mit einer dynamischen Raumbelichtung in mehreren Raumzonen über **24 Stunden** versucht wird, nicht-visuelle Lichtwirkungen zu erzielen.

Im Rahmen einer Vorstudie an einer **Wochenbett-Station** /17/ konnte gezeigt werden, dass eine dynamische Bettzimmerbeleuchtung schlaf- und stimmungsbezogene Parameter von jungen Müttern positiv beeinflusst und Ruhe-Aktivitätsrhythmen von Neugeborenen moduliert.

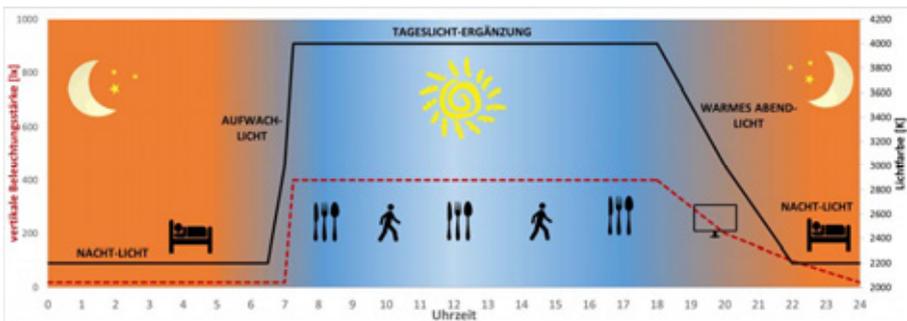


Abb. 1: Steuerkonzept für das biodynamische Licht über 24 Stunden in einer psychiatrischen Klinik

Gegenwärtig führen wir eine groß angelegte klinische Studie an einer **Demenz- und Depressionsstation** einer psychiatrischen Klinik in Österreich durch. Dynamisches Raumbelicht wird dabei rund um die Uhr über große Raumbereiche (Bettzimmer, Aufenthaltsräume Stützpunkt des Pflegepersonals, Flure) angeboten. Es ist geplant, nicht-visuelle Lichtwirkungen über 2 Jahre über Aktimetrie, das Logging der Lichtschalterdaten und das räumliche Tracking der Versuchspersonen (PatientInnen als auch das Pflegepersonal) zu

erfassen. Zusätzlich wird die sehr detailliert geführte Pflegedokumentation (Medikation, Stürze, Fixierungen, etc.) für die Quantifizierung der Lichtwirkungen analysiert.

Im Zuge der Forschungsinitiative „**Light B Health**“, die Bartenbach 2015 gestartet hat sollen diese Forschungen intensiviert werden. Um das Wissen über die nicht-visuellen Wirkungen biodynamischer Beleuchtungen zu verbreiten soll eine Plattform aufgebaut werden, wo sich Wissenschaftler, Firmen und Anwender austauschen können.

4 Erste Praxiserfahrungen

Bartenbach hat in den letzten Jahren das in Studien gewonnene Wissen in diversen Planungsprojekten mit biodynamischer Raumbeleuchtung umgesetzt. Darunter sind unter anderem **Projekte im Gesundheitsbereich**, in dem großes Potential für biodynamische Beleuchtung besteht. So etwa wurde im Jahr 2015 die Beleuchtung des Psychiatrischen Krankenhaus Slagelse (Dänemark) umgesetzt, wo die Farbtemperatur von 4000 K untertags auf 2200 K am Abend dynamisch verändert wird. 2017 wird ein ähnliches Projekt am Klinikum Lichtenfels (Deutschland) fertiggestellt werden.

Diverse Installationen von biodynamischem Licht in **Bürogebäuden** wurden in der nahen Vergangenheit ebenfalls umgesetzt, unter anderem der Firmensitz von Berger Logistik in Wörgl (Österreich). In der F&E-Abteilung bei Bartenbach wurde im Zuge von Renovierungsarbeiten ein neues Lichtkonzept erstellt, wo das Tageslicht durch Sensoren integriert wird. Die Farbtemperatur und die Beleuchtungsstärken im Haus werden dynamisch gesteuert und werden durch die Außensituation beeinflusst und erzeugen so eine Beleuchtungssituation die sowohl biologisch als auch energetisch effizient ist.

Im Zuge dieser Projekte hat Bartenbach viel Erfahrung mit den Schwierigkeiten bei der Realisierung solcher biodynamischeren Beleuchtungen gesammelt. Eine der größten Schwierigkeiten stellt die technische Umsetzung dar, da **technische Limitierungen** und **Programmieraufwand** schon die Ausführung von simplen Steuerkonzepten kompliziert und teuer machen. Zusätzlich sind im Moment die Schnittstellen zwischen den verantwortlichen Personen noch nicht klar definiert. Ein Lichtplaner muss den Kontrollalgorithmus extra für den Elektroplaner „übersetzen“, was ein zeitaufwendiger und fehleranfälliger Prozess ist.

Damit eine biodynamische Beleuchtung möglichst effektiv und individuell abgestimmt betrieben werden kann, sollten intelligente Systeme basierend auf Sensortechnologie integriert werden, die erforderlichen **Steuer- und Regelungsmechanismen** sind jedoch sehr komplex. Aus diesem Grund wird die Integration von Tageslicht oft vernachlässigt und die positive Wirkung von Tageslicht bleibt ungenutzt.

5 Literatur

- /1/ Berson DM, Dunn FA, Takao M (2002). Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science* 295 (5557): 1070–3.
- /2/ Hattar S, Liao HW, Takao M, Berson DM, Yau KW (2002). Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science* 295 (5557): 1065–70.

- /3/ Dacey DM, Liao HW, Peterson BB, et al. (2005). Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN. *Nature* 433 (7027): 749–54.
- /4/ CIE x027:2004: Proceedings of the CIE Symposium 2004 on Light and Health: Non-Visual Effects, 30 Sep. - 2 Oct. 2004, Vienna, Austria.
- /5/ CIE x030:2006: Proceedings of the ISCC/CIE Expert Symposium 2006 "75 Years of the CIE Standard Colorimetric Observer", 16-17 May 2006, NRC, Ottawa, Ontario, Canada.
- /6/ Roenneberg T, Merrow M (2016). The circadian clock and human health. *Current Biology* 26:432-443.
- /7/ Kayumov L, Casper RF, Hawa RJ, et al. (2005) Blocking Low-Wavelength Light Prevents Nocturnal Melatonin Suppression with No Adverse Effect on Performance during Simulated Shift Work. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 90(5):2755–2761.
- /8/ Rahman SA, Shapiro CM, Wang F, et al. (2013) Effects of Filtering Visual Short Wavelengths During Nocturnal Shiftwork on Sleep and Performance. *Chronobiology International* 30(8): 951-962.
- /9/ van de Werken M, Gimenez MC, de Vries B, et al. (2013) Short-wavelength attenuated polychromatic white light during work at night: limited melatonin suppression without substantial decline of alertness. *Chronobiology International* 30(7): 843–854.
- /10/ Sasseville A, Martin JS, Houle J, et al. (2015) Investigating the contribution of short wavelengths in the alerting effect of bright light. *Physiology&Behavior* 151: 81-87.
- /11/ Canazei M, Bliem H, Pohl W, Weiss E (2016). Acute effects of different light spectra on simulated night shift work without circadian alignment. *Chronobiology International* (submitted).
- /12/ VisErgyControl (2014-2017). Integrale Tages- und Kunstlichtsteuerung für hohen visuellen und melanopischen Komfort bei hoher Primärenergieeffizienz. FFG-Projekt; Programm: Energie der Zukunft (Projektnummer: 845192).
- /13/ Rheaume, Y, Manning, B, Harper, D, Volicer, L. (1998). Effect of light therapy upon disturbed behaviours in Alzheimer patients. *Am J Alzheimers Dis* 13(6): 291-295.
- /14/ Riemersma-van der Lek, R, Swaab, D, Twisk, J, Hol, E, Hoogendijk, W, van Someren, E. (2008). Effect of bright light and melatonin on cognitive and noncognitive function in elderly residents of group care facilities. A randomized controlled trial. *J Am Med Assoc*, 299(22): 2642-2655.
- /15/ Lieveise, R., Van Someren, E., Nielen, M., Uitdehaag, B., Smit, J., Hoogendijk, W. (2011). Bright light treatment in elderly patients with nonseasonal major depressive disorder: a randomized placebo-controlled trial. *Arch Gen Psychiatry*, 68:61–70.
- /16/ Canellas F, Mestre L, Belber M, Frontera G, Rey MA, Rial R. (2016). Increased daylight availability reduces length of hospitalisation in depressive patients. *Eur Arch Psychiatry Clin Neurosci*. 266(3):277-80.
- /17/ Canazei M (2013). Behavioural, mood-related and user-centred impacts of a 24 hr lighting scheme in a puerperal ward. Conference-Proceedings FNL-27 Symposium "Light and Health", Berlin.

Spektrale winkel- und polarisationsabhängige Transmissionsgrade von 2-fach Verglasungen und Auswertung deren melanopischer Wirksamkeit

B.Sc. E. Proietti, Prof. Dr. F. Feldmeier, Prof. M. Wambsganß – Hochschule Rosenheim

Problemstellung und Forschungsfragen

Die Beurteilung von Verglasungen bzgl. Tageslicht erfolgt durch den mit der menschlichen Augenempfindlichkeit $V(\lambda)$ bewerteten Transmissionsgrad. Für die nicht visuelle biologische Wirkung des Lichtes über das Auge gibt es zudem die in der DIN SPEC 5031-100:2015 gezeigte $s_{\text{mel}}(\lambda)$ Funktion. Die Kennwerte einer Verglasung werden nur für orthogonale Bestrahlung angegeben. Es stellt sich die Frage ob nicht auch der Einfallswinkel und die Polarisation des Lichtes berücksichtigt werden sollten, um Gläser entsprechend ihrer tatsächlichen Einbaulage richtig zu bewerten.

Stand der Wissenschaft/Technik

Die winkel- und polarisationsabhängige Spektraltransmission von Glas ist in der optischen Grundlagenliteratur beschrieben. Studien aus den letzten Jahren zur Vorhersage optischer Eigenschaften von Verglasungen fassen die Polarisationseffekte durch einen senkrecht-parallel Mittelwert zusammen. Das Himmelslicht kann demnach bis zu 80% linear polarisiert sein.

Forschungshypothesen

In der vorliegenden Arbeit werden typische Sonnenschutzverglasungen spektral vermessen und melanopisch bewertet. Dabei werden der unterschiedliche Sonnenstand im Tagesverlauf hinsichtlich Einfallswinkel und Polarisation berücksichtigt. Diese Variablen wurden in ein Simulationsmodell eingesetzt. Auf dieser Basis kann dann auch eine genauere Berechnung der biologischen Wirksamkeit des durch eine Verglasung transmittierten Tageslichtspektrums im Bezug auf reale Himmelszustände und Orientierungen von Glaselementen erfolgen.

Versuchsaufbau

Die Lichttransmission verschiedener Zweifach-Verglasungen wurde für vier Einfallswinkel und vier Schwingungsebenen des linear polarisierten Lichtes nach CIE 130:1998 gemessen und entsprechend dem Verfahren nach EN 410:2011 für $V(\lambda)$ und analog auch für $s_{\text{mel}}(\lambda)$ ausgewertet. Die so erhaltenen Transmissionsgrade wurden dann in einem Simulationsmodell eingegeben und für 750 Himmelszustände überprüft.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Die winkel- und polarisationsabhängige bzgl. $V(\lambda)$ und $s_{\text{mel}}(\lambda)$ bewerteten Transmissionsgraden unterscheiden sich im Einzelfall maximal um 6%. Der Einfluss der Polarisation kann 30% erreichen. Diese Effekte beeinflussen das Ergebnis von Tages- und Jahres-Simulationen um 2%.

Influence of angle of incidence and polarization on the spectral transmittance of coated double glazings: assessment of the melanopic efficacy

B.Sc. E. Proietti, Prof. Dr. F. Feldmeier, Prof. M. Wambsganß – Hochschule Rosenheim

Research issue

The capability of glazings of transmitting light can be assessed by calculating the transmittance τ_v based on the luminosity function $V(\lambda)$. The $s_{\text{mel}}(\lambda)$ sensitivity function is the corresponding curve for the melanopic efficiency of light and can be used to derive the melanopic transmittance τ_{mel} . These characteristic values are always given for orthogonal irradiance. The question is whether the angle of incidence and the polarization should be taken into consideration for an appropriate evaluation of glazings relating to their installed position and orientation.

State of science/technology

The angle and polarization-dependent transmittance of air-glass interfaces is described in basic physics and optics literature. Some studies (ADOPT, ALTSET) on the prediction of angular-dependent properties of glazings summarize the effects of polarization through a perpendicular/parallel average value. Skylight can be 80% linear polarized.

Research hypothesis

In this work we measured the visual and melanopic spectral transmittance of typical coated glazings. Thereby we considered both skylight polarization patterns originated from the sun position as well as the angle of incidence of diffuse skylight elements. These variables have been inserted in a yearly simulation model for the calculation of the angular and polarization-dependent transmittance of glazings in relation to real sky conditions.

Experimental setup

The transmittance of three coated double glazings has been measured according to CIE 130:1998 for four angles of incidence and four polarization angles. We carried out the assessment using the $V(\lambda)$ and $s_{\text{mel}}(\lambda)$ functions conforming to EN 410:2011 and the DIN SPEC 5031-100:2015 standards. The obtained transmittance values have been set in a simulation model and investigated for 750 different setups (e.g. sky conditions, glazing orientation, latitude).

Results in comparison with previous findings

The maximal difference between melanopic and visual angular- and polarization-dependent transmittance is for single measurements around 6%. The influence of polarization can reach 30%. That has an effect on the outcome of yearly simulations of only 2%.

Spektrale winkel- und polarisationsabhängige Transmissionsgrade von 2-fach Verglasungen und Auswertung deren melanopischer Wirksamkeit

*B.Sc. E. Proietti, Prof. M. Wambsganß, Prof. Dr. F. Feldmeier
Hochschule für angewandte Wissenschaft - Rosenheim
Hochschulstraße 1, 83024 Rosenheim (Germany)*

Zusammenfassung/Summary

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei typische Zweifach-Sonnen- und Wärmeschutzverglasungen spektral vermessen und melanopisch bewertet. Die Lichttransmission wurde für vier Einfallswinkel und vier Schwingungsebenen des linear polarisierten Lichtes nach CIE 130:1998 gemessen und entsprechend dem Verfahren nach EN 410:2011 für $V(\lambda)$ und analog auch für $s_{mel}(\lambda)$ ausgewertet. Diese zwei Variablen wurden in ein Simulationsmodell eingesetzt. Die winkel- und polarisationsabhängige mit $V(\lambda)$ bzw. $s_{mel}(\lambda)$ bewerteten Transmissionsgrade unterscheiden sich maximal um 6%. Der Einfluss der Polarisation kann bis zu 30% erreichen.

Für eine realitätsnahe Beurteilung wurden die $V(\lambda)$ bzw. $s_{mel}(\lambda)$ bewerteten Transmissionsgrade in ein Simulationsmodell eingesetzt. In den Ergebnissen verschiedener Tages- und Jahressimulationen zeigen sich noch Unterschiede um 2%.

Fragestellung

Die Beurteilung von Verglasungen erfolgt in der Regel durch den bezüglich der menschlichen Augenempfindlichkeit $V(\lambda)$ bewerteten orthogonalen Lichttransmissionsgrad. Für die nichtvisuelle biologische Wirkung des Lichtes gibt es die von DIN SPEC 5031-100:2015 angebotene Möglichkeit, die Wirkung der Sonnenstrahlung auf das Melatonin durch $s_{mel}(\lambda)$ zu beschreiben. Damit können Kennwerte einer Verglasung für orthogonale Bestrahlung angegeben werden. Um die Verhältnisse bei Verwendung der Gläser realistisch zu erfassen, sollten auch der Einfallswinkel und die Polarisation des Lichtes berücksichtigt werden.. Normative Berechnungsmethoden für den visuellen und melanopischen Lichttransmissionsgrad von Verglasungen sind nur für orthogonale Bestrahlung bekannt. In der Regel wird die Polarisation in diesen Berechnungen nicht explizit berücksichtigt, jedoch wirken sich Polarisation und Einfallswinkel beide auf den Transmissionsgrad von Glas und Verglasungen aus. Das Himmelslicht kann bis zu 80% linear polarisiert sein: die Richtung und die Intensität dieser Polarisation hängen u.a. von der Sonnenposition ab. Es stellt sich die Frage ob nicht auch diese beiden Einflüsse in der Praxis berücksichtigt werden sollten, um Gläser entsprechend ihrer tatsächlichen Einbaulage sowie ihrer biologischen Wirkung auf den Menschen richtig zu bewerten.

Forschungshypothese

Eine Verknüpfung der Informationen über Himmelspolarisation und polarisationsabhängigen Transmissionsgrad könnte zusätzliche Erkenntnisse über die günstigere Einbaulage von Verglasungen (Modell, Orientierung, Neigung) in Bezug auf ihre Lichttransmission liefern. Die Untersuchung wurde für den visuelle und den

melanopische Transmissionsgrad durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchung wurden in verschiedenen Tages- und Jahres-Simulationen verwendet, um zu prüfen, ob diese Einflüsse zu unterschiedlichen und eventuell falschen Einschätzungen der Tageslichtversorgung in Innenräumen führen können. Die Folgen einer signifikanten Über- oder Unterschätzung der Transmissionsgrade könnten u.a. eine unangemessene installierte Leistung, eine niedrige Energieeffizienz oder eine unbefriedigende Nutzerakzeptanz der Beleuchtung sein. Im Rahmen dieser Arbeit wurde nur die diffuse und polarisierte visuelle Komponente der Solarstrahlung betrachtet, die vom Himmelsgewölbe auf eine vertikale Glasoberfläche trifft. Die direkte Sonnenstrahlung sowie die von der Erdoberfläche reflektierte Strahlung wurden nicht berücksichtigt.

Theoretische Grundlagen

Himmelspolarisation

Das Sonnenlicht ist im Ganzen unpolarisiert. In der Erdatmosphäre entsteht durch Streuung an Luftmolekülen, Partikel und Aerosole (Eiskristalle, Wassertröpfchen) linear polarisiertes Licht. Ein Maximum der Polarisation beobachtet man an den Punkten, deren Winkelabstand zu der Sonne etwa 90° beträgt. Die Schwingungsrichtung der teilweise polarisierten Strahlung liegt dabei im Allgemeinen senkrecht zu der durch die Sonne, den Beobachter und den betrachteten Himmelspunkt festgelegten Ebene. Messungen des maximalen Polarisationsgrad ergeben für klaren Himmel Werte von 50% in Städten und bis 80% in Gebieten geringerer Luftverschmutzung. Der Polarisationswinkel folgt derselben Geometrie des klaren Himmels. Bei bewölktem Himmel erreicht der Polarisationsgrad maximale Werte von 40%. Dabei folgt der Polarisationswinkel der Geometrie des klaren Himmels. Für nebligen oder stark bedeckten Himmel kommt die natürliche Beleuchtung mehr oder weniger aus allen Richtungen und deshalb ist der Polarisationsgrad niedrig und bei Regen gleich 0%.

Fresnelsche Gleichungen

Die physikalische Grundlagenliteratur kennt vier Gleichungen für die winkel-, brechzahl- und polarisationsabhängige Reflexion und Transmission bei isotropen und nichtabsorbierenden Medien, die zuerst A. Fresnel (1821) aus seiner elastischen Lichttheorie (Wellentheorie des Lichts) abgeleitet hat. Die Fresnelschen Formeln beschreiben das Material Glas als optisch neutrales (im Sinne von nicht farbig) und nicht absorbierendes Medium. Der durch die Fresnelschen Formeln berechenbare orthogonale Lichttransmissionsgrad liegt mit diesen Voraussetzungen für die Grenzfläche Glas - Luft bei 0,96 und liefert damit für Einfachglas einen Transmissionsgrad von 0,92. Bei moderne Mehrscheibenverglasungen finden zwischen den Scheiben multiple interne Reflexionen und aufgrund der Beschichtung Absorptionsphänomene (statt, so dass die Transmissionsgrade teilweise erheblich geringer sein können

Vorstudien

Im Rahmen zweier EU-Projekte (ALTSET und ADOPT) wurden winkelabhängige Transmissions- und Reflexionsgrade von Verglasungsproben gemessen. In den Studien wurde festgestellt, dass für vertikale Oberfläche die größten Unterschiede der spektralen Transmission und Reflexion bei Beschichtungen zwischen 40° und 70° Einfallswinkel

auftreten. Der Einfluss der Polarisierung wurde in beiden Studien berücksichtigt: die Messungen wurden für senkrecht und parallel polarisiertes Licht durchgeführt. Im ADOPT-Projekt erscheint diese Variable nicht explizit in den vorgeschlagenen Algorithmen. Im ALTSET-Projekt wurden die optischen Eigenschaften getrennt für die zwei Schwingungsebenen gemessen, dann für die Auswertung als Mittelwert zusammengefasst. Einerseits wurde in der Zusammenfassung der Studien erklärt, dass man die Fresnelschen Gleichungen nicht immer als Lösung verwenden kann, weil dies genaue – und nicht immer verfügbare – Informationen über die Beschichtung benötigen. Andererseits ist eine direkte Messung des winkelabhängigen Verhaltens von Transmission und Reflexion für jede existierende Kombination von Glasaufbau und Beschichtung lt. den Autoren dieser Studien nicht praktikabel. Die Bestimmung der winkelabhängigen spektralen Eigenschaften von Verglasungen setzt tendenziell schwierige und teure Messverfahren voraus. In beiden Projekten wurden einige kritische Punkte bezüglich Messtechnik und -verfahren festgestellt, die auch im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt wurden.

Messung

Die Messung fand im Dezember 2015 im Lichtlabor des Instituts für Fenstertechnik (IFT) in Rosenheim statt. Drei in dieser Arbeit gemessene Verglasungen wurden von der Firma Saint Gobain im Juli 2015 geliefert: SGG Climaplust Cool-Lite Xtreme (Probe II, $\tau_v=60\%$), SGG Climaplust ST 150 45/37 Neutral (Probe III, $\tau_v=46\%$), SGG Climaplust Ultra N (Probe IV, $\tau_v=80\%$). Die Messung wurde nach der CIE 130:1998 Richtlinie („Measurement of transmission characteristics using a sphere radiometer/photometer – Transmittance for directionally incident radiation – Integrating sphere methods“) durchgeführt. Abweichend vom CIE Verfahren stand eine Ulbricht-Kugel mit einem anderen Verhältnis zwischen Kugeldurchmesser und Kugelöffnung zur Verfügung. Zudem wurden entsprechend der Zielsetzung der Arbeit ein Polarisator und eine Blende eingesetzt: die verwendete Blende vermindert eventuelle Reflexionen am Polarisator. Für die Messungen wurde ein auf einem beweglichen Arm montierter 750 W Halogenstrahler, verwendet, dessen Licht nicht polarisiert ist. Diese Komponenten wurden auf zwei Stative gebaut. Der Transmissionsgrad des Polarisators wurde berücksichtigt. Die Messungen mit Einfallswinkel größer als 60° haben eine zu große Messunsicherheit ergeben und wurden deshalb in der Auswertungsphase nicht verwendet.

Die Messungen wurden für drei Verglasungsproben (II, III, IV, plus Messung ohne Probe), vier Einfallswinkel (0° , 20° , 40° und 60°) und vier Polarisationswinkel (0 , $\pi/4$, $\pi/2$ und $3\pi/4$, plus eine Messung ohne Polarisator) durchgeführt. Es wurden periodische Wiederholungen von Testmessungen (Kugel dunkel und Lampenspektrum) zur Überprüfung der Messtechnik durchgeführt. Insgesamt wurden 80 Spektren in der Auswertungsphase verwendet.

Auswertung

Die Ergebnisse der Messung des orthogonalen Transmissionsgrades (τ_v) für unpolarisiertes Licht sind vergleichbar mit den im Herstellerkatalog angegebenen Transmissionswerten ($\Delta_{\max}=3\%$). Die winkel- und polarisationsabhängige bzgl. $V(\lambda)$ - und $s_{\text{mei}}(\lambda)$ -bewerteten Transmissionsgrade unterscheiden sich maximal um 6% (s. Abb. 1a).

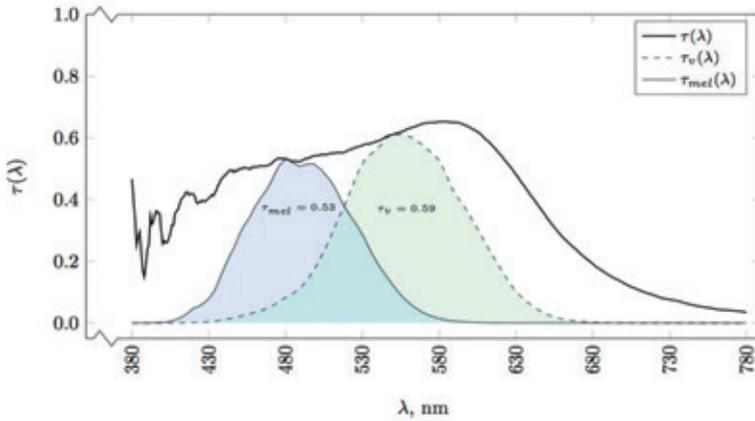


Abb. 1: Beispiel von $V(\lambda)$ - und $s_{mel}(\lambda)$ -bewerteten Transmissionsgrad: $\tau_v - \tau_{mel} = 6\%$ (Probe II, Einfallswinkel 60° , p-polarisiertes Licht)

Im Einklang mit der physikalischen Theorie gibt es zwischen Transmissionsgraden (τ_v) mit kleinen Einfallswinkeln keinen signifikanten winkel- oder polarisationsabhängigen Unterschied ($2\% < (T_{20^\circ} - T_{40^\circ})_{max} < 5\%$). Ein Vergleich der theoretischen (durch die Fresnelschen Gleichungen berechneten) und der gemessenen Transmissionsgrade ergibt mit dem Einfallswinkel steigende Abweichungen: $\Delta_{max,0^\circ} = 3\%$, $\Delta_{max,20^\circ} = 5\%$, $\Delta_{max,40^\circ} = 10\%$, $\Delta_{max,60^\circ} = 20\%$ (s. Abb. 2). Der Mittelwert dieser Abweichungen liegt nicht bei null, sondern es gibt systematische Abweichungen bis zu 10%: die theoretischen Transmissionsgrade überschätzen tendenziell die gemessenen Transmissionsgrade.

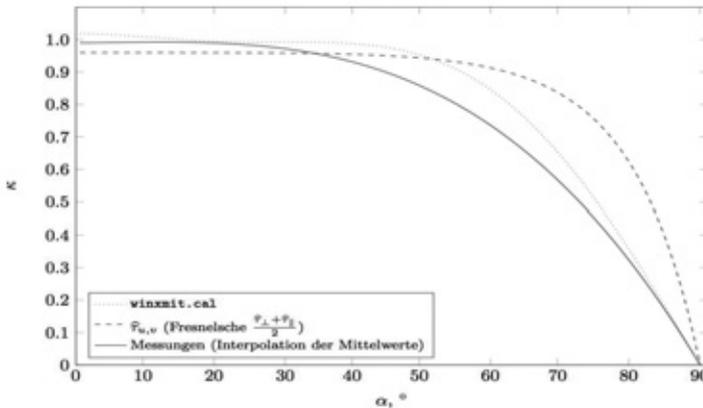


Abb. 2: Korrekturfunktionen κ des orthogonalen Transmissionsgrad in Abhängigkeit vom Einfallswinkel: Fresnelschen s-/p-Mittelwert (Strichlinie), Software für Lichtsimulation Radiance (Punktlinie), Interpolation der Mittelwerte für die im Rahmen dieser Arbeit gemessene Proben (Vollinie).

Die Betrachtung der Polarisierung als senkrecht-paralleler Mittelwert (wie in den Projekten ADOPT und ALTSET) ergibt Transmissionsgrade (τ_v), die sich dem Wert für unpolarisiertes Licht annähern. Jedoch kann es zwischen Transmissionsgraden (τ_v) für senkrechte und parallele Polarisation bei großen Einfallswinkeln signifikante Unterschiede von $\Delta_{\max,40^\circ}=15\%$ bzw. $\Delta_{\max,60^\circ}=31\%$ geben. Insbesondere diese letzte Feststellung war der entscheidende Input für die angestrebte Untersuchung in der folgenden Simulationsphase. Dort wurde überprüft, ob in einem dynamischen Modell dieser Unterschied systematische (z.B. orientierungsabhängige oder verglasungsspezifische) Einflüsse auf den gesamten visuellen und melanopischen Transmissionsgrad von Verglasungen haben könnte.

Simulation

Die Simulation wurde mit Hilfe der Software MATLAB durchgeführt. In einem Skript wurden die Daten bezüglich zeitlicher und geographischer Koordinaten, Orientierung und Neigung der Verglasung sowie Parameter des Himmelsmodells nach CIE S 011/E:2003 eingegeben. Aus diesen Daten und aus Literaturquellen wurden in einem mathematisch definierten Himmelsgewölbe der Polarisationsgrad und Polarisationswinkel jedes kleinen Himmelssektors $d\Omega$ ($=1^\circ \times 1^\circ$) ermittelt. Diese Information, zusammen mit der Ursprungsrichtung des Himmelsstrahls, erlaubt die Berechnung des winkel- und polarisationsabhängigen Transmissionsgrades für $d\Omega$. Die Berechnung der Transmissionsgrade wurde für drei Fälle durchgeführt: Berechnung durch die theoretischen Werte (Fresnelschen Formeln, Berücksichtigung der Polarisation als senkrecht-paralleler Mittelwert), Berechnung aus den Messdaten mit unpolarisiertem Licht), Berechnung aus den Messdaten mit Berücksichtigung der tatsächlichen Polarisation jedes Himmelssektors $d\Omega$. Es wurden Tagessimulationen (stündlich von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang) und Jahressimulationen (monatlich von 01. Januar bis 01. Dezember) für vier geographische Breiten (Rom, Rosenheim, Berlin, Stockholm) und vier Orientierungen der Verglasung (Nord, West, Süd, Ost) durchgeführt. Der maximale Unterschied zwischen den Messungen basierten Simulationen mit und ohne Berücksichtigung der Polarisation ist 3% ($\Delta_{\max,\text{Jahr}}=2\%$, $\Delta_{\max,\text{Tag}}=3\%$, $\Delta_{\max,\text{Orientierung}}=3\%$, $\Delta_{\max,\text{Breite}}=1\%$). Ein Beispiel der Ergebnisse ist in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Orthogonaler Transmissionsgrad nach Angabe des Herstellers, winkelabhängiger Transmissionsgrad nach Fresnel (s-/p-Mittelwert) und Mittelwerte der Simulationen (n=192) für unpolarisiertes und polarisiertes Licht (Himmel: CIE Typ 13 (klar), maximaler Polarisationsgrad = 0.5).

Probe	Norm (τ_v)	Fresnelschen Gleichungen	Messung (unpolarisiert)		Messung (polarisiert)	
			T_v	T_{mel}	T_v	T_{mel}
II	60%	56%	51%	50%	52%	51%
III	46%	43%	38%	38%	39%	39%
IV	80%	75%	67%	67%	69%	69%

Fazit

Der im Herstellerkatalog angegebene und in der Norm vorgesehene orthogonale Transmissionsgrad überschätzt systematisch das Transmissionsvermögen einer Verglasung. Eine eventuelle winkelabhängige Korrektur des Normwertes nach Fresnel reduziert insgesamt diesen Unterschied, jedoch besteht trotzdem eine Differenz mit den simulierten Werten, in denen senkrechte und parallele Polarisation für jeden Himmelselement betrachtet wurden. Obwohl die Polarisation einen deutlich starken Einfluss im Einzelfall haben kann, bleiben die Winkel- und Polarisationseffekte bei Tageslicht im Mittel um nur 2%. Visueller und melanopischer Transmissionsgrad unterscheiden sich um maximal 2% und damit unwesentlich. Die Effekte von unterschiedlichen Polarisationsgraden und -winkeln von mehreren Richtungen kompensieren sich offensichtlich in Tages- bzw. Jahressimulationen.

Literaturquellen (Auswahl)

Bohren, Craig F. ; Clothiaux, Eugene E.: Fundamentals of atmospheric radiation – An introduction with 400 problems. Wiley-VCH, 2006

Commission Internationale de l'Eclairage: Practical methods for the measurement of reflectance and transmittance (CIE 130:1998). 1998

Hutchins, M.G. et al.: Measurement and prediction of angle-dependent optical properties of coated glass products: results of an inter-laboratory comparison of spectral transmittance and reflectance. In: Thin solid films (2001), Nr. 392, S. 269–275

Können, G.P.: Polarized light in Nature. Cambridge University Press, 1985

McCartney, Earl J.: Optics of the atmosphere. John Wiley and sons, 1976

Platzer, Werner J.: Project ALTSET - Angular-dependent Light and Total Solar Energy Transmittance for complex glazings – Intercomparison testing on conventional glazings. Technical Report, 1998

Pomozi, István et al.: How the clear-sky angle of polarisation pattern continues underneath clouds: full-sky measurements and implications for animal orientation. In: The journal of experimental biology (2001), Nr. 204, S. 2933–2942

Rubin, M. ; Powles, R. ; ROTTKAY, K. V.: Models for the angle-dependent optical properties of coated glazing materials. In: Solar Energy 66 (1999), Nr. 4, S. 267–276

Smith, Glenn S.: The polarization of skylight: an example from nature. In: American Journal of Physics 75 (2006), Nr. 1, S. 25–35

Light ratios, satisfaction, user perception, and general health in (day)lit office landscapes

Lichtverhältnisse, Zufriedenheit, Benutzer-Wahrnehmung und Gesundheit in (tages)lichtbelegten Großraumbüros

Juliëtte van Duijnhoven^{1,*}, Myriam Aries¹, Alexander Rosemann¹, Helianthe Kort^{1,2}

¹Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands

²University of Applied Sciences, Utrecht, The Netherlands

*Corresponding email: j.v.duijnhoven1@tue.nl

Research issue

Conventional office spaces have been adapting towards office landscapes in order to support employees' interaction and collaboration within a company. Previous research mostly investigated work-related issues in traditional offices. However, the transformation towards office landscapes may lead to new or other health issues.

Work-related health issues can be psychological, musculoskeletal, or physiological. These health issues can have a lighting related origin; therefore, this study focuses on the lighting conditions within the office environment. Because office landscapes are a relatively new concept, it is still uncertain which aspects of lighting may impact occupants' health.

State of science/technology

Light can directly or indirectly influence human's health. Multiple studies investigated the effects of office lighting on employees' health; however, most research has been performed in conventional office spaces or laboratories.

Research hypothesis

Recommendations from the Dutch Building Code are developed in order to create functional and safe environments. Creating healthy office environments requires additional attention since the requirements for functional and safe conditions may not automatically lead to healthy environments. Therefore, lighting conditions need to be assessed objectively and subjectively.

Experimental setup

In an exploratory study over five days in an office landscape in the Netherlands user perception and satisfaction about lighting conditions by both daylight and electric lighting and general health were investigated and evaluated in combination with measurements of the (day)light conditions.

Preliminary results and conclusion

This study found deviations between objective and subjective measures. In addition, correlations between light ratios and self-reported satisfaction with lighting or self-reported general health were found to be not always statistically significant throughout the duration of the experiment. The current study recommends that objective and subjective assessments for lighting conditions need to be considered.

Light ratios, satisfaction, user perception, and general health in (day)lit office landscapes

Lichtverhältnisse, Zufriedenheit, Benutzer-Wahrnehmung und Gesundheit in (tages)lichtbeleuchteten Großraumbüros

Juliëtte van Duijnhoven^{1,*}, Myriam Aries¹, Alexander Rosemann¹, Helianthe Kort^{1,2}

¹ Eindhoven University of Technology, the Netherlands

² University of Applied Sciences, Utrecht, the Netherlands

* Groene Loper, Gebouw 6, VRT 6.D07, Postbus 513, 5600 MB Eindhoven, j.v.duijnhoven1@tue.nl

Summary

(Day)light in office buildings has already been proven to be a beneficial contributor to health. However, people's perception of the physical light environment deviates significantly from objective measurements. Large differences between user's perception and objective light parameters, such as illuminance level or daylight contribution, could lead to people interfering with the automated lighting system which then may not be able to deliver the intended employee's health benefits. This study found deviations between objective and subjective measures. In addition, correlations between daylight/electric light ratios (DL/EL) and self-reported satisfaction with lighting or self-reported general health were found to be not always statistically significant throughout the duration of the experiment. Further research should focus on the differences between subjective and objective light parameters and potential mediators between office lighting and occupational health.

1 Introduction

Previous studies indicated beneficial effects of luminous radiation on human's health and well-being (e.g. (Boyce, 2014), (Liu & Wojtysiak, 2013), (Aries, Aarts, & van Hoof, 2013), (Das, 2015)). Both daylight and electric light contribute to human's luminous exposure.

Galasiu & Veitch (2006) reviewed the literature regarding occupant's preferences and satisfaction about lighting in daylit offices. Two studies concluded that the majority of participants preferred daylight over electric light ((Cuttle, 1983), (Veitch, Hine, & Gifford, 1993)). Veitch & Gifford (1996) reported that 52% of the participants believed they performed best when working in places illuminated by natural light. Moreover, Heerwagen and Heerwagen (1986) reported that the majority of participants believed that daylight was better for their general health, visual health, and psychological comfort.

Not all previously mentioned studies are performed in (open-plan) offices. These days, more and more offices transform from conventional offices into office landscapes. Previous research focused on cubicle offices rather than open office environments, which initiated the relevance to investigate the effects of (day)lighting on health in an office landscape.

This study investigated the following hypotheses:

1. Objective and subjective measures of light parameters in offices are uncorrelated;

2. The DL/EL ratio correlates with satisfaction with lighting;
3. The DL/EL ratio correlates with general health;
4. Satisfaction with lighting correlates with general health.

2 Methodology

A mixed-methods experiment was performed during one work week in spring 2016 in an office building in the Netherlands, see Figure 1. The weather conditions varied from an overcast sky on Monday, Tuesday, and Wednesday towards a clear sky on Thursday and Friday.



Figure 1: Office landscape - experiment location

Physical indoor environmental measurements were performed and questionnaires were distributed during five normal workdays from March 23 until March 27, 2016. Horizontal illuminances were measured using Hagner photometers at desk level at three different locations on two floors in the office building. Two measurement locations were situated on the ground floor, one was located on the first floor. Night measurements (without daylight) allowed to determine the electric light contribution for various dimming levels as part of the total measured illuminance levels during the day. The daylight contribution results from the difference of the total illuminances and the electric light contribution. These two contributions were combined to the DL/EL ratio, ranging from 0 to 10 with by 0 meaning 'only daylight' and 10 'only electric light'.

Three validated questionnaires were distributed: KSS (Karolinska Sleepiness Scale), OLS (Office Lighting Survey), and SF-36 (Short-form 36 items). The KSS was used to measure self-reported sleepiness on a scale from 1-10 (Shahid, Wilkinson, Marcu, & Shapiro, 2011), the OLS (43 items) was used to measure user's perception about the lighting conditions (Eklund & Boyce, 1996), and the SF-36 (36 items) was used to measure self-reported general health (Ware, 2009).

Two questions were added to the OLS: 'Tick the light sources which are available at your workplace right now (answer options: daylight, electric light)', and 'What do you think is the ratio between daylight and electric light right now? (expressed in a scale from 0-10)'. During the five workdays, the employees were asked to answer the KSS four times a day (9:00, 11:15, 14:00, and 16:15, respectively), the OLS once a day at the end of the workday, and the SF-36 only on the first afternoon of the experiment. The response rates

for the OLS questionnaire during this five-day experiment varied from 24% to 59%, resulting in 55 participants and 117 completed OLS questionnaires in total. The gender and age category of the participant were asked in the SF-36 which was only distributed on Monday afternoon. The group of 55 participants who filled in the OLS consisted of 17 men, 20 women, and 18 unknown genders. Their age was distributed as shown in Table 1.

Table 1: Age distribution of the participants who completed the OLS

Age category	Number of participants
Under 25 years	1
25-34 years	13
35-44 years	13
45-54 years	9
55-64 years	1
65 years or older	0
Missing	18
Total	55

All data was analysed using MATLAB R2015a and SPSS Statistics 22. The correlations were calculated using Spearman's rho. This non-parametric test was used because the majority of the data was not normally distributed and because most variables in the analysis were ordinal variables. All the tests were applied two-sided using a significance (p) level of 0.05 to indicate statistical significance (indicated with * in Tables).

3 Results

3.1 Objective and subjective DL/EL ratios in offices

Objective and subjective DL/EL ratios were compared by calculating their correlation coefficients per day of the work week. The correlation is statistically significant for three out of five days and for the analysis of the combined dataset (see Table 2). Using Cohen's conventions (1988) to interpret effect size, a correlation coefficient of approximately 0.3 is considered a moderate correlation and a coefficient of at least 0.5 represents a strong or large correlation.

Table 2: Correlation coefficients between objective and subjective DL/EL ratios per day of the work week

	Monday	Tuesday	Wednes- day	Thurs- day	Friday	All days
Spearman's rho (ρ)	-0.530*	0.180	-0.155	0.778*	0.776*	0.329*
Significance level (p)	.001	.370	.554	.000	.001	.000
Number of data points (n)	37	27	17	21	15	117

The absolute differences between the objective and subjective measures are calculated to test whether there is a statistically significant correlation between this difference and the objective ratio. This correlation for the combined dataset is significant ($\rho=0.325$, $p=.000$, $n=117$). The mean, the standard deviation, and the maximum all differ between subjective and objective ratios, with a slightly downward trend from Monday to Friday (see Table 3).

Table 3: Differences between objective and subjective DL/EL ratios for the five-day experiment

	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	All days
Number of data points (n)	37	27	17	21	15	117
Mean	2.27	1.44	1.59	1.62	1.33	1.74
Std. Deviation	1.774	1.311	1.661	1.161	0.976	1.492
Minimum	0	0	0	0	0	0
Maximum	7	5	6	4	3	7

The added question to the OLS on the available light sources at the workplace resulted in varying answers. Each day a percentage of the participant sample (from 6 to 43%) answered either 'only daylight' or 'only electric light' while the answers were all given during the day when both light sources contributed to the illumination of the workplaces.

3.2 DL/EL ratios and satisfaction with lighting

One question of the OLS survey ('Overall, how satisfied are you with the lighting at your office or workspace?') is used to test the relation between the daylight contribution and the satisfaction with lighting. The correlations between this question about the satisfaction with lighting and both, the objective and subjective, ratios proved not to be statistically significant (all $p>.1$).

3.3 DL/EL ratios and general health

None of the calculated correlation coefficients (separated per work day and for the combined dataset) for the DL/EL ratios and general health reached statistical significance (all $p>.2$).

3.4 Satisfaction with lighting and general health

The analysis shows that on Monday, Wednesday, and for the combined dataset the correlation between satisfaction with lighting and general health is significant and its size is moderate to large ($\rho = 0.714$; $p = .000$, $\rho = 0.732$; $p = .001$, and $\rho = 0.447$; $p = .000$ respectively), see Table 4.

Table 4: Correlation coefficients between lighting satisfaction and general health

	Monday	Tuesday	Wednes- day	Thursday	Friday	All days
Spearman's rho (ρ)	0.714*	0.290	0.732*	0.294	0.345	0.447*
Significance level (p)	.000	.142	.001	.196	.207	.000
Number of data points (n)	37	27	17	21	15	117

4 Discussion

In a pilot study performed in the same building in January 2016, objective light measurements were compared with subjective user perceptions about the (day) lighting in the office. This comparison showed a large divergence between these results. The qualitative method improved from informal non-structured non-scheduled interviews in January 2016 to scheduled validated online questionnaires in spring 2016. Using the validated questionnaires in this study led to more reliable datasets.

There is a statistically significant correlation between objective and subjective measures. However, this correlation is only moderate. The direction of the correlation coefficient changes from a large negative correlation on Monday towards a large positive correlation on the two last days of the week. The correlation between the difference from subjective to objective ratio and the objective ratio is significant as well. This correlation indicates that it is more difficult for the users to assess the DL/EL ratio when there is less daylight available. It appears to be very challenging for people to assess which light source, daylight or electric light, contributes in which proportion to the overall lighting amount. In the current study, it was shown that people often misinterpret which light sources are available. It should be mentioned that participants might have misunderstood the two unvalidated questions manually added to the OLS.

This conclusion is in accordance with the work of Wells (1965). He indicated that occupant's assessment of daylight levels was far from accurate when compared to objective measurement data. He also concluded that what people think they need, regarding illuminance level or DL/EL ratio, is independent of the actual physical environment.

Furthermore, the results show that there is no significant correlation between satisfaction with lighting and the DL/EL ratio and none between the DL/EL ratio and general health. On the other hand, the correlation between satisfaction with lighting and general health is found to be significant when analysing the entire dataset collected during the week. This correlation is nearly a strong correlation. Participants who felt healthier were more satisfied with the lighting. This was also the case on two days of the week. The distribution of genders and age categories of the participants throughout the week was close to similar each day. There is no significant correlation between gender and general health; however, the correlation between gender and satisfaction with lighting is close to significant and pointing in the direction that men are less satisfied with the lighting. A larger participant sample is required to verify the significance.

The current study contains two limitations. Firstly, the objective DL/EL ratio was calculated at the three locations in the office building, while the subjective ratios are individual and based on the experienced lighting situation at their individual desks. For comparison between the subjective and objective measures, the measurement location closest to the participant's desk has been chosen as a reference location. It is uncertain how large the influence of the difference in location is. Secondly, the determination of satisfaction with lighting and general health is for each only based on one question from a questionnaire. Calculating a general health score based on 36 items of the SF-36 will lead to more accurate results than relying on just one general question.

5 Conclusions

The current study shows differences between objective and subjective DL/EL ratios. However, the correlation between objective and subjective DL/EL ratios is moderate. This means that it appears to be difficult for users to estimate light parameters; on the other hand, the correlation indicates that it is generally possible.

In addition, no statistically significant correlations were found between the subjective/objective light ratios and general health nor between the light ratios and satisfaction with lighting. Satisfaction with lighting and general health correlate on two days of the week strongly. Overall, the satisfaction with lighting correlates moderately with general health. Healthier people were more satisfied with the lighting in the office landscape.

6 Acknowledgements

The authors would like to thank the company Bolidt (Hendrik-Ido-Ambacht, the Netherlands) and its employees for granting them the opportunity to perform this study in their office building.

7 References

- Aries, M., Aarts, M., & van Hoof, J. (2013). Daylight and health: A review of the evidence and consequences for the built environment. *Lighting Research and Technology*, 47(1), 6–27. <http://doi.org/10.1177/1477153513509258>
- Boyce, P. R. (2014). *Human Factors in Lighting, Third Edition*. CRC Press.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (Second edition). Hillsdale, NJ: Lawrence Earlbaum Associates.
- Cuttle, C. (1983). People and windows in workplaces. In *Proceedings of the People and Physical Environment Research Conference, Wellington, New Zealand* (pp. pp. 203–212).
- Das, S. (2015). Lighting and health of building occupants: A case of Indian information technology offices. *Current Science*, 109(9), 1573–1580. <http://doi.org/10.18520/v109/09/1573-1580>
- Eklund, N. H., & Boyce, P. R. (1996). The Development of a Reliable, Valid, and Simple Office Lighting Survey. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 25(2), 25–40. <http://doi.org/10.1080/00994480.1996.10748145>
- Galasiu, A. D., & Veitch, J. A. (2006). Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review. *Energy and Buildings*, 38(7), 728–742. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.001>
- Heerwagen J.H, Heerwagen, D. R. (1986). Lighting and psychological comfort. *Lighting Design and Application*, 16(4), 47–51.
- Liu, J., & Wojtylsiak, A. (2013). Lighting for health: Biological effects of traditional and ssl illumination. *Light and Engineering*, 21(1), 28–30.
- Shahid, A., Wilkinson, K., Marcu, S., & Shapiro, C. M. (2011). Karolinska Sleepiness Scale (KSS). In *STOP, THAT and One Hundred Other Sleep Scales* (pp. 209–210). New York, NY: Springer New York. http://doi.org/10.1007/978-1-4419-9893-4_47
- Veitch, J. A., & Gifford, R. (1996). Assessing Beliefs about Lighting Effects on Health, Performance, Mood, and Social Behavior. *Environment and Behavior*, 28(4), 446–470. <http://doi.org/10.1177/0013916596284002>
- Veitch, J. A., Hine, D. W., & Gifford, R. (1993). END USERS' KNOWLEDGE, BELIEFS, and PREFERENCES FOR LIGHTING. *Journal of Interior Design*, 19(2), 15–26. <http://doi.org/10.1111/j.1939-1668.1993.tb00159.x>
- Ware, J. E. (2009). SF-36® Health Survey.
- Wells, B. W. P. (1965). Subjective responses to the lighting installations in a modern office building and their design implications. *Building and Environment*, 1, 57–68.

Intelligente Wohnraumbeleuchtung: Herausforderungen und Nutzerakzeptanz

Dipl.-Ing. Architekt Dennis Köhler, M.Sc.; Silke Appelhans, M.Sc.; Lichtforum NRW

Problemstellung und Forschungsfragen

Mit Einzug neuer Erkenntnisse zur Wirksamkeit des Lichts und den Faktoren von „Wohlbefinden“ und „Gesundheit“ sind neue Bewertungsmaßstäbe (Human Centric Lighting, HCL) entstanden, die auch bei der häuslichen Beleuchtung Beachtung finden müssen. Für eine präzise Abstimmung notwendiger Lichtqualitäten und -quantitäten sind die Intelligenz einzelner Leuchten und ihr systemischer Zusammenhang in verschiedenen Nutzungsszenarien hochbedeutend. Welche technologischen und strategischen Herausforderungen ergeben sich aus diesen Entwicklungen für den Wohnraum? Wie stellt sich die Akzeptanz der Nutzer dar, sensorbestückte und automatisierte Leuchten im Privatbereich einzusetzen?

Stand der Wissenschaft/Technik

Wohnraumbeleuchtung steht nur marginal im Fokus beleuchtungstechnischer Forschung. Mit Einzug der Themen „Smart Home“ oder „Ambient Assisted Living“ erhält sie wahrnehmbare Aufmerksamkeit. Parallel dazu wächst das Interesse an der kommerziellen Nutzung von HCL und intelligenter Beleuchtung. An dieser Schnittstelle arbeitet das Lichtforum NRW an einem vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben.

Forschungshypothesen

Der stärker werdende Einzug von LEDs in die Wohnraumbeleuchtung erhöht nicht nur den technischen und politisch-strategischen Produktanspruch, sondern erweitert die Wertschöpfung und die Palette der Beleuchtungsmöglichkeiten. Daraus resultieren Änderungsprozesse – vom Konsum- zum Investitionsgut, vom Einzelprodukt zum Leuchtensystem etc. –, die eine differenzierte strategische und systematische Neuausrichtung bei der Entwicklung und In-Marktbringung entsprechender Beleuchtungsinfrastruktur bedingen.

Versuchsaufbau

Für ein Meinungs- und Erwartungsbild zur „Zukunft der Wohnraumbeleuchtung“ führte das Lichtforum NRW von Mai bis August 2015 eine im Internet aufrufbare Umfrage durch. Es wurde Daten von 349 Teilnehmerinnen und Teilnehmern statistisch ausgewertet.

Ergebnisse

Der Boden für eine intelligente und auf den Menschen abgestimmte Beleuchtung ist bereitet. Eine intelligente Beleuchtung kann sich im Wohnumfeld jedoch nur etablieren, wenn ihre atmosphärische Wirkung – ob durch das Licht oder die Leuchte – gewahrt wird und eine manuelle Unterbrechung der Selbstständigkeit sichergestellt ist. Mehrwerte über Konnektivität zu anderen Haushaltsgegenständen müssen zuverlässig und sinnvoll sein und sich im Alltag bewähren. Ob und wie Informationen des persönlichen Umfelds detektiert werden, ist dabei eine Frage der gegenüberstehenden Nutzwerte der Automation.

Smart lighting for residential applications: challenges and user acceptance

Dipl.-Ing. Architekt Dennis Köhler, M.Sc.; Silke Appelhans, M.Sc.; Lichtforum NRW

Problem statement and research questions

By reason of new insights into the effectiveness of light and the factors “well-being” and “health” new criterions (Human Centric Lighting, HCL) have arisen which are to be considered in residential lighting. In favour of a precise adjustment of necessary lighting qualities and quantities the intelligence of individual luminaires and their systematic connection in various use cases and scenarios are most important. Which technological and strategic challenges evolve from these developments with regard to residential applications? Do users accept sensor-equipped and automated luminaires in their privacy?

State of the art

When it comes to research in lighting techniques residential lighting represents only a marginal aspect. Just the advent of the topics “Smart Home” or “Ambient Assisted Living” generates attention to it. Parallel, the interest in commercial utilisation of HCL and smart lighting is on the rise. At the intersection of these two general topics Lichtforum NRW works in a research project funded by the BMBF.

Research hypothesis

As more and more LEDs find their way into residential lighting applications not only technical and political strategic demands on the product increase but this development also broadens the added value and the scope of lighting prospects. Results are changes in processes – consumer goods become capital goods, individual luminaires become part of a lighting system etc. – which require sophisticated strategic and systematic realignments both in research and distribution (product launch) of corresponding lighting equipment.

Experimental setup

To obtain a set of opinions and expectations regarding “The future of residential lighting” Lichtforum NRW conducted a survey, accessible through the Internet, from May to August 2015. Data was collected from 349 participants and evaluated statistically.

Results

The ground for smart and human centric lighting is prepared. However, smart lighting can only be established in residential settings if its atmospheric impressions – either through light or luminaire – are preserved and a manual interruption of the automatic is guaranteed. Added values through connections to other household articles have to be reasonable and reliable and have to prove their value in daily routine. Whether and how information is gathered in private settings is withal a question of the opposite utility values of automation.

Intelligente Wohnraumbelichtung: Herausforderungen und Nutzerakzeptanz

*Dipl.-Ing. Architekt Dennis Köhler, M.Sc.; Silke Appelhans, M.Sc.
Lichtforum NRW, Möhnestraße 55, 59755 Arnsberg, www.lichtforum-nrw.de*

Zusammenfassung

Welches Meinungsbild gegenüber intelligenter Wohnraumbelichtung zeigt sich bei privaten Anwendern? Im Rahmen einer Umfrage wurde deutlich, dass häusliche Beleuchtung ein wichtiger Faktor für das Wohlbefinden ist, eine angenehme Atmosphäre schaffen und positiv auf das Befinden eingehen sollte. Das Bewusstsein über „Human Centric Lighting“ (HCL) und seine Wirkungen ist vor allem bei technikaffinen Personen gegeben. Ebenso ist eine positive Stimmung gegenüber zukünftigen Leuchteigenschaften wie Sensorik und Selbstständigkeit erkennbar. Allerdings sollte immer die Option gegeben sein, die Selbstständigkeit manuell zu unterbrechen. Im Hinblick auf Kommunikation von Leuchten und die Anpassung an körperliche Bedürfnisse divergieren die Meinungen derzeit noch sehr.

1 Technologischer Wandel und Wohnraumbelichtung

In den letzten zehn Jahren hat die LED in ungeahnter Geschwindigkeit an Bedeutung gewonnen. Sie hat viele Paradigmen der Lichttechnik auf den Kopf gestellt, bekannte Quantitäts- und Qualitätsmaßstäbe überholt oder neu definiert. Fundamental sind dabei nicht nur die elektrotechnischen und lichtrelevanten Umbrüche – LEDs ermöglichen die umfängliche Schöpfung neuer Beleuchtungsmehrwerte und die Integration der Beleuchtung in Informationsverarbeitungskontexte. So lassen sich immer einfacher zeit- oder ereignisgesteuert Spektren oder Intensitäten variieren, um gezielt auf die nichtvisuellen Rezeptoren im Auge und damit auf die biologischen Funktionen des Menschen einwirken zu können. Gleichzeitig werden altbekannte Lichtschalter immer mehr durch umgebungs- und ereignisinterpretierende Sensorik oder komplexe Lichtsteuerungen abgelöst. In diesem technologischen Wandel steht die Wohnraumbelichtung alles andere als außen vor, wenn es um aktuelle Megatrends wie z. B. Gesundheit und Wohlbefinden oder Digitalisierung geht (Connectivity, IoT usw.). Welchen Stand hat die mögliche Zukunft der Wohnraumbelichtung jedoch im Meinungsbild privater Anwender? Welche Voraussetzungen bestehen für eine sog. „intelligente Beleuchtung“ im häuslichen Umfeld? Wird eine das Wohlbefinden steigernde Beleuchtung positiv konnotiert? Ist eine sich selbst steuernde Leuchte wünschenswert? Für einen Überblick über diese und weitere Fragen zur „Zukunft der Wohnraumbelichtung“ führte das Lichtforum NRW von Mai bis August 2015 eine im Internet aufrufbare Umfrage durch. Anlass hierzu gab das vom BMBF geförderte Verbundforschungsprojekt „Optimierte Lichtsysteme zur Verbesserung von Leistungsfähigkeit und Gesundheit“.

2 Meinungsbild zur Wohnraumbelichtung – Umfrageergebnisse

Es liegen Daten von 349 Teilnehmerinnen und Teilnehmern vor, von denen 325 Personen die Umfrage abgeschlossen haben – hiervon 68 % Männer und 30 % Frauen (2 % keine Angabe). Personen mit (Fach-)Abitur oder einem akademischen Abschluss sind in hohem Maße repräsentiert. Betrachtet man die Altersverteilung der Teilnehmer, stellen die 41- bis 50-jährigen mit einem Drittel (34 %) die größte Gruppe. 23 % sind zwischen 51 und 65

Jahren alt, während mit ca. je einem Fünftel die 20- bis 30- sowie die 31- bis 40-jährigen vertreten sind. Der Rest ist somit entweder älter als 65 oder jünger als 20. Insgesamt schätzt sich die große Mehrheit der Teilnehmer als technikaffin (69 %) ein. Nur neun Prozent sehen sich als nicht technikaffin – im Folgenden auch „technikfern“ bezeichnet.

2.1 Generelle Meinung zur LED-Beleuchtung

Um die grundsätzliche Haltung der Teilnehmer gegenüber LEDs zu erfahren, wurden zunächst folgende Aussagen zur Bewertung gestellt:

- Aussage #10: Ich stehe Beleuchtung mit LEDs eher skeptisch gegenüber, da man ohne Ausprobieren nicht weiß, wie sie leuchten.
- Aussage #11: LEDs geben ein tolles Licht.
- Aussage #12: Ich glaube, dass LEDs nicht nur gute Seiten haben, sondern auch schädlich für die Umwelt sein können.

Technikaffine Personen haben eine geringere Skepsis gegenüber der LED-Beleuchtung als technikferne. Allerdings gibt fast ein Fünftel der Teilnehmer an, LED-Beleuchtung skeptisch gegenüberzustehen, da die Lichtqualität ohne Test nicht bekannt sei. Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich für die Frage nach der Lichtqualität („tolles Licht“). Hier besteht ein sehr signifikanter Unterschied zwischen Technikaffinen und Technikfernen. Während die Mehrheit (61 %) der Technikaffinen LED-Licht „toll“ bewertet, trifft dies nur auf ein Drittel der Technikfernen zu.¹ An die Umweltschädlichkeit der LED glauben vor allem die Technikfernen. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass selbst nur ein knappes Fünftel (19 %) der Technikfernen der Aussage über die Umweltschädlichkeit zustimmt, während mehr als zwei Drittel der Gesamtstichprobe dieser Aussage nicht zustimmen. LEDs werden somit als nicht umweltschädlich wahrgenommen.

2.2 Aktuelle Meinung zur häuslichen Beleuchtung

Im folgenden Aussageblock wurden Meinungen zur häuslichen Beleuchtung ermittelt (Abb. 1):

- Aussage #13: Für mich ist häusliche Beleuchtung sehr wichtig für mein Wohlbefinden.
- Aussage #14: Ich beschäftige mich sehr viel damit, wie ich meine Beleuchtung zu Hause gestalte.
- Aussage #15: Ich glaube, dass ich bei Beleuchtung viel Energie einsparen kann.
- Aussage #16: Beleuchtung in Wohnräumen sollte maßgeblich funktional sein und beim Sehen helfen.
- Aussage #17: Wohnraumbeleuchtung sollte eine angenehme Atmosphäre schaffen.
- Aussage #18: Beleuchtung, die mir viel Komfort und Funktionen bietet, finde ich sehr wünschenswert.
- Aussage #19: Beleuchtung, die positiv auf mein Befinden eingehen kann, finde ich sehr wünschenswert.

¹ Wert hier und im Folgenden für Summe der Anteile von „stimmt ...“ bzw. „gefällt mir ...“ „... ziemlich“ und „... sehr“ für Zustimmung bzw. Summe der Anteile von „... gar nicht“ und „... wenig“ für Ablehnung.

Für 89 % der Befragten ist Beleuchtung zu Hause wichtig für das Wohlbefinden. Dieser Wert ist bereits sehr hoch, steigt jedoch noch mit zunehmendem Alter. Vor allem Technikaffine beschäftigen sich sehr viel mit der Gestaltung der Beleuchtung zu Hause. Bezüglich der Energieeinsparung glaubt fast die Hälfte, dass sie zu Hause im Bereich der Beleuchtung viel Energie einsparen kann. Ein Fünftel stimmt dieser Aussage nicht zu, wobei hinterfragt werden muss, ob diese 20 % nicht an Einsparmöglichkeiten durch LEDs glauben oder ob sie ihre Beleuchtung bereits auf LED umgestellt haben.

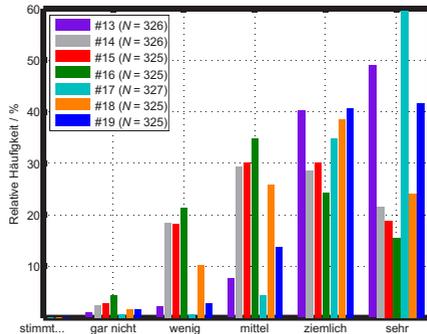


Abb. 1: Aussagen zur Beleuchtung zu Hause (Stichprobengröße N in Klammern).

Vor allem Männer bevorzugen die Funktionalität der Beleuchtung. Der Blick auf die Gesamtstichprobe zeigt allerdings keine eindeutigen Tendenzen. Dementgegen ist das Ergebnis bei der Aussage zur Atmosphäre eindeutig; die Aussage erhält eine universale Zustimmung von fast 95 %. Ein signifikanter Unterschied zeigt sich beim Wunsch nach viel Komfort und Funktionen, der mit der Technikaffinität zunimmt. Betrachtet man jedoch die Gesamtstichprobe, gibt es nur verhaltene Zustimmung für diese Aussage.

Auch für die letzte Aussage des Blocks – einer Überleitung ins nächste Thema – ergibt sich eine hohe Zustimmung (82 %) die verdeutlicht, dass der Wunsch nach positiver Beeinflussung des Befindens durch Beleuchtung besteht.

2.3 Gezielte künstliche Beleuchtung

Es wurde gefragt, von welchen Wirkungen geglaubt wird, dass sie durch gezielte künstliche Beleuchtung geleistet werden können. Der Begriff Human Centric Lighting (HCL) wurde dabei nicht explizit genannt. Beleuchtung kann...

- Aussage #20: meine Gesundheit positiv beeinflussen.
- Aussage #21: mich leistungsfähiger machen.
- Aussage #22: mir bei abendlicher Entspannung helfen.
- Aussage #23: mich besser auf meinen Schlaf vorbereiten.
- Aussage #24: mir beim morgendlichen Aufwachen helfen (Abb.2).

Werden alle Aussagen zusammengefasst, wird deutlich, dass der Großteil der Teilnehmer glaubt, gezielte künstliche Beleuchtung könne positive Wirkungen auf den Menschen haben. Fast die Hälfte der Befragten stimmt mit den Aussagen „ziemlich“ und fast ein Viertel sogar „sehr“ überein. Nur 5 % glauben wenig an eine Wirkung durch Beleuchtung.

Zudem zeigt sich, je technikaffiner sich eine Person einschätzt, desto mehr glaubt sie an die Wirkung gezielter, künstlicher Beleuchtung.

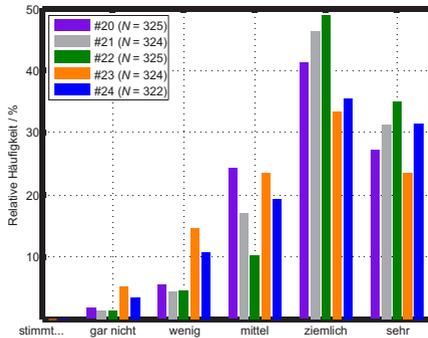


Abb. 2: Fähigkeiten gezielter künstlicher Beleuchtung (Stichprobengröße N in Klammern).

Der Aussage zur Beeinflussung der Gesundheit stimmen mehr als zwei Drittel der Befragten zu. Nach Hinzunahme des knappen Viertels der Unentschlossenen („stimmt mittel“), bleiben lediglich sieben Prozent, die einen Effekt der Beleuchtung auf die Gesundheit nicht erkennen können.

Noch deutlicher sind die Antworten bei den Fragen nach der Leistungssteigerung und der Unterstützung bei abendlicher Entspannung. Nur sechs Prozent der Gesamtstichprobe glauben nicht an eine Leistungssteigerung, während mehr als drei Viertel (78 %) der Aussage zustimmen. Dieser Wert wird noch von der nächsten Aussage übertroffen: 84 % der Befragten glauben, dass Beleuchtung ihnen bei abendlicher Entspannung helfen kann. Hier steigt die Zustimmung zudem mit der Technikaffinität.

Der Aussage, dass Beleuchtung auf den Schlaf vorbereiten kann, stimmen immerhin noch 57 % der Teilnehmer zu, während ein Fünftel nicht daran glaubt. Wie zuvor korreliert die Zustimmung mit der Technikaffinität. So stimmen 61 % der Technikaffinen der Aussage zu, während nur 39 % der Technikfernen meinen, sie stimme (Abb. 3). Zwei Drittel der Teilnehmer glauben, Beleuchtung könne beim morgendlichen Aufwachen helfen; 14 % meinen hingegen, diese Aussage stimme nicht.

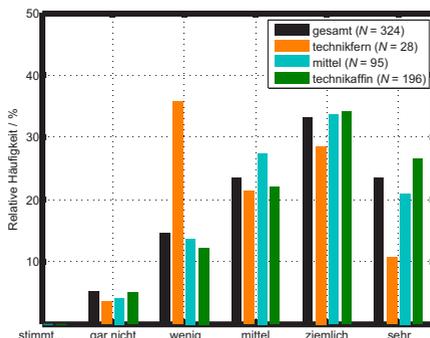


Abb. 3: Beleuchtung kann mich besser auf meinen Schlaf vorbereiten (N=324).

2.4 Beurteilung zukünftiger Eigenschaften von Leuchten im Wohnraum

Als Abschluss wurden mögliche Eigenschaften zukünftiger Leuchten zusammengestellt, die die Teilnehmer nach ihrem Gefallen bewerten sollten:

- Aussage #25: Meine Beleuchtung zu Hause verändert oder schaltet sich selbstständig, je nachdem was für eine Beleuchtung benötigt wird.
- Aussage #26: Ich habe jederzeit die Möglichkeit, die Selbstständigkeit meiner Beleuchtung zu unterbrechen und selbst zu steuern.
- Aussage #27: Meine Leuchten kommunizieren mit anderen Haushaltsgeräten (z. B. wie eine Heizung, die von alleine ausgeht, wenn Fenster geöffnet werden).
- Aussage #28: Meine Leuchten erkennen meine körperlichen Bedürfnisse und passen sich diesen automatisch an.
- Aussage #29: Leuchten haben Sensoren, um das Umfeld und unterschiedliche Situationen zu erkennen.

Der allgemeine Blick auf den Aussagenblock zeigt, dass die vorgestellten Eigenschaften 57 % der Teilnehmer gefallen; lediglich 14 % finden keinen Gefallen daran. Bei der Korrelation mit der Technikaffinität tritt dabei ein hoch signifikanter Unterschied auf: je höher die Technikaffinität, desto höher der Gefallen (Abb. 4a).

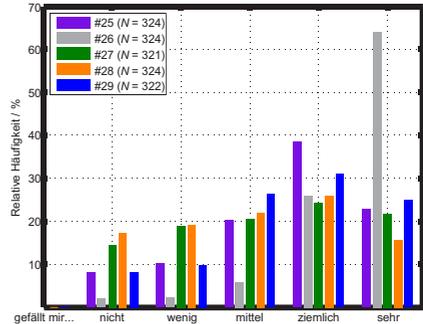
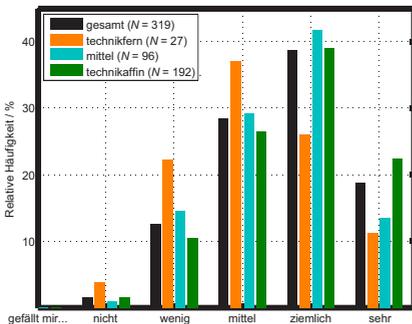


Abb. 4a: Eigenschaften zukünftiger Beleuchtung korreliert mit Technikaffinität (N = 319).

Abb. 4b: Eigenschaften zukünftiger Beleuchtung (Stichprobengröße N in Klammern).

Der detaillierte Blick offenbart (Abb. 4b), dass 61 % der Befragten die Vorstellung einer sich selbstständig einstellenden Beleuchtung gefällt. Gleichzeitig ist der manuelle Eingriff in die Steuerung ein universeller Wunsch der Befragten: 90 % möchten jederzeit die Möglichkeit haben, die Selbstständigkeit der Beleuchtung zu unterbrechen.

Sowohl an der Kommunikation von Leuchten mit anderen Haushaltsgeräten als auch am Erkennen von körperlichen Bedürfnissen finden Technikaffine mehr Gefallen als Technikferne. Zwischen den fünf möglichen Meinungskategorien zeigt sich insbesondere bei der Frage nach dem Erkennen von körperlichen Bedürfnissen eine fast gleichmäßige Verteilung. Die Anteile liegen zwischen minimal 16 % („gefällt mir sehr“) und maximal 26 % („gefällt mir ziemlich“). Die Meinungen gehen somit sehr stark auseinander, weisen allerdings

eine leichte positive Tendenz auf; diese darf jedoch aufgrund des Stichprobenumfanges nicht überbewertet werden. Gleiches gilt für die Aussage nach den kommunizierenden Leuchten, für die sich ein ähnliches Ergebnis ergibt. Mehr als der Hälfte der Teilnehmer (56 %) gefallen Sensoren in Leuchten, 18 % finden wenig oder gar keinen Gefallen an der Vorstellung. Auch bei dieser Aussage liegt die Zustimmung bei den Technikaffinen deutlich höher als bei denen, die mit Technik nur wenig anfangen können.

2.5 Zusammenfassung²

LEDs werden insgesamt positiv bewertet. Nur wenige sehen sie als umweltschädlich bzw. finden keinen Gefallen an ihrem Licht. Allerdings ist noch jeder Fünfte skeptisch, da die Lichtqualität der LEDs ohne Austesten nicht eingeschätzt werden kann. Beleuchtung zu Hause ist sehr wichtig für das Wohlbefinden, sollte eine angenehme Atmosphäre schaffen und positiv auf das Befinden eingehen. Diese Meinungen werden auch im Aussageblock zur gezielten künstlichen Beleuchtung deutlich. Das Bewusstsein über HCL und seine Wirkungen ist bereits verbreitet, vor allem bei den Technikaffinen. Ebenso ist eine positive Stimmung gegenüber zukünftigen Leuchteigenschaften wie Sensorik und Selbstständigkeit erkennbar. Allerdings sollte immer die Option gegeben sein, die Selbstständigkeit der Leuchte manuell zu unterbrechen. Im Hinblick auf Kommunikation von Leuchten und die Anpassung an körperliche Bedürfnisse divergieren die Meinungen derzeit noch sehr.

3 Fazit

Das in der Umfrage ermittelte Meinungsbild zeigt, dass der Grund für eine intelligente LED-Beleuchtung, die HCL ermöglicht, bereitet ist und als Chance genutzt werden kann. Eine intelligente Beleuchtung kann sich im Wohnumfeld jedoch nur etablieren, wenn ihre atmosphärische Wirkung – ob durch das Licht oder die Leuchte als dekorativem Einrichtungsgegenstand – gewahrt wird und eine manuelle Unterbrechung der Selbstständigkeit sichergestellt ist. Mehrwerte über Konnektivität zu anderen Haushaltsgegenständen müssen zuverlässig und sinnvoll sein und sich im Alltag bewähren. Ob und wie Informationen des persönlichen Umfelds detektiert werden, ist dabei eine Frage der gegenüberstehenden Nutzwerte der Automation. Das Thema ist zielgruppenspezifisch und leicht verständlich zu kommunizieren und insbesondere technikfernen Personen darzustellen.

Weiterführende Literatur

Köhler, D.; Appelhans, S.: Die Zukunft der Wohnraumleuchte – Perspektiven, Chancen und Herausforderungen durch die LED. In: Köhler, D. (2016): LED 2016 – Beiträge zur Anwendung. Hüthig Verlag, S. 12-26

Hinweis

Die vollständige Auswertung mit umfangreicheren statistischen Angaben kann beim Lichtforum NRW – post@lichtforum-nrw.de – angefragt werden.

² Maßgeblich durch die hohe Technikaffinität und den hohen Bildungsstand der Befragten sowie infolge der geringen Teilnahme von Frauen ist die Umfrage statistisch nicht repräsentativ zur Gesamtbevölkerung auszuwerten. Vor dem Hintergrund der begrenzten Stichprobengröße können die Ergebnisse der Umfrage nur als Indikator zum Meinungsbild zukünftiger Wohnraumbeleuchtung dienen.

Relevanz von Blaulichtgefährdung in TV-Studios und Theatern

Roland Greule, Malte Kummrow*, Marc Briede**
(*Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg-HAW)

Problemstellung und Forschungsfragen

Diese Studie untersucht die Blickbewegungen von Moderatoren Innen und Schauspieler Innen in TV-Studios und Theatern mit einem mobilen Eyetrackingsystem und betrachtet die dabei mögliche Blaulichtgefährdung durch Scheinwerfer.

Stand der Wissenschaft/Technik

Die EU-Richtlinie 2006/25/EG und die daraus abgeleitete Arbeitsschutzverordnung zur künstlichen optischen Strahlung (OStrV) schreiben unter anderem auch Grenzwerte für die Blaulichtgefährdung von Lichtquellen und Leuchten vor. Diese Grenzwerte beziehen sich dabei auf den direkten Blick in die Lichtquelle. In Bezug auf diese Problematik wie lange und unter welchem Winkel Nachrichtensprecher Innen und Schauspieler Innen in TV-Studios und Theatern diese Lichtquellen betrachten, wurden bislang noch keine weiterführenden Untersuchungen durchgeführt, die zeigen, wie lange Personen in Scheinwerfer blicken.

Fragestellung

Die Fragestellung war, wie lange Personen direkt in Lichtquellen bzw. Scheinwerfer blicken oder ob sie gezielt den Blick in Scheinwerfer vermeiden und welche Blaulichtgefährdung dabei entstehen könnte.

Versuchsaufbau

Zur Überprüfung der Fragestellung wurden drei Versuche durchgeführt. Ein Vorversuch im Lichtlabor (Showroom) der HAW-Hamburg. Ein Versuch im Thalia-Theater Gaußstraße in Hamburg mit Schauspieler Innen und ein Versuch beim NDR - Hamburg Journal mit der Nachrichtensprecherin Kristina Gruse. Zur Erfassung der Blickbewegungen wurde ein mobiles Eyetrackingsystem der Firma SMI verwendet.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Ergebnis der vorliegenden Studie war, dass die Schauspieler Innen und die Nachrichtensprecherin versuchen den direkten Blick in die Scheinwerfer zu vermeiden. Während der Theatervorstellung blickten die Schauspieler Innen jedoch ab und zu direkt in die Scheinwerfer. Bei Halogenscheinwerfern ist die dabei auftretende Blaulichtgefährdung eher gering, bei der Verwendung von HMI-Verfolgerscheinwerfer kann jedoch eine Blaulichtgefährdung stattfinden. Wie dies in Zukunft bei der Verwendung von LED-Scheinwerfern und Movinglights aussieht, wird in der Studie auch diskutiert. Bemerkenswert war das Ergebnis, dass der Blick der Nachrichtensprecherin die überwiegende Zeit auf dem Teleprompter und der Kontrollkamera lag, was bedeutet, dass während dieser Zeit die sehr flach angeordneten Scheinwerfer direkt die Netzhaut der Nachrichtensprecherin beleuchteten.

Relevance of blue light hazard in TV studios and theaters

Roland Greule, Malte Kummrow*, Marc Briede**
(* University of Applied Sciences Hamburg - HAW Hamburg)

Research issue

This study investigates the eye tracking of anchorwomen/anchormen and actresses/actors in TV studios and theatres with a mobile eye tracking system and analyzes the possibility of blue light hazard damage through lighting fixtures.

State of science/technology

The EU-Richtlinie 2006/25/EG and the Arbeitsschutzverordnung zur künstlichen optischen Strahlung (OStrV) describe threshold values for the blue light hazard damage of lamps. The threshold values apply on the focus directly into the lamps. Examinations over the real situation how long anchorwomen/anchormen and actresses/actors look directly into lamps were never analyzed.

Research hypothesis

The question is, how long people look right into light sources and fixtures or if they don't look into light sources.

Experimental setup

There were three experiments performed. A preliminary test in the showroom of the lighting laboratory of the HAW Hamburg. An attempt at the Thalia Theater in Hamburg with actors and an attempt at NDR - Hamburg Journal with the anchorwoman Kristina Gruse. For the experiments we used the mobile eye tracking system of SMI.

Results in comparison with previous findings

The result of the experiments was, that anchorwomen/anchormen and actresses/actors don't looking directly into lamps or fixtures. During the theatrical performance the actors looked sometimes directly into the spotlight. If we used halogen fixtures there would be a very small danger of blue light hazard. But if we used more LED fixtures and moving heads with HMI lamps in future, the possibility of blue light hazard will raise. This will be the aim of the next study. Noteworthy was the result that the view of the anchorwoman Kristina Gruse was most of the time at the teleprompter with the problem, that the fixtures rays into the anchorwoman's retina.

Relevanz von Blaulichtgefährdung in TV-Studios und Theatern

Roland Greule*, Malte Kummrow*, Marc Briede*
(*Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg-HAW)

Zusammenfassung

In der Arbeitsschutzverordnung zur künstlichen optischen Strahlung (OStrV) sind Grenzwerte zur Vermeidung von schädlichen Strahlungen aufgeführt, insbesondere auch bei der Betrachtung von Blaulichtgefährdung für die Netzhaut. Diese Grenzwerte für Blaulichtgefährdung gelten jedoch nur für den direkten Blick in die Lichtquelle. In drei Untersuchungen wurde mit Hilfe eines mobilen Eyetracking-Systems das relevante Blickverhalten in TV-Studios und Theatern durchgeführt. Ergebnis der vorliegenden Studie ist, dass SchauspielerInnen und NachrichtensprecherInnen versuchen, den direkten Blick in die Scheinwerfer zu vermeiden. Bei NachrichtensprecherInnen besteht jedoch das Problem, dass durch den ständigen Blick auf den Teleprompter und die flach angeordneten Scheinwerfer diese Scheinwerfer direkt die peripheren Bereiche der Netzhaut beleuchten.

1 Einleitung

Seit 2006 gibt es die EU-Richtlinie (EU-Richtlinie 2006/25/EG) über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung). Seit Juli 2010 ist diese EU-Richtlinie als Verordnung vom deutschen Bundestag als Arbeitsschutzverordnung zur künstlichen optischen Strahlung (OStrV) verabschiedet worden. In der EU-Richtlinie sind sehr detaillierte Tabellen und Expositionsgrenzwerte für die Gefährdung von künstlichen Lichtquellen. Dabei unterscheidet man Schädigungen der Haut und der Augen. Dies kann durch zu intensive UV-Strahlung (UV-A, UV-B, UV-C), durch zu intensive IR-Einstrahlung und durch Blaulicht in gewissen Wellenlängen (Blue Light) erfolgen. In dieser Studie wird nur die Blaulichtgefährdung (Blue Light Hazard) genauer betrachtet. Für diesen Fall gelten Grenzwerte nur für den direkten Blick in eine Lichtquelle. Um den Bezug zu realen Beleuchtungssituationen in TV-Studios und Theatern zu erhalten, wurde das Blickverhalten von SchauspielerInnen und NachrichtensprecherInnen mit Hilfe eines mobilen Eyetrackingsystem untersucht und analysiert, wie lange und unter welchem Winkel diese Personen Lichtquellen bzw. Scheinwerfer betrachten.

2 Blaulichtgefährdung

Die Blaulichtgefährdung oder auch Blue Light Hazard ist diejenige Gefährdung, die durch Strahlung im sichtbaren Bereich verursacht werden kann. Die Stärke der Schädigung ist wellenlängenabhängig und tritt überwiegend im spektralen Bereich von 400 nm - 500 nm auf, siehe auch Abb. 1. Diese Strahlung wird im Auge durch Hornhaut und Linse kaum geschwächt und trifft direkt auf die Netzhaut. Die Schädigung (photochemische Schädigung der Netzhaut) tritt i.d.R. jedoch erst bei langer und intensiver Bestrahlung des Auges auf. Es gibt jedoch Beispiele und Berechnungen (AUVA Report 53) dass bei intensiver Bestrahlung durch Verfolgerscheinwerfer und/oder Moving-Lights mit HMI-Lichtquelle die Grenzwerte (Tagesdosis) innerhalb von wenigen Sekunden erreicht werden. Die größte Gefahr geht dabei vor allem vom direkten Blick in den Scheinwerfer aus. Entscheidend für die Gefährdungsbeurteilung ist allerdings nicht nur der einzelne Blick in die Lichtquelle,

sondern die Summe aller Blicke und Lichtmengen über einen Arbeitstag. Bei der Blaulichtgefährdung ist dieser Referenzwert für Dauerbestrahlung 10.000s (ca. 2h 47 min).

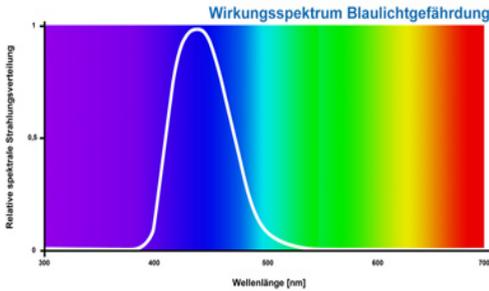


Abb. 1 Wirkungsspektrum der Blaulichtgefährdung (Quelle: Marlin Oeing nach Osram)

Bei der Beurteilung der Expositionsgrenzwerte nach der EU-Richtlinie 2006/25/EG wird zwischen kleinen und großen Lichtquellen unterschieden, siehe Tabelle 1, da kleine Lichtquellen eine dementsprechend kleine punktuelle Abbildung auf der Netzhaut erzeugen. Eine kleine Lichtquelle wird definiert, wenn $d > D/0,011$ rad ist, eine große Lichtquelle dementsprechend bei $d < D/0,011$ rad. In diesem Zusammenhang ist d der Abstand zwischen Auge und Lichtquelle und D die Quellgröße der Lichtquelle bzw. des Scheinwerfers.

Tabelle 1: Expositionsgrenzwerte für die Blaulichtgefährdung nach der EU-Richtlinie 2006/25/EG unterschieden nach Expositionsdauer und Größe der Lichtquelle

	Expositionsdauer $t < 10.000$ s	Expositionsdauer $t > 10.000$ s
Grenzwert für Strahlendichte LB (große Lichtquelle > 11 mrad)	$\frac{10^6}{t} \frac{W}{m^2 * sr}$	$100 \frac{W}{m^2 * sr}$
Grenzwert für Bestrahlungsstärke EB (kleine Lichtquelle < 11 mrad)	$\frac{100}{t} \frac{W}{m^2}$	$0,01 \frac{W}{m^2}$

In Bezug auf diese Problematik wie lange und unter welchem Winkel Nachrichtensprecher Innen und SchauspielerInnen in TV-Studios und Theatern in Lichtquellen/Scheinwerfer schauen, wurden bislang noch keine weiterführenden Untersuchungen durchgeführt. Aus diesem Grund sollte untersucht werden, wie lange Personen direkt in Lichtquellen bzw. Scheinwerfer blicken oder ob sie gezielt den Blick in Scheinwerfer vermeiden.

3 Eyetracking

Eye-Tracking-Systeme wurden entwickelt, um das visuelle Verhalten des Menschen in verschiedensten Bereichen zu untersuchen und zu analysieren. So wird diese Methode der Blickrichtungserkennung in Gebieten der Medizin, Psychologie und der Marktforschung mehr und mehr eingesetzt, um Aufschluss darüber zu bekommen, wohin der Mensch seine visuelle Aufmerksamkeit richtet. Die heutigen Eye-Tracking-Systeme basieren auf der Kameratechnik mit Infrarotstrahlung. Dabei werden jeweils die Pupillenbewegungen der Augen relativ zum Nullpunkt (Kalibrierungspunkt) aufgenommen, gemessen und mithilfe von Software im Livebild dargestellt. Generell lassen sich die Augenbewegun-

gen des Menschen, die für das Eye-Tracking von Bedeutung sind, in Saccaden und Fixationen unterteilen.

- Saccaden werden die kurzen, schnellen Bewegungen des Auges genannt. Sie helfen dabei, die Fovea Centralis, den zentralen Bereich des schärfsten Sehens, zum gewünschten Sehziel zu steuern. Eine Saccade dauert typischerweise 30 ms -100 ms bei Winkeln von 4° - 60° (ohne Kopfbewegung).
- Die Ruhephase des Auges, in der Inhalte vom Auge aufgenommen werden können, heißen Fixationen. Dabei steht der Augapfel nicht komplett still, sondern führt minimale Bewegungen (Drifts) aus.



Abb. 2 Mobile Eye-Tracking Brille der Firma SMI (Quelle; SMI, Berlin)

4 Versuche und Versuchsaufbau

Zur Überprüfung der Fragestellung wie lange Personen direkt in Lichtquellen bzw. Scheinwerfer blicken bzw. den Blick vermeiden, wurden drei Versuche durchgeführt. Ein Vorversuch im Lichtlabor (Showroom) der HAW Hamburg. Ein Versuch auf der Studiobühne im Thalia-Theater Gaußstraße in Hamburg mit Schauspielern und ein Versuch beim NDR - Hamburg Journal mit der Nachrichtensprecherin Kristina Gruse. Zur Erfassung der Blickbewegungen wurde das mobile Eyetrackingssystem der Firma SMI verwendet, siehe Abb. 2. Zur Auswertung der Blickbewegungen die Software BeGaze von SMI.

4.1. Vorversuch im Lichtlabor (Showroom) der HAW Hamburg

Als Vorversuch wurde im Lichtlabor der HAW Hamburg eine einfache TV- und Theater-Situation aufgebaut und untersucht. Im ersten Versuch wurden vier Fresnelscheinwerfer als Vorderlicht und zwei Fresnelscheinwerfer als Kante verwendet. Die Scheinwerfer hingen in einer Höhe von 4,5 m, der Abstand betrug 6,5 m zur Versuchsperson. In diesem Szenario lag die vertikale Beleuchtungsstärke auf dem Gesicht der Schauspielerin bei 2000 lx in dem zweiten Szenario bei 500 lx. Im ersten Versuch führte die Schauspielerin einen 7-minütigen Monolog, wobei ihr Blick im Zuschauerraum (Showroom) umherwanderte.

Wie aus der Darstellung in Abb. 3. rechts (Heat-Map) erkennbar ist, hat die Schauspielerin bei diesem Monolog keinen festen Punkt zu dem sie schaut. Ihre Blicke wandern durch den gesamten Zuschauerraum, jedoch betrachtet sie einen gewissen Bereich (rot dargestellt) etwas länger. Während des ganzen Monologs hat die Schauspielerin nur ein einziges Mal direkt in einen Scheinwerfer (rechts) geschaut. Diese Fixation hatte eine Dauer von 66,4 ms, ansonsten hat die Schauspielerin den direkten Blick in die Scheinwerfer vermieden. Zu ähnlichen Ergebnissen kam es auch bei den anderen drei Szenarien.



Abb. 3 links: Blick auf die Schauspielerin auf der Bühne; rechts Darstellung der gesamten Blickbewegungen als "Heat-Map". Je rötlicher die dargestellte Farbe in dieser "Heat-Map", umso länger hat die Schauspielerin den Blick dorthin gerichtet.

4.2. Untersuchungen im Thalia Theater

Einer der beiden Hauptversuche wurde auf der Studiobühne des Thalia Theaters Gaußstraße durchgeführt, das 200 Zuschauerplätze besitzt. Als Versuchsperson fungierte der Hauptdarsteller des Theaterstückes „Tschick“.

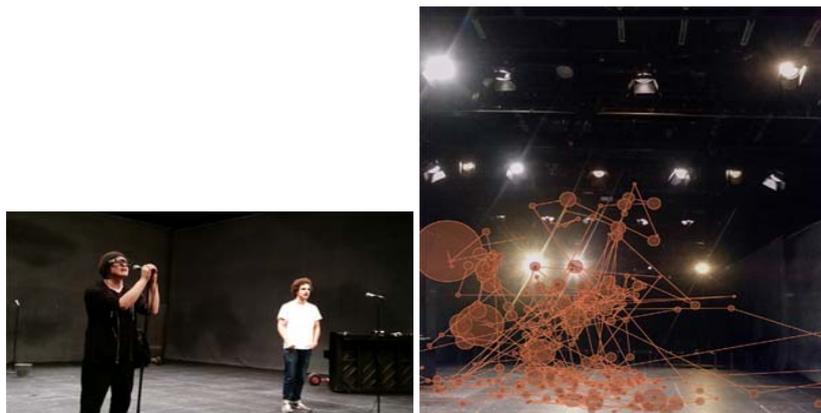


Abb. 4 links: Position des Schauspielers auf der Studiobühne des Thalia Theaters; rechts Darstellung der gesamten Blickbewegungen des Schauspielers im Zuschauerraum.

Um für die Messungen alle möglichen „Gefahrenquellen“ mit einzubeziehen, wurden alle Scheinwerfer des Stückes eingeschaltet und auf ca. 60% gedimmt. Dies betraf 16 2 kW Halogen-Stufenscheinwerfer als Frontlicht sowie 17 2 kW Scheinwerfer als Oberlicht. Diese waren auf vier verschiedene Traversen aufgeteilt und hatten einen Neigungswinkel zwischen 45° und 90°. Zusätzlich wurden drei Profilscheinwerfer Niethammer HPZ 2 kW als Frontlicht dazugeschaltet, die im Normalfall während des Stückes nicht verwendet werden. Diese hatten einen flachen Neigungswinkel von 10° bis 20°. Der Abstand der Schauspieler zu den Scheinwerfern lag in einem Bereich von 12 bis 25 m. Wie aus Abb. 4. rechts zu erkennen ist, sind die Blickrichtungen sehr unterschiedlich, da sich die Schauspieler auf der Bühne bewegen und auch in verschiedene Richtungen schauen. Hauptblickrichtung ist jedoch Richtung Publikum. Man kann erkennen, dass im Fall der Theater-

bühne die Schauspieler vermeiden, direkt in die Scheinwerfer zu blicken bis auf wenige Ausnahmen und die "erzwungene Situation" mit zwei Verfolgerscheinwerfer die direkt fixiert wurden.

4.3 Untersuchung NDR - Hamburg Journal

Um herauszufinden, wie das Blickverhalten in TV-Studios unter professionellen, realen Bedingungen ist, wurde ein Hauptversuch im Hamburg Journal Studio des NDR in Hamburg Lokstedt durchgeführt. Als Versuchsperson hat Kristina Gruse, Nachrichtensprecherin des Hamburg Journals, im Anschluss an die "offizielle" Sendung die Nachrichten des Tages noch einmal verlesen.



Abb. 5 Blick auf die Nachrichtensprecherin bei dem Hamburg Journal

Das Hamburg Journal Studio des NDR wird von ca. 100 Scheinwerfern (DeSisti Leonardo 1 kW Halogen-Stufenlinsenscheinwerfer) ausgeleuchtet. Die Ausleuchtung der Nachrichtensprecherin erfolgt durch zwei 1 kW Halogen-Stufenlinsenscheinwerfer als Führungslicht und Aufhellung, sowie einem Scheinwerfer als Kante von hinten. Ein weiterer 1 kW Fresnelscheinwerfer, der weiter seitlich von rechts strahlt, dient als zusätzliche Aufhellung und befindet sich nicht im Blickfeld der Nachrichtensprecherin. Die übrigen Scheinwerfer dienen zur Ausleuchtung des Studios und liegen nicht im Sichtfeld der Nachrichtensprecherin. Allgemein wird in TV-Studios eher „flach“ geleuchtet, d.h. die Scheinwerfer hängen relativ niedrig und haben einen niedrigen Neigungswinkel. Die beiden vorderen Scheinwerfer befinden sich rechts und links nahe der Kamera in einem Abstand von ca. 6 m zum Sprecherpult. Sie hängen in einer Höhe von ca. 4 m und ihr Neigungswinkel beträgt etwa 30°. Die Beleuchtungsstärke auf der Position der Nachrichtensprecherin beträgt ca. 800 lux.

Die 18-Uhr-Nachrichten des Hamburg Journals haben eine Gesamtdauer von 15 min. Davon sind etwa 3 min 20 s reine Sprechzeit der Nachrichtensprecherin, der Rest der Sendezeit wird durch Beiträge gefüllt. Während des Versuches hat die Nachrichtensprecherin die Nachrichten am Stück vom Teleprompter gelesen.

Wie man aus den Abb. 6 erkennen kann, fixiert die Sprecherin überwiegend den Teleprompter. Weitere Fixationspunkte sind die zweite Kamera links (auf der auch der Text angezeigt wurde), ein Monitor rechts neben der Kamera, der das Kamerabild zeigt, sowie das Moderationspult, auf dem der ausgedruckte Text liegt. Es gibt keine Fixation oberhalb der Kamera. Während dem Verlesen der Nachrichten (insgesamt 3 min 20 s) wird der Teleprompter mit 2 min 11 s zu 70% fixiert. Die Messung im Hamburg Journal Studio hat das Ergebnis der Vorversuche bestätigt, die Scheinwerfer werden von der Nachrichtensprecherin während der Sendung nicht fixiert. Jedoch trifft Licht auf den peripheren Bereich der

Netzhaut. Da in diesem Studio ausschließlich Halogenscheinwerfer mit einer Beleuchtungsstärke von etwa 800 lux zum Einsatz kommen kann man davon ausgehen dass bei diesen Scheinwerfern und dem angegebenen Abstand und der Beleuchtungsstärke höchstwahrscheinlich keine Gefährdung für die NachrichtensprecherInnen besteht.



Abb. 6 links: Blickbewegungen der Nachrichtensprecherin während dem Verlesen der Nachrichten; rechts "Heat-Map" der Blickbewegungen

5 Fazit und Ausblick

Ergebnis der vorliegenden Studie ist, dass SchauspielerInnen und NachrichtensprecherInnen versuchen den direkten Blick in die Scheinwerfer zu vermeiden. Während der Theatervorstellung blickten die Schauspieler jedoch ab und zu direkt in die Scheinwerfer. Bei Halogenscheinwerfern ist die dabei auftretende Blaulichtgefährdung eher gering, bei der Verwendung von HMI-Verfolgerscheinwerfer kann jedoch eine Blaulichtgefährdung stattfinden. Wie dies in Zukunft bei der Verwendung von LED-Scheinwerfern und Movinglights aussieht, soll in einer weiteren Studie untersucht werden.

6 Literatur

- Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStV): Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 2006/25/EG zum Schutz der Arbeitnehmer vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung und zur Änderung von Arbeitsschutzverordnungen vom 26. Juli 2010
- AUVA Report 53, Optische Strahlung: UV- und Blaulichtgefährdung von Theater- und Bühnenbeleuchtung, Weber M. Schulmeister, K, Kitz E., 2016
- EU-Richtlinie 2006/25/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2006 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung)
- Kummrow, Malte; Praktische Untersuchung der Relevanz von Blaulichtgefährdung in TV-Studios und Theatern, Bachelorarbeit HAW Hamburg, Fakultät DMI, Januar 2016

Warum hat man Blauanteil reduzierte Bildschirmmenüs?

Kazim Hilmi Or, Praxis: Facharzt für Augenkrankheiten

Problemstellung und Forschungsfragen

In den letzten Jahren hat man in den Beleuchtungsmenüs der Bildschirme viele Blauanteil reduzierte Optionen. Der wissenschaftliche Hintergrund dafür wird diskutiert.

Stand der Wissenschaft/Technik

Nach dem heutigen Wissen, gibt es zwei Möglichkeiten: Die nächtliche Melatoninsekretion, die für die innere Uhr zuständig ist, wird durch das blaue Licht reduziert, wodurch es zu Störungen der Schlafregulation kommt. Das blaue Licht spielt auch eine Rolle in der altersabhängigen Makuladegeneration. Die Schwellenwerte für die "normale" Exposition zum blauen Licht fürs Menschaugenauge noch nicht bekannt.

Forschungshypothesen

Auf der anderen Seite hat das blaue Licht einen Zusammenhang mit dem Scharfsehen und mit der Psyche.

Versuchsaufbau

Pros und Kontras für die Blauanteil reduzierte Bildschirmmenüs werden diskutiert.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Es ist medizinisch angebracht, dass es Blauanteil reduzierte Bildschirmmenüs gibt. Andererseits haben sie eine Reduzierung im Scharfsehen und Effekt auf Psyche zur Folge.

Why are there blue component reduced screen menus?

Kazim Hilmi Or, Private Office: Eye Surgeon

Research issue

In recent years there has been in the lighting menu screens many blue component reduced options. The scientific background for this will be discussed.

State of science/technology

State of art is, that there are two possibilities: The nocturnal melatonin secretion, which is responsible for the internal clock is reduced by the blue light, resulting in disorders of sleep regulation. The blue light plays also a role in age-related macular degeneration. The thresholds for "normal" exposure to blue light for human eye not yet known.

Research hypothesis

On the other hand, the blue light has a connection with the seeing sharply and also with the psychology.

Experimental setup

Pros and cons for the blue component reduced screen menus are discussed.

Results in comparison with previous findings

On the other hand they are followed by a reduction in sharpness of vision and effects on psychology.

Die Quantifizierung der Lichtrichtung im Büro unter Tageslichtbedingungen

Carolin Liedtke, Martin Frauenhofer, Martine Knoop, TU Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

Problemstellung und Forschungsfragen

Für die Beleuchtung in einem Büroraum wird Tageslicht als bevorzugte Lichtquelle angesehen. Die empfundene Qualität des Tageslichts beruht neben seiner Dynamik, der Höhe der Leuchtdichten und dem Ausblick aus einem Fenster auch auf der Lichtrichtung, d.h. der Lichteinfallrichtung und der Diffusität. Diese variiert je nach Wetter, Tages- und Jahreszeit. Aufgrund fehlender Modelle konnte sie jedoch nur schwer quantifiziert werden, so dass sie bei der Planung bislang höchstens qualitativ berücksichtigt wurde.

Es soll untersucht werden, wie die Ausprägung und die Dynamik der Lichteinfallrichtung und der Diffusität in einem Büroraum unter Tageslichtbedingungen in Abhängigkeit von Sonnenpositionen und Himmelsmodell ist.

Stand der Wissenschaft/Technik

Für die Messung und Beschreibung des räumlichen Lichts, seiner Verteilung und Wirkung wird in der Praxis oft eine Beleuchtungsstärke genutzt. Diese kann jedoch nur bedingt eingesetzt werden, um die Richtung des Lichteinfalls zu bestimmen. Eine Berechnung der Diffusität ist dagegen nicht möglich. In dieser Studie wird die 2013 eingeführte Lichteinfallstärke genutzt, die – gemessen in verschiedene Richtungen – die Information über die Parameter der Lichtrichtung anzeigen kann.

Forschungshypothesen

- I. Die Richtung des Lichteinfalls im Raum ist abhängig von der Sonnenposition.
- II. Die Diffusität durch Tageslicht im Raum ist bei bedecktem Himmel höher als bei klarem Himmel.

Versuchsaufbau

Für die Studie wurde ein realer Büroraum mit drei Arbeitsplätzen bei Tageslichtbedingungen untersucht. Die Lichteinfallstärke bzw. deren Verteilung wurde an mehreren Raumpunkten korrespondierend zu den Arbeitsplätzen per Simulation in Radiance für Referenztage und -himmel ermittelt.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Die Ergebnisse zeigen erstmalig Daten zur Lichteinfallstärke und -verteilung unter Tageslichtbedingungen. Demnach variiert die Lichteinfallrichtung erwartungsgemäß korrespondierend mit der Sonnenposition. Die Diffusität hingegen ist geringer als vermutet und konnte nicht als abhängig vom Himmelsmodell nachgewiesen werden. Vielmehr wird das durch ein Fenster einfallende Tageslicht durch die Apertur „gerichteter“, so dass an Messpositionen im Raum trotz bedecktem Himmel z.T. deutlich eine Vorzugsrichtung herrscht.

Quantifying the Light Direction and Diffuseness of Daylight in Offices

Carolin Liedtke, Martin Frauenhofer, Martine Knoop, TU Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

Research issue

Daylight is the preferred light source in offices. This is due to the dynamics, the specific luminance distribution and the view out of a window, as well as to the incidence direction and the diffuseness, which vary constantly with changing weather conditions, daytime and season. In contrast to its importance, the incidence direction and diffuseness are currently not often taken into consideration in daylight planning due to a missing quantification model.

This study was carried out to analyse the level and dynamics of the incidence direction and diffuseness in a daylit office and their variation due to sun position and sky model.

State of science/technology

The parameter 'illuminance' is often used to measure and describe spatial light, its distribution and effect, although it is hardly useful to detect the incidence direction and inappropriate to measure the diffuseness. Therefore, the model of the 'light incidence' and its distribution, by measuring it in different directions, were used in the study to reveal these parameters.

Research hypothesis

- I. The incidence direction of daylight in an office is dependent on the sun position.
- II. The diffuseness of daylight in an office is higher under an overcast sky condition than under a clear sky condition.

Experimental Setup

The experimental setup based on a real office space with three work places. The light incidence and its distribution under daylight conditions were calculated via Radiance simulation at reference days and different sky models.

Results in comparison with previous findings

The results show light incidence values of daylight conditions for the first time. The light incidence direction varies corresponding with the sun position as predicted. The diffuseness, however, is less than expected and seems not to be linked to the considered sky model. Even incoming daylight of an overcast sky gets a directional component due to the aperture of the window, which results then in a noticeable light direction at the measurement positions.

Die Quantifizierung der Lichtrichtung im Büro unter Tageslichtbedingungen

*Carolin Liedtke, Martin Frauenhofer, Martine Knoop, TU Berlin, Fachgebiet Lichttechnik
Sekt. E6, Einsteinufer 19, 10587 Berlin*

Zusammenfassung

In einer Studie wurde mittels Simulation das Modell der Lichteinfallstärke und des Verteilungskörpers auf seine Aussagekraft für die Darstellung der Lichtrichtung unter Tageslichtbedingungen in einem Büroraum getestet. Die Ergebnisse zeigen in der Form von Lichteinfallstärkeverteilungskörpern die Unterschiede für den Einfluss von Jahreszeit und Himmelsmodell auf die Richtung des Lichteinfalls und die Diffusität.

1 Motivation

Für die Beleuchtung in einem Büroraum wird Tageslicht als bevorzugte Lichtquelle angesehen /1-3/. Vor allem seine Dynamik, die Höhe der Beleuchtungsstärken im Arbeitsbereich, ebenso wie der Ausblick aus einem Fenster werden als maßgebliche Faktoren für die empfundene Qualität des Tageslichts beschrieben, z.B. /4, 2/. Es kann außerdem davon ausgegangen werden, dass auch die hohen Leuchtdichten an Wänden und in der Raumtiefe und die Lichtrichtung wesentliche Kriterien für die Zufriedenheit bei natürlicher Beleuchtung darstellen.

Die Lichtrichtung im Sinne der Richtung des Lichteinfalls und der Diffusität der Beleuchtung variiert nach Wetter, Tages- und Jahreszeit so charakteristisch, dass Nutzer ihre Wirkung auf das Erscheinungsbild von Personen und Raum zwar benennen, aber selbst hohe Kontraste als sehr natürlich und positiv empfinden /5/. Dass die Lichtrichtung und vor allem die Diffusität des Tageslichts bei der Planung bislang höchstens qualitativ berücksichtigt wurden, ist vor allem auf drei Gründe zurückzuführen:

1. Die Lichtrichtung wird oft indirekt anhand ihrer Wirkung auf das Erscheinungsbild von Objekten und Szenen erforscht, z.B. /6, 7/. Es fehlt jedoch eine Beschreibung der Ursache: Wie muss das Licht aus gerichteten und diffusen Anteilen zusammengesetzt sein, damit es die bevorzugten Wirkungen entstehen lässt?
2. Die Lichtrichtung wird für die gezielte Variation der Parameter mit künstlichem Licht oder mittels Computersimulation hergestellten Szenarien erforscht, z.B. /8, 9/. Die Ergebnisse daraus lassen sich für die Lichtrichtung bei Tageslicht nicht einfach übertragen, da sie sich in Dynamik und Verteilung möglicherweise stark unterscheiden.
3. Die Quantifizierung der Lichtrichtung und vor allem der Diffusität wird in jüngeren Arbeiten zwar erforscht, z.B. /10, 11/, allerdings sind die Vorgehensweisen nur schwer in die Praxis der Lichtplanung übertragbar.

Mit Hilfe der Studie wird versucht, die dargestellten Hemmnisse für die Anwendung der Lichtrichtung unter Tageslichtbedingungen zu überwinden. Basierend auf der 2013 eingeführten Lichteinfallstärke und ihrer Verteilung /12, 13/ wurden verschiedene Tageslichtsituationen in einem Büroraum simuliert und analysiert. Dies ermöglicht einerseits das Ermitteln der Zusammensetzung des Lichts und gibt neue Erkenntnisse über die Ausprägung und Dynamik der Lichtrichtung unter Tageslichtbedingungen. Andererseits zeigt die

Studie eine praxisnahe Herangehensweise sowie eine verständliche und vermittelbare Darstellung der Ergebnisse.

2 Forschungskontext

Für die Messung und Beschreibung des räumlichen Lichts, seiner Verteilung und Wirkung (z.B. Modelling) wird in der Praxis oft eine Beleuchtungsstärke genutzt. Neben der horizontalen basieren einige Parameter auch auf der vertikalen (z.B. Beleuchtung von Wänden), der (halb-)zylindrischen (z.B. Beleuchtung von Gesichtern) und der (halb-)sphärischen Beleuchtungsstärke. Ein Beleuchtungsstärkewert E allein kann aufgrund seiner Definition (s. Formel 1) selbst bei gekrümmter Fläche dA_2 keine Information über die Richtung des Lichteinfalls und die Diffusität geben, wie Abb. 1 zeigt.

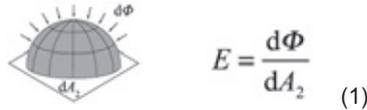


Abb. 1: Definition der Beleuchtungsstärke

Daher wurde und wird weiterhin untersucht, ob die in mehreren Ausrichtungen gemessene ebene Beleuchtungsstärke als Verteilungskörper diese Aussage ermöglicht /14-16/. Allerdings ist auch dieser Ansatz nur bedingt für die Ermittlung der Lichtrichtung geeignet aufgrund der Mehrfachbewertung von Raumwinkelbereichen und der Kosinus-Gewichtung /17/. Dies wird mit Hilfe der Lichteinfallsstärke J vermieden, da sie aus dem einfallenden Lichtstromanteil $d\Phi$ in einem begrenzten Raumwinkelsegment $d\Omega_2$ gebildet wird, wie Abb. 2 und Formel 2 zeigen.

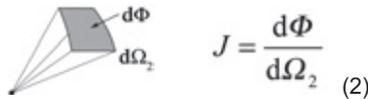


Abb. 2: Definition der Lichteinfallsstärke

Für das Ableiten des Lichteinfalls und der Diffusität der Beleuchtung, wird - wie zuerst durch Lingenfelder /14/ beschrieben - ein Verteilungskörper durch Messen der Größe in verschiedene Richtungen und Auftragen der Werte in einer räumlichen Darstellung gebildet (s. Abb. 3, links). Im Fall der Lichteinfallsstärke ist der Verteilungskörper (kurz: LEVK) die raumwinkelbezogene Darstellung des einfallenden Lichts (s. Abb. 3, rechts) und bildet somit das Äquivalent zur LVK, durch den die ausgestrahlten Lichtstromanteile pro Raumwinkel beschrieben werden.



Abb. 3: links: Ermitteln des LEVK, mittig: Aufteilung der 46 Abtastwerte, rechts: Beispiel eines LEVK

Der indirekte Anteil des einfallenden Lichts wird mit der Diffusität J_{diff} gekennzeichnet. Diese wird aus dem Verhältnis des reflektierten zur Summe aller einfallenden Lichtstromanteile gebildet, wie bereits von Norden für die Anwendung mit Beleuchtungsstärke definiert /18/.

Das Modell des Lichteinfallstärkeverteilungskörpers und die daraus abgeleitete Diffusität haben Aussagekraft für die Darstellung von künstlichem Licht und Tageslicht, ebenso wie für eine gemeinsame Auswertung. Bei der Anwendung für Tageslicht ist vor allem eine Auswertung der diffusen Beleuchtung von Bedeutung, denn die „ideale Verwirklichung solcher Beleuchtung ist die vom Tageslicht bei bedecktem Himmel herrührende, von Lambert als ‚absolute Beleuchtung‘, von L. Weber als ‚vollkommene Beleuchtung‘ bezeichnet“ /18, S. 18/.

Abgeleitet aus den vorangegangenen Ausführungen standen für die Studie folgende Forschungsfragen im Mittelpunkt.

- A. Wie ist die Verteilung der Lichteinfallstärke in einem Büroraum unter Tageslichtbedingungen? Welche Unterschiede zeigen sich an verschiedenen Arbeitsplätzen? Welchen Einfluss hat dabei die Jahreszeit (repräsentativ für unterschiedliche Sonnenpositionen)?
- B. Wie diffus ist Tageslicht bei bedecktem Himmel und bei klarem Himmel? Wie ist die Verteilung der Diffusität unter Tageslichtbedingungen im Raum?

3 Methodik

Für die Studie wurde ein realer Büroraum mit Ausrichtung Südsüdost an der TU Berlin mit drei Arbeitsplätzen bei Tageslichtbedingungen mit Radiance untersucht. Abb. 4 zeigt den Raum und schematisch die Messpositionen an den Arbeitsplätzen in zwei Höhen.

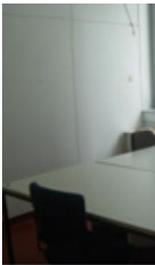


Abb. 4: Büroraum, links: Foto /19, S. 17/, rechts: Schematische Ansicht mit Messpositionen /19, S. 26/

Das Messinstrument wurde als eine Kombination aus verschiedenen orientierten Messflächen und vorgesetzten Hohlkegeln implementiert, die die Raumwinkelbegrenzung ermöglichen. Die Anzahl und Orientierung der Messrichtungen folgt dem Prinzip der Himmelsaufteilung nach Tregenza /20/ in raumwinkel- und formgleichen Segmenten, angeordnet in Bändern mit konstantem Höhenwinkel beginnend am Zenit. Abweichend davon wurde jedoch die Abtastung einer imaginären Vollkugel mit einem „Äquatorband“ realisiert, die zu Lasten der Abdeckung im Azimut auch Symmetrien enthält. Die hier vorgestellte Aufteilung hat nur 46 Raumwinkelkegel, je mit einem halben Öffnungswinkel von 15° , mit einer Abdeckung der Vollkugel von ca. 78 %, s. Abb. 3 mittig.

In der Studie wurden systematisch die LEVK an den 6 Raumpositionen (s. Abb. 4 rechts), mit zwei Himmelstypen an den Tagen 21.03/21.09, 21.06 und 21.12, jeweils für 12 Uhr und 15 Uhr per Simulation berechnet. Die ausgewählten Vergleiche in Tabelle 1 geben einen beispielhaften Einblick in die Dynamik der Daten, eine vollständige Darstellung für die Ergebnisse befindet sich in /19/.

Tabelle 1: Übersicht der in dieser Veröffentlichung ausgewählten Vergleiche

	Himmelstyp	Datum / Zeit	Messpositionen
A	Klarer Himmel (ohne Sonne)	a) 21.06. 12 Uhr b) 21.12. 15 Uhr	Sitzpositionen an 3 Tischen, Höhe 1,20 m
B	a) CIE Bedeckter Himmel b) Klarer Himmel (ohne Sonne)	Normiert bzw. 21.12. 12 Uhr	Sitzpositionen an 3 Tischen, Höhe 1,20 m

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden grafisch als LEVK in Form einer Vektorenschar ausgehend von der Messposition dargestellt. Alle LEVK in einem Raum sind im Verhältnis zueinander normiert und in der Einzeldarstellung unabhängig voneinander in ihrer jeweiligen Dynamik gezeigt.

Für die Untersuchung der Forschungsfragen von (A) werden exemplarisch die Ergebnisse für einen klaren Himmel am a) 21.06. 12 Uhr und b) 21.12. 15 Uhr (Abb. 5) gegenübergestellt, da sie in ihrer Verteilung zueinander den größtmöglichen Unterschied unabhängig vom Himmelsmodell aufzeigen.

a)

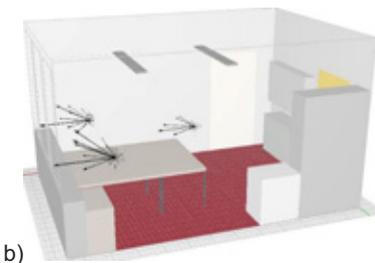
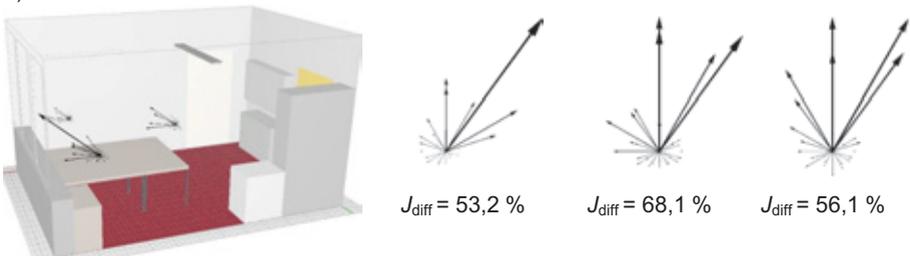


Abb. 5: (A) LEVK für a) 21.06. 12 Uhr und b) 21.12. 15 Uhr an drei Arbeitsplätzen, links: in der Raumübersicht, rechts: Details aus der Draufsicht mit Orientierung zum Fenster in der Reihenfolge v.l.n.r. Fensternähe Tisch links, Raumtiefe Tisch mittig, Fensternähe Tisch rechts.

Für die Untersuchung des Einflusses des Himmelsmodells auf die Verteilung und Diffusität sind exemplarisch die resultierenden Ergebnisse im Vergleich von a) CIE bedecktem Himmel und b) klarem Himmel am 21.12. 12 Uhr in Abb. 6: gegenübergestellt.

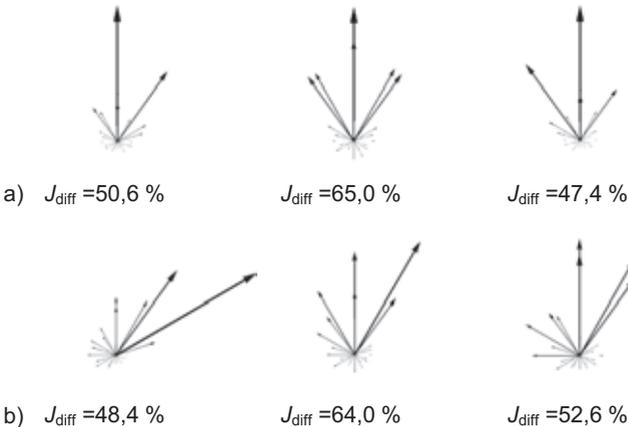


Abb. 6: (B) LEVK für a) CIE bedeckten Himmel und b) klaren Himmel (ohne Sonne) 21.12. 12 Uhr an den drei Arbeitsplätzen aus der Draufsicht mit Orientierung zum Fenster

Es ist eine deutliche Hauptlichteinfallrichtung in Richtung Fenster beim klaren Himmel, auch ohne direkte Sonne, in den LEVK zu erkennen (Abb. 5 a, Abb. 6: b), abgeschwächt auch in Abb. 5 b. Die Diffusität nimmt mit der Tiefe im Raum zu. Dennoch kann in allen Situationen das Tageslicht, in dem betrachteten Fall dieses Büroraumes, als diffuse Lichtquelle mit gerichtetem Komponenten gesehen werden (Diffusität $J_{diff} < 65\%$). Die Diffusität schwankt weniger in Abhängigkeit vom Himmelsmodell als angenommen, sondern vielmehr zwischen den fensternahen Messpositionen im Vergleich zu der in der Raumtiefe (s. Tisch mittig, Abb. 5 und Abb. 6).

5 Fazit

Tageslicht im Innenraum hat eine gerichtete Komponente und ist somit keine rein diffuse Lichtquelle. Die Diffusität wiederum wird hauptsächlich von der Position im Raum bestimmt, z.B. durch Wandnähe oder Raumtiefe. Die Informationen aus den LEVK unter Tageslichtbedingungen helfen, diese präferierte Lichtquelle besser zu beschreiben und diese Präferenz, wo gewünscht, auf künstliche Beleuchtungssituationen zu übertragen.

Es konnte gezeigt werden, wie man mittels eines Lichteinfallstärkeverteilungskörpers die Lichtrichtung bei Tageslichtbedingungen berechnen und darstellen kann. Er enthält sowohl die Information über die Hauptrichtung des Lichteinfalls, als auch über die räumliche Verteilung an einer oder mehreren Positionen und lässt Rückschlüsse auf den indirekten Anteil des Lichts zu. Die einfache Geometrie und die intuitive Lesbarkeit der Daten bilden eine notwendige Grundlage für die Anwendung in der Planungspraxis bei Implementierung in gängige Lichtsimulationssoftware.

Quellen

1. Heerwagen, J. H., & Heerwagen, D. R. (1986). Lighting and psychological comfort. *Lighting Design and Application*, 16(4), 47-51.
2. Boyce, P., Hunter, C., Howlett, O. (2003). *The benefits of daylight through windows*. Troy, New York: Rensselaer Polytechnic Institute.
3. Galasiu, A. D., & Veitch, J. A. (2006). Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review. *Energy and Buildings*, 38(7), 728-742.
4. Collins, B. L. (1976). Review of the psychological reaction to windows. *Lighting Research and Technology*, 8(2), 80-88.
5. Liedtke, C. (2009). *Helligkeit im Arbeitsbereich*. Diplomarbeit, TU Ilmenau. Ilmenau.
6. Frandsen, S. (1989). *The scale of light*. In T. C. Steemers (Hrsg.), 2nd European Conference on Architecture.
7. Koenderink, J. J., Pont, S. C., van Doorn, A. J., Kappers, A. M. L. & Todd, J. T. (2007). The visual light field. *Perception*, 36 (11), 1595-1610.
8. Xia, L., Pont, S. C. & Heynderickx, I. (2014). The visual light field in real scenes. *i-Perception*, 5 (7), 613-629.
9. O'Shea, J. P., Agrawala, M. & Banks, M. S. (2010). The influence of shape cues on the perception of lighting direction. *Journal of Vision*, 10 (12).
10. Morgenstern, Y., Geisler, W. S. & Murray, R. F. (2014). Human vision is attuned to the diffuseness of natural light. *Journal of Vision*, 14 (9).
11. Xia, L., Pont, S. & Heynderickx, I. (2016). Light diffuseness metric Part 2. Describing, measuring and visualising the light flow and diffuseness in three-dimensional spaces. *Lighting Research and Technology*.
12. Völker, S.; Liedtke, C. (2013). Lichteinfallstärke - Eine neue lichttechnische Grundgröße zur Beschreibung der Lichtrichtung. In: *LICHT* (5), S. 62–65.
13. Liedtke, C. Völker, S. Knoop, M. (2013). The Light Direction and Directional Light—Towards a new Quantification of an Essential Lighting Quality Criterion. In: *CIE Proceedings*. Vienna, S. 542–551.
14. Lingenfelter, H. (1928). Ueber den diffusen Anteil der Beleuchtung und ihre Schattigkeit. *Licht und Lampe*, 17 (9), 313-318.
15. Cuttle, C. (1997). Cubic illumination. *Lighting Research and Technology*, 29 (1), 1-14.
16. Huang, Z. & Sanderson, A. (2014). Light field modelling and interpolation using Kriging techniques. *Lighting Research and Technology*, 46 (2), 219-237.
17. Liedtke, C. & Rothert, I. (2013). Empfängerbezogene Konzepte zur Beschreibung der Lichtrichtung in Innenräumen. In: TU Ilmenau & LiTG (Hrsg.), Lux Junior 2013. *Ta-gungsband*, S. 20-21.
18. Norden, K. (1933). *Die Grundlagen der Schattentechnik* (1. Aufl.). Berlin: Union Deutsche Verlagsgesellschaft Zweigniederlassung Berlin.
19. Frauenhofer, M. (2015). *Realisierung und Validierung einer Simulationsumgebung zur Untersuchung der Lichteinfallrichtung in RADIANCE*. Studienarbeit. TU Berlin. Berlin
20. Tregenza, P. (1987). Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements. *Lighting Research and Technology*, 19 (1), 13-14.

Bedeutung von Lichtrichtung und Schattigkeit für die visuell motorische Leistung

*Jan Krüger, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dresden
Christoph Schierz, TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Ilmenau*

Problemstellung und Forschungsfragen

Bei Untersuchungen zu optimalen Beleuchtungsbedingungen stehen häufig Aspekte zu Sehleistung und Sehschmerz im Vordergrund, selten wird das Zusammenspiel von Auge und Händen betrachtet. Daher wurde im Laborexperiment der Einfluss von Lichtrichtung und Schattigkeit auf visuell motorische Leistung bei feinen Montagetätigkeiten untersucht.

Stand der Wissenschaft/Technik

Gemäß der „two-visual-systems-Theorie“ von Goodale und Milner (1992) existiert neben dem visuellen System zur Wahrnehmung und Identifikation von Objekten ein weiteres visuelles System. Dieses ist auf die motorische Handlungsausführung spezialisiert und entzieht sich dem direkten Bewusstsein. Bei der Informationsverarbeitung erfolgt demnach eine Funktionsteilung nach „vision-for-action“ und „vision-for-perception“. Visuelle Informationen für die Handlungsausführung werden u. a. durch Schlagschatten und Schattierungen von Objekten bereitgestellt. Schlagschatten geben Hinweise über die Entfernung und die Orientierung von Objekten. Sie können zur Steuerung der Hinlang-Bewegung benutzt werden. Schattierungen beinhalten Informationen über die Objektform, welche für die Justierung von Daumen und Zeigefinger während der Greifbewegung genutzt werden können.

Forschungshypothesen

Schlagschatten und Schattierungen werden vom visuellen Motorsystem bei Montagetätigkeiten ohne direktes Bewusstsein für die Handlungsausführung verarbeitet. In der Folge erzeugen Veränderung von Lichtrichtung und Schattigkeit messbare Auswirkungen auf die visuell motorische Leistung.

Versuchsaufbau

In Wiederholungsmessungen wurde mithilfe des Purdue Pegboard Tests die visuell motorische Leistung von 49 Probanden bei 4 unterschiedlichen Beleuchtungssituationen ermittelt. Die Beleuchtungssituationen umfassten diffuse, direkte sowie Beleuchtung mit Mehrfachschaten. Zusätzlich zur Beleuchtung wurde das stereoskopische Sehen bei 24 der 49 Probanden mithilfe einer Augenklappe variiert.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

In der Beleuchtung von Montagearbeitsplätzen sind Anforderungen des visuellen Motorsystems bislang unberücksichtigt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass direktes Licht, welches Einzelschatten oder moderate Mehrfachschaten erzeugt, eine stärkere Ermüdung sowie eine tendenziell schlechtere visuell motorische Leistung zur Folge haben, als diffuse Beleuchtung oder Beleuchtungsbedingungen mit extremen Mehrfachschaten.

Impact of shadow characteristics on visuomotor performance

*Jan Krüger, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dresden
Christoph Schierz, TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Ilmenau*

Research issue

Studies on optimal lighting conditions often focus on aspects like visual performance or visual comfort. Only rarely the cooperation of eyes and hands is examined. Therefore, a laboratory experiment was conducted which investigated the influence of shadow characteristics on visuomotor performance.

State of science/technology

According to the “two-streams hypothesis” of Goodale and Milner (1992) a specialized visual system for visually guided reaching and grasping exists besides the visual system for the perception and recognition of objects. Thus, during visual processing a separation of functions into „vision-for-action“ and „vision-for-perception“ takes place. In this respect, it is important to remember that shadows and shading contain visual information for motor actions. Shadows can be sources of cues for distance of shadow-casting objects. These cues could be used for the control of the reaching movement. Shading contains information about object shape which allows an observer to shape the hand appropriately to pick up an object.

Research hypothesis

Cast shadows and shading are processed for reaching and grasping movements by the “visuomotor system” with low consciousness. In turn, changes of shadow characteristics resulting from a variation of lighting conditions have a measurable effect on visuomotor performance.

Experimental setup

The visuomotor performance of 49 subjects was assessed during repeated measures of the Purdue Pegboard Test at four different lighting conditions. The shadow characteristics were altered between soft, harsh and multi-shadow conditions. In addition to the changing lighting conditions stereoscopic vision was restricted by using an eye patch in 24 of the 49 participants.

Results in comparison with previous findings

In lighting for assembly workplaces requirements for the visuomotor system are unconsidered up to now. Therefore, a concept was derived from the results of the pegboard test which attempts to explain the significance of shadow characteristics for visuomotor tasks.

Spektrale Empfindlichkeit für physiologische Blendung im mesopischen Bereich für periphere Detektionsobjekte – experimenteller Aufbau und Methode

Daniel Englisch¹, Christoph Schiller¹, Nils Haferkemper², Tran Quoc Khanh¹;
¹Technische Universität Darmstadt, ²Photometrik GmbH

Forschungsfragen

Die vorliegende Studie beschreibt die spektrale Empfindlichkeit der physiologischen Blendung im mesopischen Adaptationsbereich für unterschiedliche Hintergrundleuchtdichten und verschiedene Exzentrizität des Detektionsobjektes.

Stand der Wissenschaft/ Technik

Seit der Einführung der $V(\lambda)$ -Funktion wird jede Lichtquelle für sämtliche lichttechnische Anwendungen mit eben dieser gewichtet. Allerdings ist die $V(\lambda)$ -Funktion nur für bestimmte Umgebungsbedingungen bezogen auf die Adaptationsleuchtdichte und den Detektionswinkel θ gültig. Weiterhin ist unklar ob die $V(\lambda)$ -Funktion auch für die Blendempfindlichkeit gilt.

Forschungshypothesen

Ziel der Studie ist es die spektrale Blendempfindlichkeit bei unterschiedlichen Hintergrundbedingungen zu testen und mit Hilfe von retinalen Mechanismen zu erläutern.

Versuchsaufbau

Ein Versuchsaufbau, welcher das einfache Ändern der Umgebungsbedingungen erlaubt, ist von zentraler Bedeutung. Daher ist der Aufbau sehr modular gehalten. Die Adaptationsleuchtdichte wird mithilfe von 21 unabhängig ansteuerbaren LEDs erzeugt und homogen auf eine Projektionswand geworfen. Dadurch ist es möglich, sowohl die Strahldichte vorzugeben, als auch verschieden Spektren zu simulieren. In diesem Fall wurde ein quasi-energetisches Spektrum erzeugt, allerdings sind andere spektrale Verteilungen, wie z.B. eines Temperaturstrahlers einer bestimmten CCT oder einer weißen LED, denkbar und wurden bereits in früheren Studien verwendet. Das Detektionsobjekt wird von einem DMD-Projektor erzeugt und ist daher sehr einfach in Größe, Position und Strahldichte variierbar. Um monochromatische Blendreize zu erzeugen wird eine weiße Hochleistungs-LED mit 22 verschiedenen Interferenzfiltern im Bereich von 420 bis 650 nm verwendet. Um die Schwellenstrahldichte zu bestimmen wird ein Doppel-Stufenverfahren angewandt.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Als Ergebnis können spektrale Blendempfindlichkeitskurven für unterschiedliche Umgebungsbedingungen gewonnen werden. Diese können nicht nur mit vorherigen Arbeiten zur Blendung sondern auch mit spektralen Detektionsempfindlichkeit verglichen werden, welche in demselben Aufbau gemessen wurden.

Spectral sensitivity for disability glare in the mesopic range for detection objects in the periphery – setup and method

Daniel Englisch¹, Christoph Schiller¹, Nils Haferkemper², Tran Quoc Khanh¹

¹Technische Universität Darmstadt, ²Photometrik GmbH

Research issue

The present study discusses the spectral sensitivity of disability glare in the mesopic range for different background luminances and different detection target positions.

State of science/technology

Ever since the introduction of the $V(\lambda)$ function, every light source in lighting applications is weighted by this function. However, the $V(\lambda)$ is only valid for some specific conditions concerning the background luminance and the detection angle θ . In particular, it is unclear if the $V(\lambda)$ function also holds for the glare sensitivity.

Research hypothesis

The aim of this study is to compare the spectral sensitivity of disability glare for different background conditions. The different sensitivities will be explained by retinal mechanisms.

Experimental setup

For this study we use a laboratory setup (booth) where we can vary the conditions very easily. The adaptation level is created on a plane surface (background) by 21 different LEDs, which can be controlled independently, as well as some filters to darken the light and get a homogeneous background luminance. With these LEDs we cannot only vary the radiance, but we are also able to simulate different spectral power distributions for the adaptation. For this study we used an iso-energetic spectrum, but other spectral power distributions like the one of a tungsten halogen lamp or a white LED (CCT at about 6200K or 3200K) can be simulated and were used in previous studies. The detection object itself is produced by a DMD projector on the background. Since the projector is controlled by a computer it is very easy to vary the detection angle θ as well as the radiance. To produce monochromatic glare targets a white high power LED is filtered by 22 interference filters in the range of 420 nm to 650 nm. The fixation point is marked by a dark red laser dot in the center of the box. To determine the threshold radiation a double staircase method is used.

Results in comparison with previous findings

As a result, we got the spectral glare sensitivity of various subjects for different situations. For conclusion we can state that as expected the $V(\lambda)$ function does not hold for the glare sensitivity in different conditions which especially occur in traffic situations. In addition the estimated glare sensitivities can be compared to previous studies for spectral glare sensitivities as well as for spectral detection sensitivities.

Spectral sensitivity for disability glare in the mesopic range for detection objects in the periphery – setup and method

Daniel Englisch¹, Christoph Schiller¹, Nils Haferkemper², Tran Quoc Khanh¹;

¹Technische Universität Darmstadt, ²Photometrik GmbH

¹Fachgebiet Lichttechnik, TU Darmstadt; Hochschulstraße 4a; 64289 Darmstadt

²Photometrik GmbH, Einsteinstraße 42; 64859 Eppertshausen

Summary

Since disability glare is a great impairment of vision and leads to great risks in different situations, the current article describes the test setup and method to investigate spectral sensitivity for disability glare to analyze the results by the individually varied parameters. Later the spectral glare sensitivity can be also compared to spectral detection sensitivity gained by the same setup and under the same experimental conditions.

1 Introduction

In many situations, disability glare is a major impairment of vision that can lead to dangerous settings [1]. Therefore the research on different glare aspects is of great interest [2–5]. Ever since the development of new light sources the question rises if light sources with different spectral power distributions are causing different disability glare, although the luminance is equal [6, 7]. Because of these results, the approach of evaluating glare by $V(\lambda)$ weighted luminance values has to be reconsidered. Many groups before analyzed the spectral behavior of glare in general [9–11]. The main problem of these researches is, that the experimental parameters are not equal, which makes a comparison hardly possible. This study focuses on two main goals. The first is to determine spectral glare sensitivity for different background situations, but with the same basic experimental setup, such the influence of the altered parameters can be estimated separately. The same study was already performed only with detection targets without glare source to determine spectral detection sensitivity. Thus the second goal will be, to compare spectral glare sensitivity with the already gathered spectral detection sensitivity for the same experimental parameters. This approach is innovative and has not been achieved before. Being able to perform glare and detection experiments with individual varying parameters with a single experimental setup and method is innovative and can lead to a better insight of the spectral sensitivity of the human vision.

2 Setup

The basic experimental setup has already been used earlier [8]. The setup used in the mentioned article was extended for this study. A schematic illustration of the viewing box can be seen in **Figure 1**.

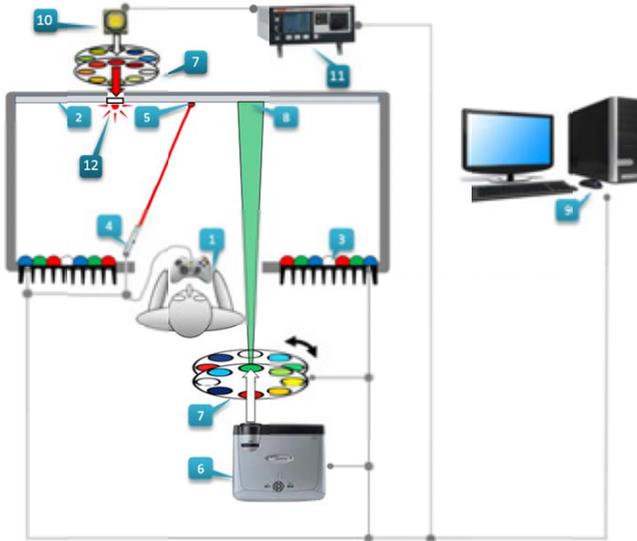


Figure 1: Viewing box. 1: observer and input device; 2: projection surface or background (inner surface of the viewing box); 3: multi-LED light source with heat sink to illuminate the projection surface; 4: laser diode; 5: fixation point; 6: projector; 7: double filter wheel; 8: detection target (object to be detected); 9: control PC; 10: LED light source; 11: Current and thermal stabilization; 12: Glare source

The observer (1) is placed in front of the booth and looks with both eyes onto the illuminated background (2), fixating the red laser dot (5). The distance between the observer and the background is 72 cm. A multi LED array (3) generates the background illumination and can simulate different spectral power distributions (SPD), as well as different illuminance levels. To come closer to a more balanced state of adaptation of the different photoreceptors, the SPD was chosen so be similar to an ISO-energetic one. The SPDs for the two different background illuminance (0.1 and 1 cd/m²) are shown in **Figure 2**, while the colorimetric data is shown in **Table 1**.

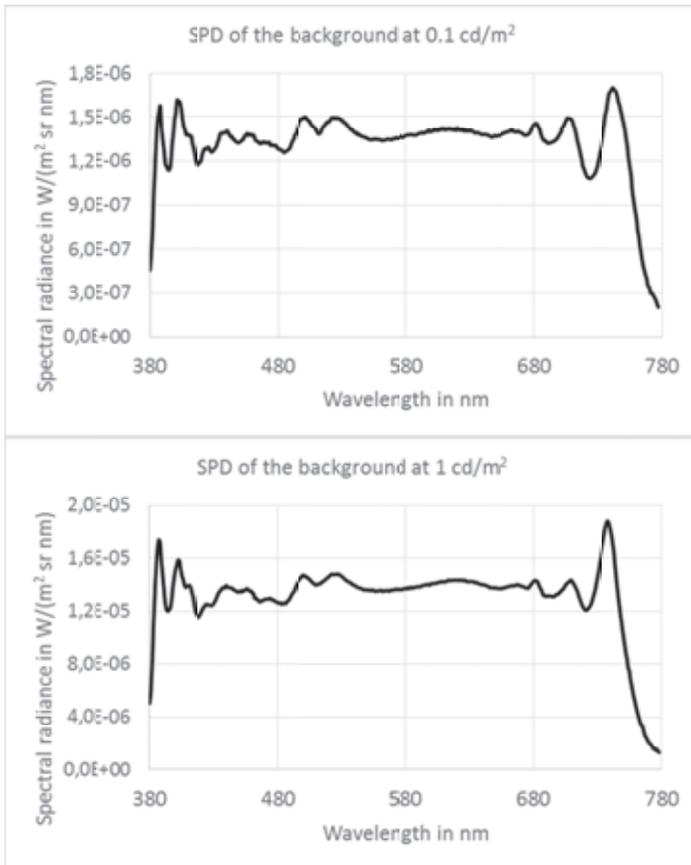


Figure 2: Spectral radiance distributions of the backgrounds used in the eight viewing conditions of the experiment. Upper diagram: 1 cd/m². Lower diagram: 0.1 cd/m². (See also Table 1 for more detailed information about the background)

Table 1: Colorimetric data of the backgrounds (Fig. 2) used in the eight viewing conditions of the experiment. LP: photopic luminance, LS: scotopic luminance. Luminance values in cd/m² units

	L_p	L_s	x	y	$T_c(K)$
1-ISO	1.018	2.271	0.34	0.34	5287
0.1-ISO	0.102	0.229	0.34	0.34	5359

The projector (6) (Acer® H 7532 BD; resolution 1920 x 1080 pixel; full HD; 2000 ANSI lumen) created incremental targets (8) on the background. A filter wheel (7) with 22 interference filters can be used to create quasi-monochromatic targets. In this study however only white detection targets will be used. The SPD of the peak white of the projector, as well as the transmittance of the interference filters are shown in **Figure 3**. Since the targets are generated by a projector different presentation positions (viewing angles) became possible. In this study, filled circles with an angular size of 2° were used.

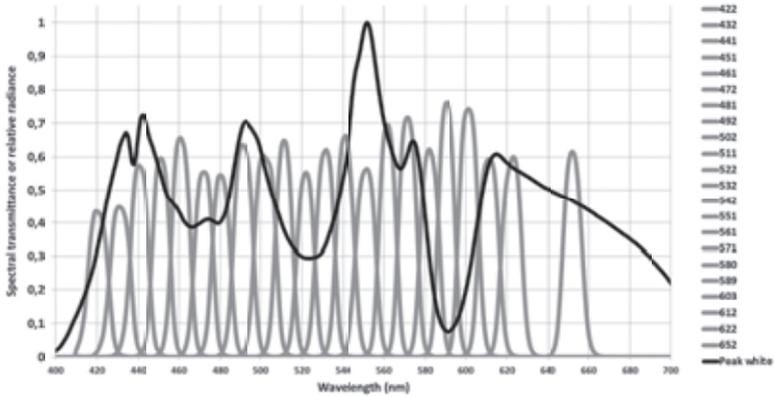


Figure 3: Spectral transmittance (grey curves) of the 22 interference filters (centroid wavelengths are shown in the legend) used to present the incremental quasi-monochromatic detection targets and the relative spectral radiance of the projector's peak white (black curve) [8].

A white high power LED(10) (Luminous CST-90) was used to create a glare source(12). It is stabilized in temperature and current by a Thorlabs ITC 4020 control unit (11). Like the detection target, also the glare source can be filtered by interference filters to create quasi-monochromatic glare sources. The source has an angular size of 12'.

Concerning the presentation time of the target, a pilot experiment with the viewing box implied that detection sensitivity became stable after 0.35 second. Then, an interval of 1 s followed so that, within the entire period of 1.35 s, observers had to answer: either “yes, I have seen the target” or “No, I have not seen the target”. Answers were collected by the input device (see Fig. 1). A short sound indicated the onset of every target (see also [8]).

3 Method

Every subject had to adapt 30 minutes to the background luminance. Afterwards the threshold for a white target without glare is estimated in two steps. The first one is a rough estimation by increasing the target radiance until it can be seen clearly. The second step consists of a double staircase. One staircase starts at the rough threshold determined in step one (upper staircase), the other starts at zero (lower staircase). The increase or decrease of the two staircases was controlled by the decisions of the subject (“Yes” or “No”) so that the two staircases converged to the detection threshold. To determine the final threshold a psychometric function (Eq. 1, with parameters α, β, γ) was fitted to the subjects answers (“Yes”=1, “No”=0) as a function of the radiance increment of the target (ΔL_e).

$$F(\Delta L_e) = \gamma + (1 - \gamma) \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\Delta L_e}{\alpha}\right)^{-\beta}} \quad (1)$$

The increment radiance value (ΔL_e) corresponding to $F = 0.5$ in Eq. (1) was adopted as threshold radiance. Each staircase had ten steps (determined by a previous experiment). The so estimated threshold value is the reference for later determination of glare influence of the different glare wavelengths.

Afterwards a double staircase for a white target (see also step two described above) is performed with a quasi-monochromatic glare source for every of the chosen interference filters (wavelengths 410 nm – 620 nm in 10 nm steps, as well as one filter at 650 nm). For every wavelength, the emitted radiance of the glare source is chosen to be equal. Further both, the glare source, as well as the detection target are presented simultaneously for 350 ms. Like that the threshold radiance for a white target (like the one in the reference measurement) can be determined while a quasi-monochromatic glare source is present. To determine the glare impact, one can compare the estimated radiance thresholds of the reference measurement and the one with glare source. Doing this for every wavelength one can determine a spectral glare sensitivity and finally compare it to other data, for example detection sensitivities gathered by the same method and with the same background parameters like in [12].

4 Experimental parameters

The experimental parameters can be divided in four parts: the background, the subjects, the detection target, and the glare source.

The background conditions are already described above, we are using a quasi-isometric SPD at two different luminances, 1 cd/m² and 0.1 cd/m².

For every background condition it is planned to test at least ten subjects with normal colour vision in the aging range of 25-35. The colour vision will be checked with the Farnsworth D-15 test and the Standard Pseudisochromatic Plates, Part 2.

The detection target is white (SPD see peak white of the projector) and has an angular size of 2°. They are projected onto the background, meaning they are incremental targets. The positions of the detection targets can be altered and four different positions were chosen to better compare the results to previous studies [12, 13]. The positions are all on the horizontal line (0° vertically shifted) and spread over the horizontal angles at 0° (foveal viewing), 2.65°, 10° and 20°.

The glare source has an angular size of 5' and its position is -3.43° horizontally and -0.68° vertically shifted towards the fixation point. A schematic summary of the parameters is shown in **Figure 4**.

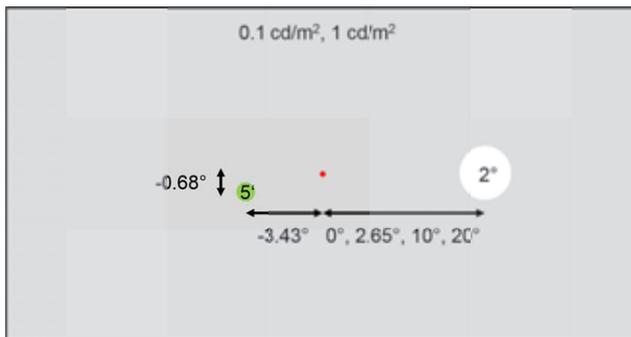


Figure 4: Schematic visualization of the experimental parameters. The red dot marks the fixation point, the white circle represents the detection target, while the green circle represents the glare source. The background luminance are shown by the grey box.

5 Outlook

With the here described experimental setup and method, it will be possible to measure spectral detection and spectral glare sensitivity with the same setup and therefore the same background conditions. It will further be possible to vary the given conditions in a wide range, with only changing one parameter at once. This will allow us not only to get a detailed behavior of spectral detection and glare sensitivity, but also to compare these two physiological mechanisms. Knowing the differences in spectral detection and glare sensitivity will allow new spectral distributions of light sources which can be optimized for both, detection purposes and avoiding glare. This can be useful for example in car headlamps or other traffic issues, as well as indoor lighting for offices.

References

- [1] M.a. Babizhayev *Glare disability and driving safety*, Ophthalmic research **35**, 19 (2003).
- [2] G.A. Fry *Physiological bases of disability glare*, Small (1955).
- [3] J.J. Vos *On the cause of disability glare and its dependence on glare angle, age and ocular pigmentation*, Clinical and Experimental Optometry **86**, 363 (2003).
- [4] CIE, *146-147-2002 CIE Collection on Glare: 2002* 146, CIE Central Bureau, Vienna.
- [5] A.J. Fisher, A.W. Christie *A note on disability glare*, Vision Res. **5**, 565 (1965).
- [6] M. Niedling, D. Kierdorf, S. Völker, in *Proceedings of CIE Centenary Conference "Towards a New Century of Light": CIE x038:2013*, Ed. CIE, CIE Central Bureau, Vienna 2013, p. 340.
- [7] J.D. Bullough, Z. Fu, J. van Derlofske *Discomfort and Disability Glare from Halogen and HID Headlamp Systems*.
- [8] P. Bodrogi, C. Schiller, T.Q. Khanh *Testing the CIE system for mesopic photometry in a threshold detection experiment*, LRT (2015).
- [9] J. Fekete, C. Sik-Lányi, J. Schanda *Spectral discomfort glare sensitivity under low photopic conditions*, Oph Phys Optics (2006).
- [10] R.C. Aguirre, E.M. Colombo, J.F. Barraza *Effect of glare on reaction time for peripheral vision at mesopic adaptation*, J. Opt. Soc. Am. A. **28** (2011).
- [11] J. van Derlofske, J.D. Bullough, J. Watkinson, *Spectral Effects of LED Forward Lighting: A Transportation Lighting Alliance Report*, 2005.
- [12] D. Englisch, C. Schiller, T.Q. Khanh, in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Ed. T.Q. Khanh, Herbert Utz Verlag GmbH, München 2015, p. 653.
- [13] D. Englisch, T.Q. Khanh, in *Proceedings of 28th CIE Session: CIE 216:2015*, Ed. CIE, Wien 2015, p. 662.

Detektion und Identifikationsuntersuchungen von achromatischen Sehzeichen im mesopischen Bereich

Katharina Schneider¹, Nils Haferkemper², Tran Quoc Khanh¹:

¹Technische Universität Darmstadt, ²Photometrik GmbH

Problemstellung und Forschungsfragen

In diesem Beitrag werden experimentelle Messungen beschrieben, welche die Detektionswahrscheinlichkeit eines Sehzeichens als Funktion des Exzentrizitätswinkels darstellen. Eine Aufgabe des visuellen Systems besteht darin die Gegenwart eines möglichen Sehobjektes oder Hindernisses wahrzunehmen (Detektion). Unterschiedliche Objektformen, die in typischen Situation im Straßenverkehr auftreten können, werden für zwei Leuchtdichten untersucht. Dabei werden die Sehzeichen unter verschiedenen Beobachtungswinkeln präsentiert.

Stand der Wissenschaft/Technik

Die visuellen Aufgaben während des Autofahrens sind in einige Teilaspekte, wie beispielsweise die Detektion, die Unterscheidung und die Identifikation von möglichen Hindernissen unterteilt. Vorherige Studien beschäftigen sich vor allem mit der Analyse im photopischen Bereich oder befassen sich mit der spektralen Abhängigkeit von Detektionskontrasten an der achromatischen Schwelle.

Forschungshypothesen

Eine Aussage darüber, ob ein Objekt wahrgenommen bzw. unterschieden werden kann oder nicht, kann durch den Kontrast ausgedrückt werden. Das Sichtbarkeitsfeld kann hierbei durch das periphere Leuchtdichteverhältnis als Funktion des Exzentrizitätswinkels evaluiert werden. Das Ziel dieser Studie ist es, ein Model zu formulieren, mit dem eine Aussage über den Kontrastverlauf für die Detektionswahrscheinlichkeit eines Objektes gemacht werden kann.

Versuchsaufbau

Die Untersuchungen wurden in einem Messaufbau im Labor durchgeführt. Zur Generierung eines homogenen Hintergrundes wurde ein DMD Projektor verwendet. Die Untersuchung wurde binokular durchgeführt und Präsentationszeit der Sehzeichen betrug 350 ms für zwei Hintergrundleuchtdichten ($0,1 \text{ cd/m}^2$; $1,0 \text{ cd/m}^2$). Zwei unterschiedliche Objektformen (Kreis, Reh) wurden randomisiert an insgesamt 5 verschiedenen Beobachtungswinkeln (0° , $2,65^\circ$, 5° , 10° , 20°) dargestellt. Ein roter Fixationspunkt signalisierte dabei das Zentrum und somit den fovealen Beobachtungswinkel innerhalb des Aufbaus. Die Aufgabe des Probanden war es festzustellen, ob er das Sehzeichen im Verhältnis zum Hintergrund wahrnehmen kann oder nicht („vorhanden“, „nicht vorhanden“). Die zweite Teilaufgabe bestand darin die Frage: „Um welches Objekt handelt es sich?“ zu beantworten.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Das Ziel dieser Studie ist es die Detektions- und Identifikationsuntersuchungen miteinander zu vergleichen. Ein Objekt bei einer nächtlichen Autofahrt rechtzeitig zu erkennen ist entscheidend für eine Unfallvermeidung. Daher wird in dieser Studie sowohl der Beobachtungswinkel als auch die Objektform in Betracht gezogen.

Detection and discrimination investigations for achromatic targets in mesopic range

Katharina Schneider¹, Nils Haferkemper², Tran Quoc Khanh¹:

¹Technische Universität Darmstadt, ²Photometrik GmbH

Research issue

This article describes experimental measurements of the detection probability as a function of the angle to the visual axis. The visual tasks consist in perception of presence (detection) and perception of a form feature (discrimination) of targets. Different target shapes that occur in road traffic situations are observed for two luminance levels under different eccentricity angles. Results based on achromatic increment detection and discrimination contrast experiments are discussed.

State of science/technology

Visual performance during driving involves a series of other sub-tasks, particularly detection, discrimination and identification of static and quasi-static targets. Earlier studies mainly were carried out in the photopic range and have analysed the spectral dependence of detection contrasts at the achromatic threshold.

Research hypothesis

Discrimination contrast corresponds to the task of indicating whether a target can be recognised. The visibility field can be evaluated by the knowledge of the peripheral contrast as a function of the eccentricity angle. The scope of this study is to formulate a model for predicting contrast curves as a function of the off-axis angle.

Experimental setup

The present investigations are carried out in a laboratory. A homogeneous background created by a DMD projector is used. The study is carried out under conditions of binocular vision and a target presentation time of 350 ms for two luminance levels (0.1 cd/m², 1 cd/m²) to obtain the detection or discrimination probability. Two different target shapes (circle, deer) that occur in representative traffic situations are presented randomly and for five eccentricities (0°, 2.65°, 5°, 10°, 20°). A fixation point is marked by a red point in the centre of the setup. The subjects task is to indicate whether the target can be seen related to his background or not ('present', 'not present'). The second task is to answer the question 'What is it?' (identification).

Results in comparison with previous findings

The aim of this study is to compare the investigations from detection threshold measurements with those based on the discrimination experiment. The accomplishment to recognize an object in the visual field is a relevant task in many nighttime driving situations, hence this investigation describes the influence of both the periphery and the contrast of the target compared to its background.

Detection and discrimination investigations for achromatic targets in mesopic range

Katharina Schneider¹, Nils Haferkemper², Tran Quoc Khanh¹;

¹Technische Universität Darmstadt, ²Photometrik GmbH

¹Fachgebiet Lichttechnik, TU Darmstadt; Hochschulstraße 4a; 64289 Darmstadt

²Photometrik GmbH, Einsteinstraße 42; 64859 Eppertshausen

Summary

This article describes experimental measurements of the detection probability as a function of the angle to the visual axis. The visual tasks consist in perception of presence (detection) of targets. Different target shapes that occur in road traffic situations are observed for two luminance levels under different eccentricity angles. Results based on achromatic increment detection contrast experiments are discussed. This report describes experimental measurements.

1 Introduction

The visual system is directed at central (foveal) and peripheral (extrafoveal) perception. The analysis of visual processes based upon real visual tasks, such as searching, reading or inspecting and model calculations substantiate quantitatively by what amount human visual performance depends on peripheral perception, too [1,2]. During a fixation period through outer visual conditions the area of perception is not expanded over the entire visual field, it is constrained to a sort of extended central lobe. This lobe is defined as visibility field. Using it for scanning the environment in as far as it determines fleetness, certainty or reacting upon visual stimuli, the visibility field merges with the peripheral threshold contrast. The visibility field can be evaluated by the knowledge of the peripheral threshold contrast as a function of the angle to the visual axis (eccentricity angle) according to a proposed model (Inditsky, [3, 4]).

The mesopic range of vision extends from about 0.001 cd/m² up to 10 cd/m². Within the mesopic range, the spectral sensitivity of the visual system changes with luminance level (brightness level) and retinal eccentricity [5]. Visual performance during motor vehicle driving involves a series of other sub-tasks, particularly detection, discrimination and identification of static and quasi-static targets. Earlier studies mainly were carried out in the photopic range and have analysed the spectral dependence of detection contrasts at the achromatic threshold [5-8]. Other studies investigated the influence of perceived contrast reduction from veiling on threshold measurements [9]. The results show that the luminance difference threshold and at the decreasing observation time as well as the increasing adaptation luminance and eccentricity angle proceed differently.

There exists a model that allows the calculation of the luminance difference threshold ΔL for various sizes of the targets as a function of the background luminance (Adrian [10]). It was created in 1961 and modified on several occasions (until 1989), for instance to incorporate the influence of the observation time and the age of the subjects [11, 12]. Based on this model of Adrian the aim of this study is to analyse the detection threshold measurements. The accomplishment to recognize an object in the visual field is a relevant task in

many night-time driving and street lighting situations, hence this investigation describes the influence of both the periphery and the contrast of the target compared to its background.

2 Method

In this paper, results from a mesopic threshold detection experiment by using polychromatic (positive contrast) targets are described. For this investigation two background luminances, 0.1 cd/m^2 and 1.0 cd/m^2 , were used. These luminances are typical values for a night-time driving situations in front of a motor vehicle (low beam headlamp). Those measurements were carried out from the perspective of a car driver for different types of roads.

Two relevant night-time traffic lighting situations are considered. In both cases, the subject has to detect an obstacle (visual target) on a predefined background to avoid collisions.

The first scenario describes a driving situation in a city, whereas the typical velocity is 30 km/hour. The stopping distance is about 18 m. At this distance the luminance produced by the driver headlamps corresponds to 1.0 cd/m^2 in front of the car. In the second situation includes a subject driving along a one-lane country road with no additional light source (velocity 70 km/hour). In this particular case the stopping distance is about 70 m and the luminance corresponds to 0.1 cd/m^2 in front of the motor vehicle using low beam head lamps, which describes the worst case scenario.

Taking the opportunity to compare with other investigations [5, 6], a filled circle of a 2° diameter was chosen as detection target. For comparison regarding the shape of the target, a deer with the same size was chosen as second shape.

The eccentricity or angle of view (Θ) corresponds to the angle between the fixation point in the middle of the viewing field and the position of the middle of the target. In this experiment five eccentricity angles were chosen. For comparison $\Theta=0^\circ$ was analysed. The second eccentricity $\Theta=2.65^\circ$ can be described as following: In a typical situation a pedestrian stands two steps (1.25 m) from the right lane at the distance of 70 m in front of the motor vehicle. Assuming a lane width of 3.0 m while the car drives in the middle of the lane and a car length of 1.9m the eccentricity angle equals 2.65° . In order to be compatible with the eccentricity values, that are often used in previous studies [5-7], the eccentricities $\Theta=5^\circ$, $\Theta=10^\circ$ and $\Theta=20^\circ$ were analysed. These values correspond to typical positions of appearance of pedestrians in typical traffic situations. At an eccentricity angle of $\Theta=20^\circ$, the rods density on the retina is maximum.

3 Experimental setup

The experimental setup is shown in Figure 1 and has been used in earlier studies [5, 6]. The present investigations are carried out in a laboratory. A homogeneous background created by a DMD projector is used (Acer, H7532 BD, resolution 1920x 1080 pixel, full HD, 2000 ANSI lumen). The subjects head is fixated in a headrest while holding the input device (gaming controller). The study is carried out under conditions of binocular vision and a target presentation time of 350 ms for two luminance levels (0.1 cd/m^2 , 1 cd/m^2) to obtain the detection or discrimination probability. A fixation point is marked by a red point in the centre of the setup. Two different target shapes (circle and deer, $\alpha=2^\circ$ diameter) that occur in representative traffic situations are presented randomly off the visual axis at the right

hand side of the fixation point for five eccentricities ($\Theta=0^\circ, 2.65^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$). The distance between the subject eyes and the projection surface is 72 cm.

The subjects task is to indicate whether the target can be seen related to his background or not ('present', 'not present'). A short sound signal indicates the onset of every single target and the answers are saved by the input device. In future experiments the second task will be to answer the question 'What is it?'(identification).

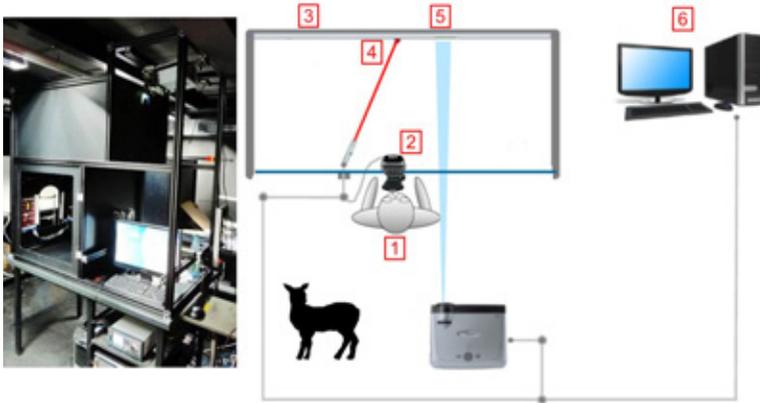


Fig. 1: Experimental setup: 1: Observer, 2: Input device, 3: Projection surface (inner surface of detection box), 4: Fixation point (Produced by laser diode), 5: Detection target (object to be detected), 6: Control PC

4 Method

Before starting the experiment, the subject has to adapt to the current background luminance for 25 minutes. To control the adaptation behaviour of the subject and to determine its detection threshold an automatic staircase method was used. Every subject completed the experiment three times for both luminances.

A psychometric function (equation (1)) with the parameters α , β and γ was fitted to the subjects answers as a function of the radiance increment ΔL_e .

$$F(\Delta L_e) = \gamma + (1 - \gamma) \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\Delta L_e}{\alpha}\right)^{-\beta}} \quad (1)$$

The threshold radiance corresponds to the value $F=0.5$. Overall twenty subjects completed the experiment for the two luminances. All subjects had normal vision (4 woman, 16 men between 21 and 62 years old, mean 28 years)

5 Results and discussion

Figure 2 and Table 1 show the values α and β of the psychometric function (equation (1)) of three subjects participating in the experiment. The data are normalised to the foveal eccentricity (0°). As it can be seen in Figure 2 the results for the particular eccentricities are similar for the three subjects. Whereas the α value range is between 0 and 0.02, the transition of β , corresponding to the gradient of the psychometric function, extends between -1.9

to 0.8. For the eccentricity angle of 20° the values decrease into the negative range of -1.9 to -1.7. As well as the eccentricity of 20° the taking values in 10° differ and are placed in the positive region of β (0.6 to 1.0). For the 2.65° and 5° data the gradient is placed in a small value range from 0.07, signifying that both eccentricities were conceived equally. The subject's behaviour shows a good compliance for all eccentricities.

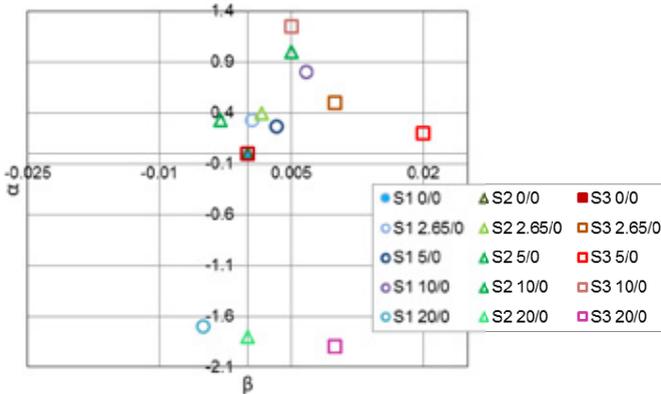


Fig. 2: Ratio of α and β for three subjects, psychometric function; α corresponds to the abscissa shift, β corresponds to the gradient (equation (1)); Target: circle (2° diameter); background luminance 0.1 cd/m²; S1= Subject 1; S2= Subject 2; S3= Subject 3

In Figure 3 the detection probability as a function the contrast (at eccentricity $\Theta = 0^\circ$) of all subjects participating in the experiment is illustrated. The psychometric function is shown for the two target shapes (circle, deer) and two luminances. It can be seen that the necessary contrast for detecting the target depends on the background luminance as well as the target shape. The detection rate of both target shapes rises with increasing the background luminance.

Tab. 1: Ratio of α and β for three subjects, psychometric function; The data are normalised to the foveal eccentricity (0°, $\alpha(0/0) = \beta(0/0) = 0$); α corresponds to the shift of the abscissa, β corresponds to the gradient (equation (1)); Target: circle (2° diameter); background luminance 0.1 cd/m².

Parameter	Subject 1	Subject 2	Subject 3
$\alpha(2.65/0)$	0.0005	0.0016	0.01
$\beta(2.65/0)$	0.33	0.4	0.5
$\alpha(5/0)$	0.003	-0.003	0.02
$\beta(5/0)$	0.266	0.33	0.2
$\alpha(10/0)$	0.006	-0.005	0.005
$\beta(10/0)$	0.8	0.66	1.0
$\alpha(20/0)$	-0.005	0.0001	0.01
$\beta(20/0)$	-1.7	-1.8	-1.9

Therefore the circle can be ordinary detected with a contrast level of 0.087 for a background luminance of 1.0 cd/m² whereas a contrast of 0.1 is needed to detect the target with the lower luminance. The complexity of detecting the deer is considerably increased for all subjects. Most of subject's weren't able to detect the whole shape of the deer but rather the contrast between deer legs and the background. Therefore the required detection contrast was 0.103 for 1.0 cd/m², increased by a factor of 0.89 the object could be detected having the lower luminance (see Table 2). The averaging factor between the 50 % threshold value and 95% detection was 0.43 for detecting the circle target and 0.52 for the deer target.

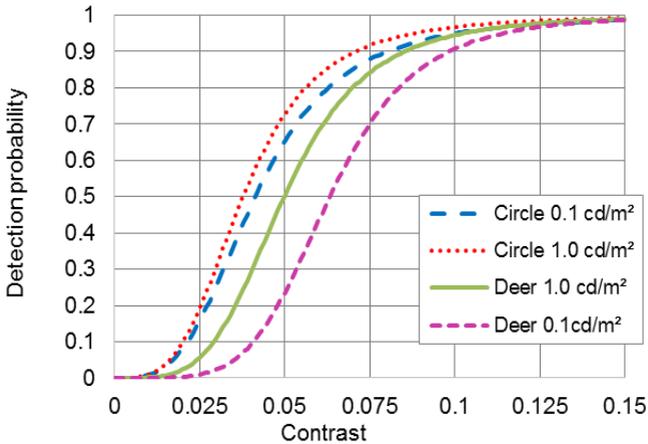


Fig. 3: Psychometric function: Detection probability as function of the contrast for two target shapes (Circle, Deer) and two background luminances (0.1 cd/m²; 1.0 cd/m²); at eccentricity $\Theta=0^\circ$ for all subjects

Tab. 2: Psychometric function: Detection probability of 50 % (Threshold value) and 95% as function of the contrast for two target shapes (Circle, Deer) and two background luminances for all subjects

Target shape	0.1 cd/m ²		1.0 cd/m ²			
	50%	95%	50%	50%	95%	50%
Circle	0.042	0.1	0.42	0.038	0.087	0.44
Deer	0.064	0.115	0.55	0.05	0.103	0.48

Achromatic increment detection contrast experiments using relevant viewing conditions (night-time driving) were discussed. The value of the contrast did not remain constant among the different eccentricities and target shapes. The complexity of detecting the target rises with an increasing eccentricity angle. Incrementing the intricacy of the target shape also results in a higher contrast that is needed for detection. In the next course of the study, further target sizes will be analysed. Several field tests will be conducted in order to compare the "field factor" between lab and field tests.

References

- [1] H.-J. Fleck: Measurement and Modeling of Peripheral Detection and Discrimination Thresholds; *Biological Cybernetic.* 61,437-446 (1989)
- [2] H.-J. Fleck: Zur peripheren Wahrnehmung von Sehzeichen; *Fortschritte Berichte VDI, Reihe 17, NR.34* (1987)
- [3] B. Inditsky: Analysis of visual performance: theoretical and experimental investigation of visual search. PhD Thesis, Karlsruhe (1978)
- [4] B. Inditsky, H.-W. Bodmann, H.-J. Fleck: Elements of visual performance: contrast metric - visibility lobes - eye movements. *LRT 14:218-231*(1982)
- [5] P. Bodrogi, C. Schiller, T. Q. Khanh: Testing the CIE system for mesopic photometry in a threshold detection experiment, *LRT* (2015).
- [6] C.Schiller: Spektrale Detektions- und Kontrastempfindlichkeit im mesopischen Bereich; PhD Thesis, TU Darmstadt (2015)
- [7] D. Englisch, T.Q. Khanh: in *Proceedings of 28th CIE Session: CIE 216:2015*, Ed. CIE, Wien 2015, p. 662.
- [8] P. Bodrogi, Z. Vas, N. Haferkemper: Effect of chromatic mechanisms on the detection of mesopic incremental targets at different eccentricities; *Ophthalmic and Physiological Optics* 2010, 30, 85-94 (2010)
- [9] A. Walkling Untersuchungen zur physiologischen Blendung bei Beleuchtung von nassen und trockenen Straßen, PhD Thesis, TU Ilmenau (2015).
- [10] W. Adrian: Der Einfluss störender Lichter auf die extrafoveale Wahrnehmung des menschlichen Auges; *Lichttechnik* 13 (1961).
- [11] W. Adrian: Visibility of targets: Model for calculation; *Lighting Resaerch and Technology*, 21 (4), 181-188 (1989).
- [12] W. Adrian: Visibility level und die Sichtbarkeit in Straßenbeleuchtung; *Licht* 10, 734-739 (1993).

Rückgeführte goniospektrometrische Kalibrierung der spektralen Gesamtstrahlungsleistung von LEDs

*Thorsten Gerloff, Matthias Lindemann, Armin Sperling,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig*

Problemstellung und Forschungsfragen

Im Rahmen der Aussonderung von Glühlampen in der Allgemeinbeleuchtung werden immer häufiger LED-Lichtquellen eingesetzt. Die Bestimmung des Gesamtlichtstroms Φ_{LED} und colorimetrischer Kennzahlen (z.B. Normfarbwerte (x,y)) wird hierfür meist mit Hilfe von integrierenden Ulbricht-Kugeln vorgenommen. Fehlende Substitutionsnormale auf LED-Basis, die auf das SI-Einheitensystem rückgeführt sind, machen eine Vielzahl von Korrekturen notwendig und erhöhen signifikant die Messunsicherheit.

Stand der Wissenschaft/Technik

Die rückgeführte Lichtstromkalibrierung von Glühlampen mit einem Goniophotometer ist eine seit Jahrzehnten etablierte Methode, um Transfernormale für U-Kugel-Messungen zu erhalten. Glühlampen sind hervorragend als Substitutionsnormale für U-Kugelmessungen an anderen Glühlampen geeignet, da sich die spektralen Eigenschaften und der Lichtstärkeverteilungskörper in der Regel sehr ähneln. Bei U-Kugel Messungen von LED-Lichtquellen ist der Einsatz von Glühlampen als Referenznormal nur bedingt ratsam, da bei Einsatz von Photometern bzw. Dreibereichsfarbmessköpfen spektrale Korrekturen sehr hoch sein können oder bei Einsatz von Spektrometern die absolute spektrale Gesamtstrahlungsleistung der Referenzlichtquelle unbekannt ist.

Forschungshypothesen

Der Einsatz von Transfernormalen auf LED-Technologie ist eine zuverlässige und einfache Methode, um mit geringer Messunsicherheit den Lichtstrom zu bestimmen. Die Kenntnis der spektralen Gesamtstrahlungsleistung ermöglicht darüber hinaus die Bestimmung der räumlich wirkenden spektralen Eigenschaften der Testlampe.

Versuchsaufbau

An der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt wird eine rückgeführte Kalibrierung der spektralen Gesamtstrahlungsleistung von LED-Lichtquellen als Dienstleistung angeboten. Hierfür stehen verschiedene Goniophoto- / -spektrometer zur Verfügung. Die zugrunde liegenden physikalischen Verfahren und angewendeten Auswerte- und Korrekturverfahren werden detailliert vorgestellt.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Rückgeführte Kalibrierungen der spektralen Gesamtstrahlungsleistung von LEDs sind kaum erhältlich, ermöglichen jedoch signifikante Messunsicherheitsreduzierungen.

Traceable goniospectroradiometric calibration of the total spectral radiant flux of LEDs

*Thorsten Gerloff, Matthias Lindemann, Armin Sperling,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig*

Research issue

The use of light-emitting diodes (LEDs) in general lighting has considerably increased in the past years. A decisive advantage of LEDs compared to the traditional incandescent lamps is their superior luminous efficiency η_v – the relation of the emitted light flux Φ_v and the electrical power consumed P_{el} indicated in lumen/watt. A typical way to determine the total luminous flux is the use of an integrating sphere. However, missing substitution standards leads to more necessary corrections and hence significantly higher measuring uncertainties.

State of science/technology

The use of Goniophotometers is a fundamental way for the total luminous flux calibration of standard lamps. With these lamps the substitution method can be applied in integrating sphere measurements. As long as incandescent lamps are compared to other incandescent lamps, the required corrections are low, as the spectral distribution of the emitted light of thermal radiation sources is very similar. The use of incandescent lamps as substitution standards for LED measurements is not advisable due to high necessary spectral corrections.

Research hypothesis

The introduction of LED-based transfer standards for the physical quantities total luminous flux and total spectral radiant flux enables the calibration of similar LEDs with reduced measuring uncertainties. Moreover, the knowledge of the spatially resolved spectral distributions of these standards can be used for the calibration of an integrating sphere with a spectroradiometer.

Experimental setup

Different Goniophotometers and Goniospectroradiometers used at PTB will be presented.

Results in comparison with previous findings

Up to now there are very few laboratories in the world which provides traceable calibrations of total spectral radiant flux light sources available. These standards allow a significant reduction of the measuring uncertainties.

Rückgeführte goniospektrometrische Kalibrierung der spektralen Gesamtstrahlungsleistung von LED Lichtquellen

Thorsten Gerloff, Matthias Lindemann, Armin Sperling,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Zusammenfassung

Im Rahmen der Aussonderung von Glühlampen in der Allgemeinbeleuchtung werden immer häufiger LED-Lichtquellen eingesetzt. Die Bestimmung des Gesamtlichtstroms Φ_{LED} und colorimetrischer Kennzahlen (z.B. Normfarbwertanteile (x,y)) erfolgt meist durch Einsatz von Ulbricht-Kugeln. Während sich Glühlampen im Wesentlichen nur durch ihre räumlich Abstrahlcharakteristik unterscheiden und die spektrale Verteilung stets ähnlich ist, können sich LED-Lichtquellen sowohl im spektralen als auch im räumlichen Emissionsverhalten grundlegend unterscheiden.

Die Kalibrierung von Substitutionsnormalen auf LED-Basis, die auf das SI-System rückgeführt sind, wird im Folgenden präsentiert. Die Bestimmung der spektralen Gesamtstrahlungsleistung ermöglicht den Einsatz von Kugelspektrometern.

1 Goniophotometrie

Die Lichtstromkalibrierung von Glühlampen mit einem Goniophotometer ist eine seit Jahrzehnten etablierte Methode, um rückgeführte Transferrnormale für U-Kugel-Messungen zu erhalten. Glühlampen sind hervorragend als Substitutionsnormale für U-Kugelmessungen an anderen Glühlampen geeignet, da sich die spektralen Eigenschaften von thermischen Strahlern bei ähnlichen Temperaturen in der Regel sehr ähneln. Somit unterscheiden sich Glühlampen in der Regel lediglich durch ihr bauförmbedingtes räumliches Abstrahlverhalten – dem sogenannten Lichtstärkeverteilungskörper. Eine überschaubare Anzahl von kalibrierten Substitutionsnormalen mit unterschiedlicher Bauform ermöglicht somit die Lichtstromkalibrierung eines Großteils der verfügbaren Glühlampen.

Bei U-Kugel Messungen von LED-Lichtquellen ist der Einsatz von Glühlampen als Referenznormal nur bedingt empfehlenswert, da die erforderlichen spektralen Korrekturen der eingesetzten Photometer bzw. Dreibereichsfarbmessköpfe sehr hoch sein können.

Für den Einsatz von Spektrometern ist im Idealfall ein Referenznormal mit bekannter absoluter spektraler Gesamtstrahlungsleistung zu verwenden.

1.1 Grundlagen der rückgeführten Goniophotometrie

Als fundamentales Verfahren zur Kalibrierung von Lichtstromnormallampen bietet sich die Goniophotometrie an. Hierbei werden Photometer verwendet, die die räumliche Verteilung der Beleuchtungsstärke $E(r,\vartheta,\varphi)$ auf einer meist kugelförmigen geschlossenen Hüllfläche für alle Richtungen der Lichtausstrahlung im vollen Raumwinkel 4π sr um die Lichtquelle herum messen (vgl. Abbildung 1).

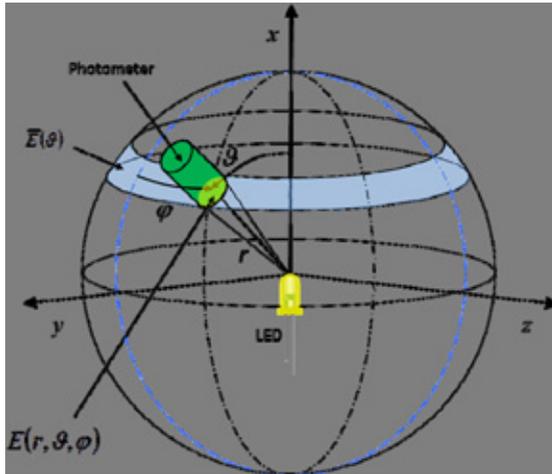


Abb. 1: Ein Photometer bestimmt die räumliche Verteilung der Beleuchtungsstärke $E(r, \vartheta, \varphi)$ auf einer kugelförmigen geschlossenen Hüllfläche mit dem Radius r . Für alle Messrichtungen liegt die Eintrittsfläche des Photometers auf der entsprechenden Tangentialebene der Kugelhüllfläche.

Der Winkel ϑ beschreibt die Position des Photometers zwischen den Polen und kann Werte zwischen 0 rad und π rad (0° und 180°) annehmen. Der Winkel φ beschreibt die Photometer Position in Äquatordirection und kann Werte zwischen 0 rad und 2π rad (0° und 360°) annehmen. Im gezeigten Beispiel kann der Wert des Lichtstroms Φ_{LED} der Lampe aus der Beleuchtungsstärkeverteilung $E(r, \vartheta, \varphi)$ gemäß Gleichung 1 berechnet werden:

$$\Phi = r^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi E(\vartheta, \varphi) \sin(\vartheta) d\vartheta \quad (1)$$

In der Praxis werden an der PTB Lichtstrombestimmungen von Kleinleistungs-LEDs mit einem Goniophotometer durchgeführt, bei dem die LED durch Rotation zweier senkrecht stehender Drehachsen bewegt wird. Hierdurch erhält man die Beleuchtungsstärkeverteilung auf einer Kugeloberfläche, deren Zentrum der Schnittpunkt beider Drehachsen ist und deren Radius durch den Abstand der Photometerreferenzebene zum Zentrum gegeben ist. Ein Translationstisch erlaubt die Änderung der Distanz r (vgl. Abbildung 2).

Die Unabhängigkeit der räumlichen Beleuchtungsstärkeverteilung von der Brennlage der LED ist Voraussetzung für dieses Messverfahren. In der Praxis werden hierfür die LEDs thermostatisiert.

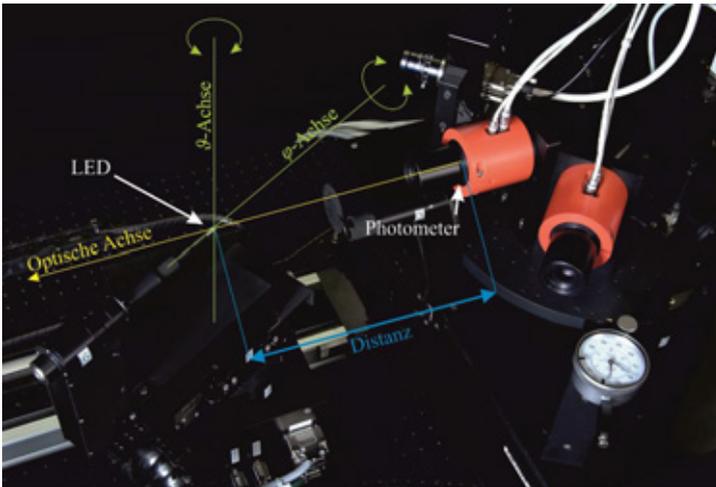


Abb. 2: Ein Goniophotometer bestimmt die räumliche Verteilung der Beleuchtungsstärke $E(r, \vartheta, \varphi)$ einer Kleinleistungs-LED.

Für größere LED-Objekte steht ein weiteres Goniophotometer zur Verfügung, welches das identische Messverfahren verwendet, jedoch Objekte mit einer Masse von bis zu ca. 20 kg bewegen kann (vgl. Abbildung 3).

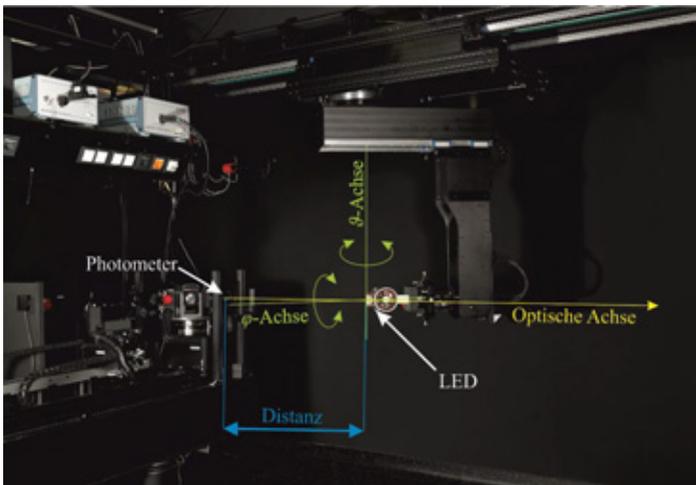


Abb. 3: Ein Goniophotometer bestimmt die räumliche Verteilung der Beleuchtungsstärke $E(r, \vartheta, \varphi)$ einer Hochleistungs-LED.

1.2 Spektrale Fehlanpassung von Photometern

Photometerköpfe bestehen in der Regel aus einer Silizium-Photodiode, deren spektrale Empfindlichkeit durch den Einsatz von Glasfiltern möglichst gut an den Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ angepasst wird. Aufgrund internationaler Standardisierung wird die photometrische Empfindlichkeit von Photometerköpfen fast ausschließlich für Normlichtart A kalibriert. In der Praxis werden hierfür Glühlampen mit einer Verteilungstemperatur von 2856 K verwendet. Wenn man ein solches Photometer für Messungen an anderen Glühlampen verwendet, sind die spektralen Verteilungen meist so ähnlich, dass nur geringe oder gar vernachlässigbare Korrekturen aufgrund der spektralen Fehlanpassung, also der Abweichung der realen spektralen Empfindlichkeit des Photometers von dem Hellempfindlichkeitsgrad, notwendig sind. Wenn man ein solches Photometer jedoch bei LEDs, insbesondere farbigen LEDs, einsetzt, können die Abweichungen aufgrund der spektralen Fehlanpassung sehr groß werden ($>10\%$ für hochwertige Photometerköpfe sind nicht ungewöhnlich).

Mit Kenntnis der relativen spektralen Verteilung der LED $S_{\text{LED}}(\lambda)$ und der relativen spektralen Empfindlichkeit $s_{\text{rel}}(\lambda)$ lässt sich die spektrale Fehlanpassung durch folgenden Korrekturfaktor c_{Spek} korrigieren:

$$c_{\text{Spek}} = \frac{\int V(\lambda) S_{\text{LED}}(\lambda) d\lambda}{\int s_{\text{rel}}(\lambda) S_{\text{LED}}(\lambda) d\lambda} \bigg/ \frac{\int V(\lambda) P(\lambda, T_A) d\lambda}{\int s_{\text{rel}}(\lambda) P(\lambda, T_A) d\lambda} \quad (2)$$

$P(\lambda, T_A)$ beschreibt Lichtart A durch das Plancksche Strahlungsgesetz für $T_A = 2856\text{ K}$.

2 Gonio(spektro)radiometrie

Farbige LEDs besitzen typischerweise eine annähernd einheitliche relative spektrale Verteilung des emittierten Lichts für verschiedene Ausstrahlungsrichtungen. Weiße LEDs für Beleuchtungszwecke nutzen in der Regel blaue LEDs, deren Lichtfarbe durch Einsatz eines gelben Fluoreszenzfarbstoffes in weißes Licht konvertiert wird. Hierbei treten teilweise erhebliche spektrale Veränderungen bei verschiedenen ϑ -Winkeln auf.

Da die Korrektur der spektralen Fehlanpassung von Photometern von der relativen spektralen Verteilung der LED abhängt, ist streng genommen eine räumlich aufgelöste Messung des emittierten Lichts von weißen LEDs für alle Raumrichtungen mit einem Spektro-radiometer notwendig. Die Zusammenfassung einer entsprechenden Messung ist in Abbildung 4 gezeigt.

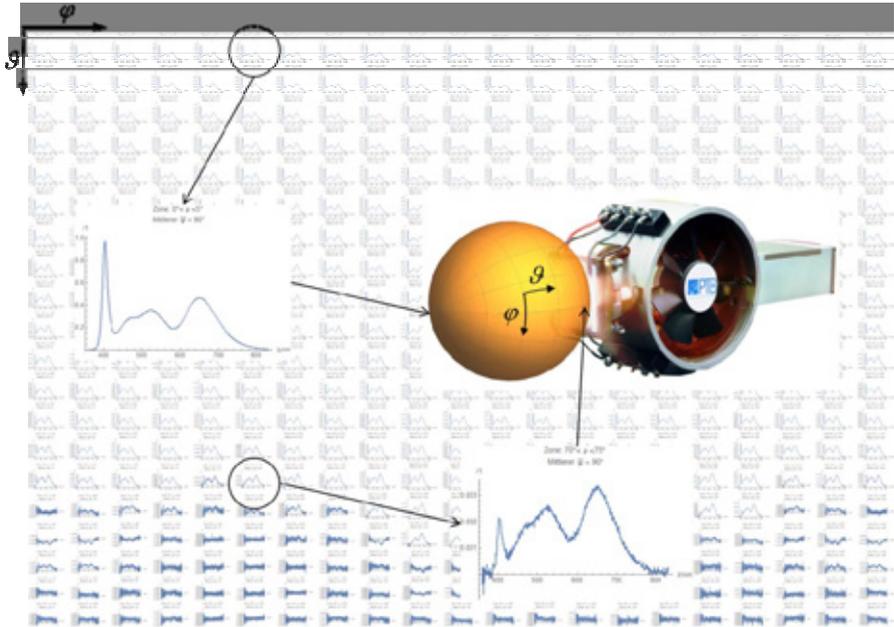


Abb. 4: Spektrale Verteilungen einer weißen LED für verschiedene Ausstrahlungsrichtungen. Die obere Zeile und die Ausschnittsvergrößerung zeigen die spektralen Verteilungen für φ -Winkel nahe 0° . Die einzelnen Spalten zeigen exemplarische Spektren für verschiedene φ -Winkel. Die untere Ausschnittsvergrößerung zeigt die spektralen Verteilungen für einen φ -Winkel nahe 70° . Hierbei wurde erheblich mehr blaues Licht konvertiert und die Lichtfarbe erscheint gelblicher.

Die Methode zur Bestimmung des Lichtstroms ist in Gleichung 1 wiedergegeben. Praktisch wird hierfür ein Photometer verwendet, dessen Ausgangssignal durch Berücksichtigung der spektralen Fehlanpassung nach Gleichung 2 korrigiert wird.

Die radiometrische Größe Gesamtstrahlungsleistung Φ_e LED wird analog bestimmt, allerdings wird statt des Photometers ein ungefiltertes Radiometer mit zugehöriger spektraler Korrektur (Gleichung 4) verwendet.

$$C_{\text{Spek}} = \frac{\int S_{\text{LED}}(\lambda) d\lambda}{\int S_{\text{LED}}(\lambda) s_{\text{Si,rel}}(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

Die relativen spektralen Empfindlichkeiten $s_{\text{Si,rel}}(\lambda)$ von 3 Si-Radiometern ist exemplarisch in Abbildung 5 gezeigt.

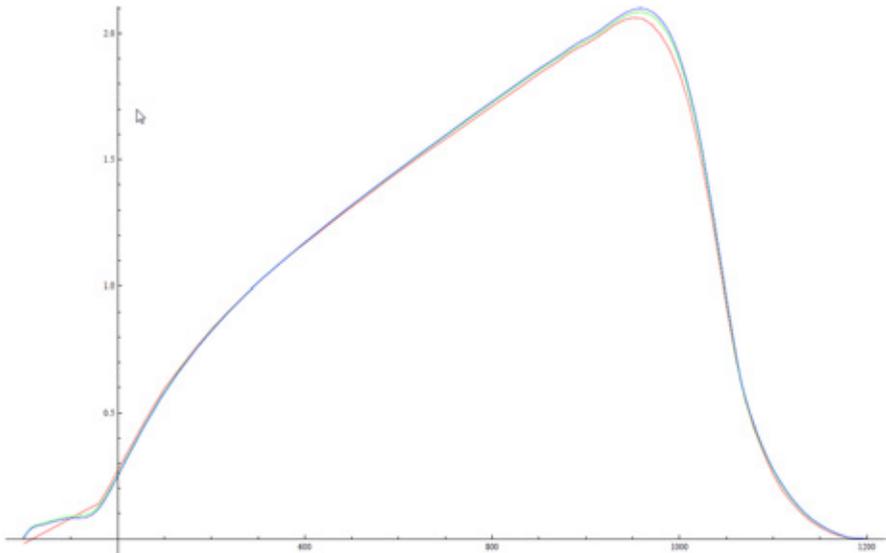


Abb. 5: Die relativen spektralen Empfindlichkeiten von 3 Si-Radiometern

3 Fazit und Ausblick

Der Verzicht auf LEDs ist für Beleuchtungsanwendungen nicht mehr vorstellbar. Durch ihre kontinuierliche Weiterentwicklung eroberten LEDs immer weitere Anwendungsfelder, wie z.B. Haushalts-, Straßen- und Automobilbeleuchtung. Bei diesen Anwendungen sind die Anforderungen an die Lichtquellen vielfältig und für eine quantitative Beschreibung ihrer Eigenschaften muss die Messtechnik entsprechend angepasst werden.

Die Verfügbarkeit von LED-Lichtquellen mit kalibrierter spektraler Gesamtstrahlungsleistung als Substitutionsnormal ermöglicht eine reduzierte Messunsicherheit bei der Verwendung von Ulbricht-Kugeln in Kombination mit Spektroradiometern.

Bestimmung von winkel- und orts aufgelösten spektralen Rayfiles

Ingo Rotscholl,¹ Klaus Trampert,¹ Udo Krüger,² Martin Perner,¹ Inca Leopoldo Sayanca,¹ Franz Schmidt,² and Cornelius Neumann¹

¹Karlsruhe Institute of Technology KIT, Karlsruhe Germany

²TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau, Germany

Problemstellung und Forschungsfragen

In der modernen Beleuchtungstechnik gewinnen die Eigenschaften Farbe, Farbhomogenität und die Spektralverteilung zunehmend an Bedeutung. Allerdings lassen sich Optiken hinsichtlich dieser Aspekte nur schwer auslegen, da die heute verwendeten Lichtquellenmodelle in Raytracern häufig keine winkel- oder orts aufgelöste Spektralinformation beinhalten.

Stand der Wissenschaft/Technik

Ein häufig eingesetztes Lichtquellenmodell ist das Rayfile, das direkt mit einem Nahfeldgoniophotometer gemessen werden kann. Im Fall der leuchtstoffbasierten weißen LED können zwei einzeln vermessene Rayfiles orts- und winkelaufgelöste spektrale Variation beschreiben [1]. Allgemeineren Ansätze basieren auf zusätzlichen Nahfeldmessungen oder winkelaufgelösten Spektralmessungen mit einer folgenden Hauptkomponentenanalyse [2].

Forschungshypothesen

In diesem Beitrag wird eine Methodik vorgestellt, die winkel- und orts aufgelöste spektrale Rayfiles erzeugen kann. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der spektralen Rekonstruktion, die auf einer zuvor durchgeführten Zerlegung in Basisspektren beruht.

Versuchsaufbau

Das Verfahren benötigt neben einem Nahfeldgoniophotometer einen Satz optische Standardfilter. Eine optimale Filterauswahl und eine Abschätzung ihres Einflusses auf die Qualität der Rekonstruktion erfolgt auf Basis von Monte Carlo Simulationen.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Das vorgestellte Verfahren zeichnet sich durch seine Flexibilität und einen vergleichsweise niedrigen Messaufwand mit Standard-Messequipment aus. Die Anzahl der Nahfeldmessungen wird hinsichtlich des Messobjektes minimiert. Außerdem wird das Verfahren basierend auf winkelaufgelösten Spektralmessungen bewertet und mit dem Stand der Technik verglichen.

- [1] OSRAM Opto Semiconductors Application Note, "Importing rayfiles of LEDs from OSRAM Opto Semiconductors", 2013.
- [2] V. Jacobs, J. Audenaert, J. Bleumers, G. Durinck, P. Rombauts, and P. Hanselaer, "Rayfiles including spectral and colorimetric information," Opt. Express **23**(7), 2015.

Towards spatial and angular resolved spectral rayfiles

Ingo Rotscholl,¹ Klaus Trampert,¹ Udo Krüger,² Martin Perner,¹ Inca Leopoldo Sayanca,¹ Franz Schmidt,² and Cornelius Neumann¹

¹Karlsruhe Institute of Technology KIT, Karlsruhe Germany

²TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau, Germany

Research issue

The spectral qualities of lighting systems, for instance colour homogeneity or circadian light effects, are important aspects in modern lighting technology. However, the prediction of spectral related effects during the optical design process in commercial ray tracing software requires realistic light source models in terms of spatial and angular varying spectra.

State of science/technology

The most common light source models are rayfiles, which are generated by goniophotometric measurements. In case of conventional phosphor converted white LEDs, two individual measured rayfiles describe angular or spatial changes of the spectrum [1]. More general approaches are a higher number of narrowband goniophotometric measurements or a spectral rayfile, which bases on a principal component analyses as described in [2].

Research hypothesis

We present a workflow, which is capable of creating angular and spatial resolved spectral rayfiles. Our focus lies on the spectral reconstruction technique, which bases on the assumption that each varying spectrum can be described as weighted sum of basis spectra.

Experimental setup

The measurement setup consists of a standard near field goniophotometer and a set of standard optical filters. We focus on an optimized filter selection process by taking into account measurement uncertainties. We therefore evaluate their influence to the quality of the spectral reconstruction process by applying Monte Carlo simulations.

Results in comparison with previous findings

In contrast to individual measured rayfiles, our workflow can be applied to LED spectra in general. It reduces the number of time consuming goniophotometric measurements to the number of basis spectra and minimizes the uncertainty of the spectral reconstruction by an optimal optical filter selection. The workflow can be combined with a principal component analyses but does not need additional measurement equipment, like a hyperspectral camera, to achieve the spatial separation of different spectral sources.

[1] OSRAM Opto Semiconductors Application Note, "Importing rayfiles of LEDs from OSRAM Opto Semiconductors", 2013.

[2] V. Jacobs, J. Audenaert, J. Bleumers, G. Durinck, P. Rombauts, and P. Hanselaer, "Rayfiles including spectral and colorimetric information," *Opt. Express* **23**(7), 2015.

Bestimmung von winkel- und orts aufgelösten spektralen Rayfiles

Ingo Rotscholl¹, Klaus Trampert¹, Udo Krüger², Martin Perner¹, Inca Leopoldo Sayanca¹, Franz Schmidt² und Cornelius Neumann¹

¹Karlsruher Institut für Technologie, Engesserstraße 13, 76131, Karlsruhe

²TechnoTeam Bildverarbeitings GmbH, Werner-von-Siemens-Straße 5, 98693, Ilmenau

Zusammenfassung

Die Anforderungen an Lichtquellenmodelle im Entwurfsprozess moderner Leuchten für die allgemeine Lichttechnik nehmen im Zuge der steigenden Anforderungen an die Beleuchtungstechnik stetig zu. Dabei rückt zunehmend auch die orts- und winkelaufgelöste Farb- und Spektralverteilung in den Vordergrund. Basierend auf der Annahme, dass die spektrale Variation von Lichtquellen als gewichtete Summe von konstanten Basisspektren beschreibbar ist, soll in diesem Beitrag ein allgemeiner Messansatz zur Erzeugung solcher Lichtquellenmodelle vorgestellt werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Messung und Rekonstruktion der spektralen Information. Des Weiteren wird das Verfahren auf Basis einer leuchtstoffbasierten Weißlicht-LED getestet und mit dem speziell auf diese LED-Familie zugeschnittenen Stand der Technik – dem Blau/Gelb Rayfile - verglichen.

1 Einführung

Durch die rasante Entwicklung der LED-Technologie ist eine moderne Beleuchtungssituation längst nicht mehr nur durch Kenngrößen wie Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke sowie deren Homogenität definiert, sondern besitzt auch hohe Anforderungen hinsichtlich Farbe, Farbhomogenität und spektraler Zusammensetzung. Um diesen gesteigerten Anforderungen im Optikdesignprozess gerecht werden zu können, müssen auch diese Kenngrößen in kommerziellen Strahlverfolgungsprogrammen simulierbar sein. Da jedoch dem Optikdesign zugrunde liegende Prozesse, wie Brechung, Streuung, Reflexion und Absorption oft auch eine materialbedingte Wellenlängenabhängigkeit besitzen und LED-Lichtquellen ihre spektrale Zusammensetzung in Abhängigkeit des Abstrahlwinkels bzw. des Abstrahlortes ändern können, sind die heute genutzten Ausgangsdaten für diesen Optikdesignprozess in Form von konventionellen Strahldatensätzen bzw. Rayfiles nicht mehr ausreichend.

2 Stand der Technik

Konventionelle Rayfiles beschreiben das Abstrahlverhalten einer realen Lichtquelle im Nahfeld in Form eines Strahldatensatzes, wobei jedem Strahl ein Startpunkt und eine Richtung, sowie ein Teillichtstrom zugeordnet wird. Hierzu wird ein abbildendes Leuchtdichtemessgerät, meist eine Leuchtdichtekamera, goniophotometrisch um das Messobjekt bewegt. Durch die Kombination der orts aufgelösten Leuchtdichtebilder aus verschiedenen Winkelpositionen entsteht das Rayfile. Jegliche Spektralinformation geht dabei jedoch durch das optische Integrieren des Leuchtdichtemessgeräts verloren.

Tabelle 1: Konzepte zur Erzeugung spektraler Rayfiles und Zuordnung der Methoden

Anzahl spektraler / filterbasierter goniophotometrischer Messungen	Globale Spektralmessung	Winkelaufgelöste Spektralmessungen
Eine goniophotometrische Filtermessung	<i>Spektrale Änderungen nicht modellierbar</i>	Hauptkomponentenanalyse (PCA) [3]
Mehrere goniophotometrische Filtermessungen	Scharfe spektrale Trennung (Blau/Gelb Ansatz [4]) PMBS (dieser Beitrag)	Polychromatic ray data [2], Spektralvariation auf Basis von Farbkoordinaten [1]

Um nun wieder spektrale Information zum Rayfile hinzuzufügen, sind separate, mit dem Rayfile zu kombinierende Spektralmessungen notwendig. In Tabelle 1 sind vier prinzipielle Möglichkeiten nach [1] aufgezählt, die sich insbesondere hinsichtlich des durchzuführenden Messaufwandes unterscheiden.

2.1 Methoden zur Erzeugung spektraler Rayfiles

In der oberen rechten Ecke der Tabelle können sich keine Methoden befinden, da die zu Grunde liegenden Rohdaten nicht ausreichen, um spektrale Orts- oder Winkelabhängigkeiten zu erfassen. Hierfür sind entweder winkelaufgelöste Spektralmessungen (rechte Spalte der Tabelle) oder mehrere goniophotometrische Messungen mit verschiedenen optischen Filtern notwendig (untere Reihe der Tabelle). Demzufolge wird die meiste Messinformation für die Modelle in der unteren rechten Ecke verwendet und dementsprechend hoch ist auch die generierte Datenmenge und die damit verbundene Messzeit. In [2] werden verschiedene Filtermessungen verwendet, um im Nahfeld das Spektrum basierend auf den spektralen Fernfeldmessungen zu rekonstruieren. In [1] werden die Farbkoordinaten einer RGB-Kameramessung in einer bestimmten Winkelposition über eine Anpassung des vermessenen Fernfeldspektrums für dieselbe Winkelposition verwendet. Jacobs et. al. sind in der Lage winkelaufgelöste spektrale Rayfiles auf Basis einer winkelaufgelösten Spektralmessung und einer anschließenden Hauptkomponentenanalyse sowie einer goniophotometrischen Messung zu erzeugen [3]. Die verwendete Datengrundlage ist allerdings nicht in der Lage eine ortsabhängige Spektralvariation zu beschreiben. Des Weiteren besitzen alle Verfahren in der rechten Spalte der Tabelle eine erhöhte Messzeit, da eine goniophotometrische Spektralmessung eine höhere Messzeit besitzt, als eine ebenso aufgelöste goniophotometrische Leuchtdichtemessung, was auf die erhöhte Integrationszeit des Spektrometers gegenüber einer Leuchtdichtekamera zurückzuführen ist. Für kommerzielle Anwendungen sind deswegen insbesondere die Tabelleneinträge unten links interessant, von denen die scharfe spektrale Trennung in Form der Blau/Gelb Rayfiles für leuchtstoffbasierte Weißlicht-LEDs bereits erfolgreich angewandt wird [4].

2.2 Blau/Gelb Rayfile

Um die Blau/Gelb Rayfiles erstellen zu können, wird jeweils ein Rayfile mit einem entsprechenden blauen oder gelben optischen Filter vermessen, sowie ein global vermessenes Spektrum durch eine scharfe Trennung gemäß Abb. 1 in ein blaues und gelbes Teilspektrum zerlegt und den Rayfiles zugeordnet. Durch die unterschiedlichen Relativverhältnisse der Rayfiles ändert sich das Verhältnis der Teilspektren und somit das Gesamtspektrum.

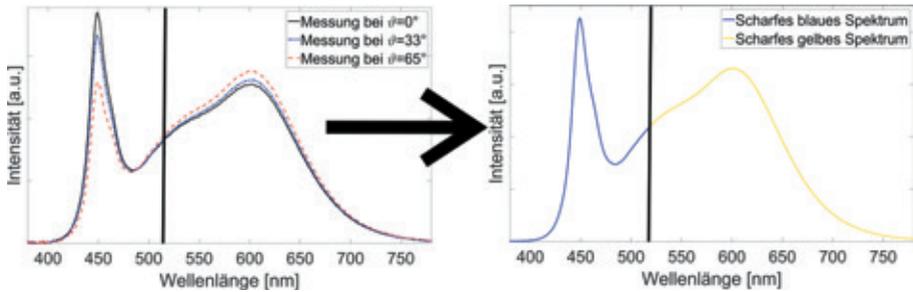


Abbildung 1: Spektrale Variation und Blau/Gelb Spektren

3 Physikalisch motivierte Basisspektren (PMBS)

Das im Folgenden vorgestellte Messverfahren lässt sich genau wie der Blau/Gelb-Ansatz unten links in Tabelle 1 einordnen. Es benötigt also prinzipiell nur ein global vermessenes Spektrum und mehrere goniophotometrische Kameramessungen. Das Grundkonzept basiert auf der Annahme, dass sich jedes vom Ort x, y, z oder Winkel ϑ, ϕ abhängige Spektrum $R(\lambda)$ als gewichtete Summe von n konstanten Basisspektren $S(\lambda)$ gemäß Gleichung 1 beschreiben lässt.

$$R(x, y, z, \vartheta, \phi, \lambda) = \sum_{i=1}^n A_i(x, y, z, \vartheta, \phi) \cdot S_i(\lambda). \quad (1)$$

Die Anzahl n der Basisspektren entspricht dabei der Anzahl der physikalisch vorhandenen spektralen Quellen. Im Falle einer leuchtstoffbasierten Weißlicht-LED also $n = 2$, im Falle einer RGB-LED entsprechend $n = 3$. Die Grundannahme ist, dass sich die Relativspektren der spektralen Quellen nicht ändern, sondern lediglich ihre Amplituden $A_i(x, y, z, \vartheta, \phi)$ eine Orts- und Winkelabhängigkeit besitzen. Es sei angemerkt, dass durch den Ansatz nichtlineare Effekte wie Leuchtstoffsättigung, oder Selbstabsorption vernachlässigt werden. Sind solche Effekte relevant, muss die Anzahl der Basisspektren entsprechend erhöht werden.

Stehen die physikalischen Basisspektren nicht zur Verfügung, so können diese aus einem global gemessenen Spektrum abgeschätzt werden. Für LEDs stehen eine Vielzahl verwendbarer phänomenologischer Modelle zur Verfügung [5]. Ein evtl. vorhandenes Leuchtstoffspektrum ist nach Subtraktion der LED-Spektren durch eine geglättete Spline-Interpolation approximierbar [6].

3.1 Spektrale Rekonstruktion

Bei der i -ten goniophotometrischen Messung wird ein integrales Signal M gemäß Gleichung 2 aufgenommen, wobei die τ_i die Transmissionen der verwendeten optischen Filter und τ_{Sys} die Gesamttransmission des restlichen Systems darstellt.

$$M_i = A_i \int S_1(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{\text{Sys}}(\lambda) d\lambda + \dots + A_n \int S_n(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_{\text{Sys}}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Werden mindestens n Messungen durchgeführt, so lässt sich wie in Gleichung 3 dargestellt, ein lineares Gleichungssystem in seine Matrixform überführen. Um die n gesuchten Amplituden A_i zu ermitteln, müssen die Messwerte mit der inversen Matrix $M_{S\tau}^{-1}$ multipliziert werden.

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_n \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \int S_1(\lambda)\tau_1(\lambda)\tau_{\text{Sys}}(\lambda)d\lambda & \cdots & \int S_n(\lambda)\tau_1(\lambda)\tau_{\text{Sys}}(\lambda)d\lambda \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \int S_1(\lambda)\tau_n(\lambda)\tau_{\text{Sys}}(\lambda)d\lambda & \cdots & \int S_n(\lambda)\tau_n(\lambda)\tau_{\text{Sys}}(\lambda)d\lambda \end{bmatrix}}_{M_{S\tau}} \cdot \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.2 Filterauswahl

Theoretisch sind n verschiedene Filtermessungen zur Aufstellung eines lösbaren Gleichungssystems und damit zur spektralen Rekonstruktion ausreichend. Doch bedingt durch Messunsicherheiten sind die Messdaten M gestört. Im Folgenden soll auf den Einfluss dieser Störungen kurz eingegangen werden. Eine ausführliche Betrachtung dieses Abschnitts ist in [6] zu finden.

Die Größe der Störung der Messdaten M ist von physikalischen Parametern, wie dem Verhältnis der Relativverläufe der Basisspektren und der Filtertransmissionspektren, sowie den Umgebungsbedingungen, beeinflusst. Der Einfluss auf die Störung der rekonstruierten Amplituden A_i hängt zudem vom Aufbau der Matrix $M_{S\tau}$ ab. Durch das Lösen des Gleichungssystems pflanzen sich die Störungen der Messdaten fort. Um eine ideale Filterauswahl aus einem vorgegebenen Filtersatz treffen zu können, sind Monte-Carlo-Simulationen unvermeidbar. Falls nötig, können Vorauswahltechniken genutzt werden, um den Aufwand der Monte-Carlo-Simulationen zu verkleinern [6].

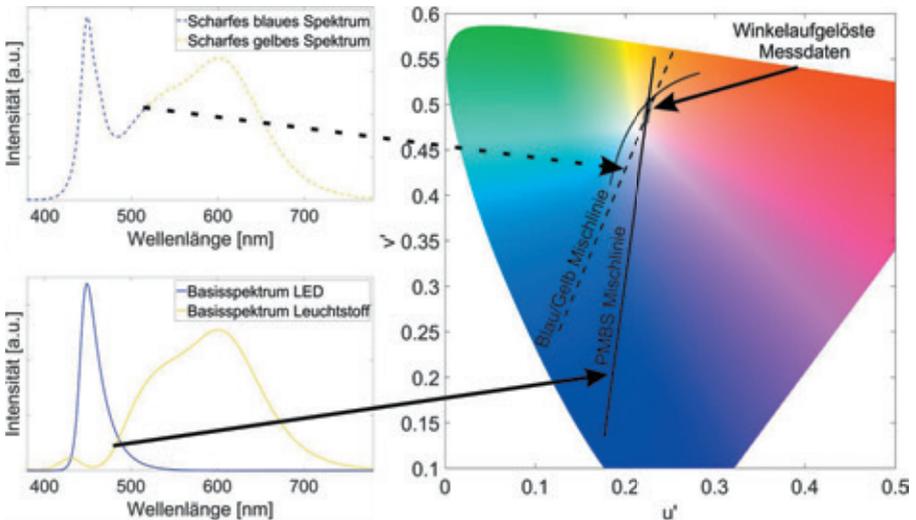


Abbildung 2: Blau/Gelb-Teilspektren und PMBS Basisspektren, sowie ihre jeweils assoziierte Mischlinie in der $u'v'$ -Farbtafel

4 Ergebnisse und Diskussion

Die in Abschnitt 3 verwendete Methodik wurde genutzt, um die Spektralverteilung einer leuchtstoffbasierten Weißlicht-LED auf Basis von zwei goniophotometrischen Messungen mit den Standardfiltern $X_{Kurz}(\lambda)$ und $X_{Lang}(\lambda)$ zu rekonstruieren. Des Weiteren wurde ein konventioneller Blau/Gelb-Rayfile vermessen. Abb. 2 zeigt die Farborte der durch die jeweilige Methode erzeugten Teilspektren und die jeweils dazwischen liegende Farbmischlinie, welche alle Farben visualisiert, die theoretisch durch das jeweilige Modell abgebildet werden können. Werden diese Linien mit den grau eingetragenen winkelaufgelösten Spektralmessungen verglichen, so zeigt sich für beide Methoden eine gute Übereinstimmung, wobei die Ausrichtung der PMBS-Linie eher den vermessenen Daten entspricht. Hinsichtlich der rekonstruierten Farborte aus Abb. 3 ist der mittlere Farbkoordinatenabstand der PMBS Methode geringer und befindet sich mit einem Durchschnittsabstand von $\Delta u'v' = 1 \times 10^{-3}$ in der Größenordnung kaum wahrnehmbarer Farbunterschiede [7].

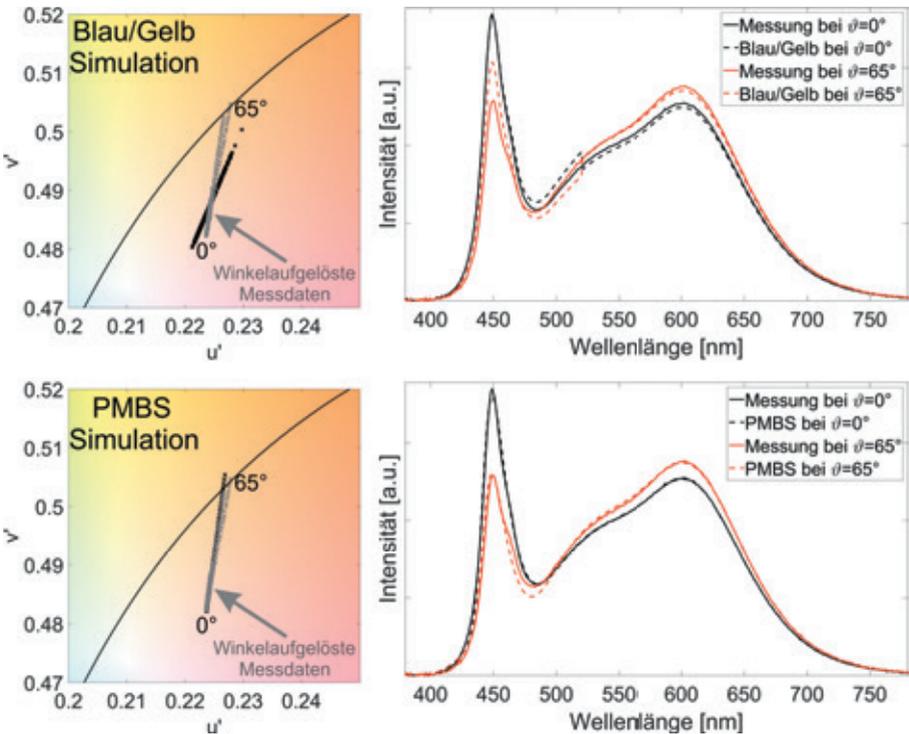


Abbildung 3: Vergleich des Blau/Gelb Ansatzes und der PMBS Methode mit Messdaten hinsichtlich des Farbortes und der rekonstruierten Spektralverteilung

Beim Vergleich der rekonstruierten Spektren bei den Polarwinkeln $\vartheta = 0$ und $\vartheta = 65^\circ$, ist der Einfluss der scharfen Trennung beim Blau/Gelb-Rayfile deutlich sichtbar. Insbesondere das rekonstruierte Spektrum bei $\vartheta = 65^\circ$ weicht deutlich vom gemessenen Spektrum

ab. Die Größenordnung dieser prinzipbedingten Ungenauigkeit hängt dabei stark vom Grad des spektralen Überlapp der physikalischen Grundspektren ab. Je stärker diese überlappen, desto größer ist der Fehler, der durch die scharfe spektrale Trennung entsteht. Dies ist auch der Hauptgrund für die Limitierung des Blau/Gelb-Ansatzes auf leuchtstoffbasierte Weißlicht-LEDs.

Abschließend bleibt zu sagen, dass der PMBS-Ansatz als konsequente Erweiterung der scharfen spektralen Trennung bzw. des Blau/Gelb-Ansatzes betrachtet werden kann. Bei gleichbleibendem Messaufwand mit identischem Messequipment verbessert sich die Genauigkeit der Simulationen im Fall einer leuchtstoffbasierten Weißlicht-LED gegenüber dem Blau/Gelb-Ansatz. Der größte Vorteil der PMBS Methode ist allerdings ihre Allgemeingültigkeit. Sie ist prinzipiell auf jede Art von LED-Spektrum übertragbar.

5 Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Förderprogramms Photonik Forschung Deutschland unter dem Förderkennzeichen 13N13396 gefördert.

6 Literatur

- [1] R. Rykowski, "Spectral ray tracing from near field goniophotometer measurements", *Light Eng.* **19**(1), 23-29, 2011
- [2] D. Hansen, S. Paul, and V. Schumacher "LED Measurement to Obtain Polychromatic Raydata and their Value for Simulations", *LpS 2012*, Bregenz, Austria (2012)
- [3] V. Jacobs, J. Audenaert, J. Bleumers, G. Durinck, P. Rombauts, and P. Hanselaer, "Rayfiles including spectral and colorimetric information," *Opt. Express* **23**(7), A361-A370(2015).
- [4] OSRAM Opto Semiconductors Application Note, "Importing rayfiles of LEDs from OSRAM Opto Semiconductors", 2013.
- [5] F. Reifergeiste and J. Lienig, "Modelling of the temperature and current dependence of LED spectra," *J. Light Vis. Environ.* **32**(3), 288-294(2008).
- [6] I. Rotscholl, K. Trampert, U. Krüger, M. Perner, F. Schmidt and C. Neumann, "Determination of tailored filter sets to create rayfiles including spatial and angular resolved spectral information", *Opt. Express* **23**(23), 29543-29554 (2015).
- [7] K.Bieske and T. Fiebig, "Kombination unterschiedlicher Lichtfarben im Raum: Farbige Schatten," *Licht 2014*, Den Haag, Netherland, (2014)

Das Beste aus zwei Welten – Kombination von Goniophotometrie und digitaler Bildverarbeitung

*C. Schwanengel, Franz Schmidt - TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH
Th. Reiners, C. Diem - LMT Lichtmesstechnik Berlin GmbH*

Problemstellung

Goniometer haben eine sehr kleine Fehlanpassung und erlauben die Messung von kontrastreichen Lichtverteilungen wie Kfz-Abblendlicht, Rücklicht oder weitere HighDynamic-verteilungen. Die Messungen sind aber sehr langsam und dauern Minuten bis Stunden für eine komplette Verteilung. Außerdem sind kaum Bildverarbeitungsalgorithmen verfügbar.

Digitale Bildverarbeitung einer LMK ist schnell und stellt eine hochaufgelöste Lichtverteilung in Sekunden zur Verfügung. Außerdem gibt es verschiedenste Bildverarbeitungsmöglichkeiten: Knickpunktfindung, Maximumdetektion, Schwerpunkte und viele mehr.

Ziel

Ziel für den Kunden ist eine Kombination der Geschwindigkeit und Möglichkeiten der aufgelösten Kameramesstechnik mit dem Kontrast und der Genauigkeit eines Goniometers.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Fortschritt bei der Scheinwerferentwicklung hängt unter anderem von der fortschrittlichen Erfassung der lichttechnischen Parameter ab. Das beschleunigt die Entwicklungszyklen und Genehmigungsverfahren und bringt eine drastische Steigerung des Messpensums für die Scheinwerferanalyse mit sich. Der Artikel demonstriert wie eine intelligente Kombination der digitalen Bildverarbeitung zusammen mit Standardgoniophotometrie die Messung und Entwicklungszeit verkürzt ohne die Datenqualität zu gefährden.

Während die Kamera in Kombination mit einer Reflexionswand die Daten mit mehr als 1 Mill. Pixel in einer Aufnahme erfasst, stellt das Photometer eine unschlagbare Genauigkeit mit der besseren spektralen $v(\lambda)$ Anpassung und der hohen Dynamik zur Verfügung. Durch Einsatz des Goniometers ist es möglich, die Limitierung des fixen Kameraaufbaus in Zusammenhang mit der Messwandgröße aufzuheben und durch Mehrfachaufnahme und Zusammensetzung schnell eine Gesamtlichtverteilung zu erhalten.

Basierend auf einer Vielzahl von realen Laborbeispielen wird gezeigt wie die Kamera-Goniometer-Kombination hohe Genauigkeit, verkürzte Messzeit und beschleunigt Scheinwerferanalyse in modernen Goniometerlaboren sichert.

Realisierungsgrad

Im Einsatz

The best of two worlds – Combining goniophotometry and digital image processing

*C. Schwanengel, Franz Schmidt - TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH
Th. Reiners, C. Diem - LMT Lichtmesstechnik Berlin GmbH*

Issue

Goniophotometry allows the measurement of high contrast distributions like headlamp low beam, rear lamps or other high dynamic distributions and has a very slow mismatch factor. But the measurement is slow and takes minutes up to hours for a complete distribution. Moreover only less image processing operations are available.

Digital image processing is fast and provides a distribution in high resolution in few seconds. Moreover it is possible to use several image processing possibilities, like automatic elbow point detection, maximum detection, threshold, centroid and many more.

Aim

Aim for the customer is a combination of the speed and possibilities of digital image processing with the contrast and accuracy of a goniophotometer.

Description of the innovation/»best practice«

Progress in headlamp development depends on the continuous addition of advanced illumination features to headlamp sets. This increases development cycles and homologation procedures and has drastically inflated the measurement pensus for headlamp analysis.

The paper will demonstrate how an intelligent combination of digital image processing together with standard goniophotometry shortens measurement and thus development time without sacrificing data quality.

While the camera in combination with a reflective wall records data with more than a million pixel in one shot, the photometer provides unbeatable accuracy on account of its superior spectral $v(\lambda)$ adaptation and high dynamics of up to 10 orders magnitude. By employing a goniophotometer one can overcome limitations of a fixed camera setup with regard to wall size by successively recording multiple illumination scenes and then combining them with sophisticated software into a single intensity distribution.

Based on a number of "real laboratory world" examples it will be shown how the camera-goniophotometer combination ensures high accuracy, cuts measurement time, and increases headlamp-analysis throughput in modern goniophotometric laboratories.

Level of realization

Prototype in operation

Die neue DIN EN 13032-4 zur Messung von Lampen und Leuchten – Praktische Anwendung im Lichtlabor

Jürgen P. Weißhaar, opsira GmbH, 88250 Weingarten, Deutschland

Problemstellung

Wie kann man der neuen europäischen Norm DIN EN 13032-4 in der praktischen Messung von Lampen und Leuchten gerecht werden? Welche zusätzlichen Ansprüche stellt der Markt aktuell an die Lichtmesstechnik?

Ziel

Lösung für ein praxisorientiertes Verfahren bzw. eine Messausrüstung zur Messung nach der neuen DIN EN 13032-4 - und darüber hinaus.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Die Goniophotometrie stellt seit jeher ein zentrales Messverfahren innerhalb der Lichttechnik dar. Während zu Beginn der Goniophotometrie die Ermittlung der winkelabhängigen Lichtstärkeverteilung, des Lichtverteilungskörpers, im Vordergrund stand, hat sich aufgrund steigender Anforderungen an die lichttechnischen Systeme, aber auch aufgrund immer leistungsfähiger Lichtsimulations- und Planungstools, die Goniophotometrie stark weiterentwickelt.

Mit dem Erscheinen der neuen DIN EN 13032-4 im August 2015 haben sowohl die Leuchtenhersteller aber auch die Messsystemlieferanten eine neue Leitlinie zur Messung von Lampen und Leuchten.

Das Paper stellt eine weltweit einzigartige Lösung zur Messung sowohl der Daten zur Durchführung der Entwicklung eines optischen Systems (Strahlendaten, etc.) als auch zur Messung der lichttechnischen Eigenschaften des aus der Entwicklung entstandenen Produktes, vor. Relevante Aspekte der DIN EN 13032-4 werden hierbei beleuchtet, weitere Lösungen präsentiert.

Realisierungsgrad

Die Lösung ist realisiert, steht dem Markt zur Verfügung und wird bereits eingesetzt. Weiterentwicklungen und Funktionserweiterungen sind aktuell in Bearbeitung.

Die prinzipielle Tauglichkeit im Sinne der DIN EN 13032-4 wurde am Markt nachgewiesen. TÜV Zertifizierungen für die vorgeschlagene Art von Goniophotometern wurden bereits erteilt.

The new standard DIN EN 13032-4 for the measurement of lamps and luminaires – Implementation in lab practice

Jürgen P. Weißhaar, opsira GmbH, 88250 Weingarten, Germany

Statement of problem

How can the new European standard DIN EN 13032-4 be fulfilled in practice when measuring lamps and luminaires? What are the additional requirements of the market in respect of light measurements?

Intention

Solution for a practical way, i.e. measurement equipment for measurements according to the new DIN EN 13032-4 – and beyond.

Description of the innovation/»best practice«

Goniophotometry has always been a fundamental measuring method in lighting technology. While focusing at first on the angular dependent luminous intensity distribution, the LID, goniophotometry has advanced a lot due to growing demands on optical systems, but also because of increasingly powerful optics simulation and design tools.

The new DIN EN 13032-4 issued in August 2015 provides a new guideline for the measurement of lamps and luminaires to their producers as well as suppliers of measurement systems.

This paper introduces a worldwide new solution for the measurement of data needed for optical systems design (ray data, etc.), as well as for the measurement of the optical characteristics of the developed products. Relevant aspects of the DIN EN 13032-4 are highlighted and further solutions are presented.

Realization level reached

The solution is realized, available on the market and already in operation. Enhancements and functional extensions are being worked at.

The general fitness for purpose according to the DIN EN 13032-4 is proved on the market. The proposed goniophotometers have been certified by the TÜV.

Die neue DIN EN 13032-4 zur Messung von Lampen und Leuchten – Praktische Anwendung im Lichtlabor

Jürgen P. Weißhaar, opsira GmbH, 88250 Weingarten, Deutschland

Problemstellung

Wie kann man der neuen europäischen Norm DIN EN 13032-4 in der praktischen Messung von Lampen und Leuchten gerecht werden? Welche zusätzlichen Ansprüche stellt der Markt aktuell an die Lichtmesstechnik?

Ziel

Lösung für ein praxisorientiertes Verfahren bzw. eine Messausrüstung zur Messung nach der neuen DIN EN 13032-4 - und darüber hinaus.

Istsituation

Goniophotometer sind von jeher eine grundlegende Messmethode in der Lichttechnik und werden mittlerweile seit ca. 100 Jahren eingesetzt.

Seit den Anfängen und bis heute dienen Goniophotometer in erster Linie zur Messung der winkelabhängigen Lichtstärkeverteilung, des Lichtstärkeverteilungskörpers (LVK), des Prüflings, also der Lichtquelle oder der Leuchte. Der Detektor ist typischerweise ein Photometer im Fernfeld des Prüflings.

Getrieben durch die Entwicklung immer komplexerer aber auch immer kompakterer lichttechnischer Systeme, aber auch durch den Einsatz von immer leistungsfähigeren Optikdesigntools, haben sich auch die Goniophotometeranforderungen diversifiziert.

Dieser Artikel stellt einen grundlegend neuen Ansatz vor, um mit nur einem Gerät die Daten von Lichtquellen als Grundlage des Optikdesignprozesses als auch alle Messungen an den resultierenden Produkten (Leuchten, Scheinwerfer, Signalleuchten, etc.) durchführen zu können. Ergebnis der Messung ist nicht nur der Lichtstärkeverteilungskörper im Fernfeld, sondern einiges mehr.

Seit Ende 2015 steht hierzu die neue DIN EN 13032-4 zur Verfügung, die eine Reihe neuer, aber auch altbekannter Forderungen an die Messung stellt. Grundlegend neue Anforderungen sind nicht zuletzt auf den in den letzten Jahren stark gestiegenen Anteil an LED-Anwendungen zurück zu führen, die die DIN EN 13032-4 erst notwendig gemacht haben.

Goniophotometertypen

Herkömmliche Goniophotometer werden durch die Art, wie die einzelnen Drehachsen miteinander verknüpft sind, sowie durch die Art, wie die Prüflinge im Raum gedreht werden, unterschieden.

Die verschiedenen Bauarten sind ausführlich definiert in den Normen DIN 5032-1, DIN EN 13032-1, CIE 70 oder CIE 121. Diese Normen teilen die Goniophotometer in verschiedene Typklassen von 1.x, 2.x über 3.x bis zu 4 ein.

Alle diese, in ihrem kinematischen Aufbau verschiedenen, Lösungen, dienen zur Messung in verschiedenen Koordinatensystemen bzw. verschiedener Systeme. Das Koordinatensystem und der Goniophotometeraufbau für die Messung eines Automobilfrontscheinwerfers unterscheidet sich fundamental vom Goniophotometer für eine Straßenleuchte.

Eine herausragende Stellung hatte bisher das Drehspiegelgoniophotometer, welches zum einen zwar den Vorteil bietet, dass der Prüfling während der Messung immer in seiner Gebrauchslage verbleibt. Auf der anderen Seite bringt dieser Aufbau eine Reihe von Nachteilen wie z. B. der große mechanische Aufbau, Probleme mit der Planität, der spektralen Eigenschaften und Staub auf dem Spiegel, sowie verhältnismäßig hohe Kosten mit sich. Weiterhin kommt es bei der Messung mit dem Spiegelgoniometer zu unerwünschten und nicht korrigierbaren Mehrfachreflexionen zwischen dem Prüfling und dem Spiegel. Messfehler sind die Folge.

Aufgrund der rasanten Verbreitung von LED basierten Beleuchtungssystemen, die deutlich unempfindlicher gegen Lageänderungen reagieren als Systeme mit konventionellen Lichtquellen, hat die Bedeutung des Drehspiegelgoniophotometers weiter abgenommen. Für einige der konventionellen Systeme, z.B. mit Gasentladungslichtquellen, war das Drehspiegelgoniophotometer zwingend erforderlich. LED Systeme benötigen es nicht. Dieser Trend schlägt sich auch in der aktuellen Normung nieder.

Die DIN EN 13032-4:2015 zur Messung von LED Systemen beschreibt explizit die Rotation des Prüflings aus der Gebrauchslage. Komplexe und kostenintensive Spiegelsysteme werden somit überflüssig.

Sollte es die Lichtquelle oder Leuchte erfordern, ist durch die Norm eine Korrektur mit einem sich ortsfest mitbewegenden Hilfsphotometer gefordert. Eine Reihe von Untersuchungen haben gezeigt, dass die Einflüsse durch die Bewegung der Lichtquellen oder Leuchten sehr gering sind und das Hilfsphotometer in aller Regel nicht benötigt wird.

Beschreibung der Innovation bzw. einer praxistauglichen Lösung – ein Gerät für die DIN EN 13032-4

Alle im vorigen Abschnitt beschriebenen Goniophotometer besitzen, unabhängig von ihrem spezifischen Goniometertyp, 1.1, 1.2 oder 2.1, insgesamt fünf oder mehr bewegliche Achsen:

- Mindestens 2 rotatorische Achsen für die Winkelpositionierung des Prüflings oder auch des Detektors.
- Mindestens 3 translatorische Achsen für die Positionierung des Prüflings im Drehpunkt des Goniophotometers. Diese werden zum Teil nur vor der Messung zur Ausrichtung verwendet.

Weiterhin wird deutlich, dass für verschiedene lichttechnische Anwendungen bzw. Märkte viele verschiedene Aufbauten verwendet werden. Typ 1.1 für Automobilanwendungen, Typ 1.3 für die Allgemeinbeleuchtung, etc..

Der grundsätzlich neue Ansatz in der Goniophotometrie ist der Einsatz eines Industrieroboters, um die Rotations- und Translationsbewegungen auszuführen. Mit den 6 Achsen ist dieser Manipulator bzw. dieses Goniophotometer, genannt "robogonio", in der Lage, alle genannten Koordinatensysteme in einem Gerät zu realisieren und somit sowohl die Lichtquellen als auch die Leuchten nach DIN EN 13032-4 zu vermessen.



Abb. 1: Goniophotometer "robogonio"

Prinzipiell werden Industrieroboter seit geraumer Zeit in Produktionsumgebungen eingesetzt. Warum wurden sie dann nicht schon früher auch für die Goniophotometrie verwendet?

Auf der einen Seite hat die Stückzahl von produzierten Industrierobotern in den letzten Jahren stark zugenommen, was den Preis für diese Maschinen in einen interessanten Bereich für den Einsatz in der Goniophotometrie gebracht hat. Auf der anderen Seite hat sich die Positionier- und Winkelgenauigkeit der Roboter stetig verbessert. Sie ist mittlerweile im Bereich der Genauigkeit der traditionellen Goniometer angekommen oder übertrifft diese sogar.

Erfolgreiche TÜV Zertifizierungen wurden durchgeführt und die entsprechenden Anforderungen der „Photometry Laboratory Accuracy Guidelines“, herausgegeben von der Photometriegruppe der „Groupe de Travail Bruxelles 1952“ (G.T.B), für Messungen nach ECE erfolgreich nachgewiesen.

Neben diesen erfolgreichen Zertifizierungen hinsichtlich der Messgenauigkeit lassen sich eine Reihe von weiteren Vorteilen bei diesem Ansatz der Goniophotometrie aufzählen:

- Beliebige Koordinatensysteme bzw. Goniophotometertypen. z.B. 1.1 oder 1.3 bzw. Typ A oder Typ C, können nun mit ein und demselben Gerät realisiert werden.

- Der Aufbau der Industrieroboter ist extrem stabil und steif mit einer sehr hohen Langzeitzuverlässigkeit im Vergleich zu den in geringer Stückzahl hergestellten herkömmlichen Goniophotometern.
- Mehrere, auch weit auseinanderliegende Lichtschwerpunkte können in einer Messung realisiert werden (z.B. verschiedene Lichtfunktionen in einem Automobilscheinwerfer).
- Der mechanische bzw. geometrische Aufbau schränkt sehr lange Prüflinge deutlich weniger in der Bewegung ein.
- Eine große Anzahl verschiedener Baugrößen bis zu einer Tragkraft von 1000 kg ist realisierbar.
- Die DIN EN 13032-4 fordert eine Aufwärmphase für LED Systeme von mindestens 15 Minuten in der Gebrauchslage (typischerweise vertikal nach unten bei den meisten Beleuchtungsanwendungen). Nach Abschluss der Aufwärmphase wird die Leuchte Richtung Detektor positioniert (typischerweise horizontal). Mit dem robogonio Ansatz kann durch die kinematische Flexibilität sowohl die Aufwärmphase als auch die Messung automatisch in einem Durchlauf erfolgen. Die traditionellen Goniometer, z.B. vom Typ 1.3, sind nicht in der Lage diese Forderung der DIN EN 13032-4 zu erfüllen.



Abb. 2: Warmlauf nach DIN EN 13032-4,
Mitte: bereit zur Messung

links: Warmlauf in Gebrauchslage
rechts: Messung mit symbolisiertem Messablauf

Weiterhin kann das robogonio sowohl für Fern- als auch für Nahfeldmessungen eingesetzt werden. Dies ermöglicht dem Lichttechniker oder Optikdesigner sowohl das Messen von detaillierten Lichtquelleneigenschaften als Basis für die Entwicklung der optischen Systeme als auch das Messen des Lichtverteilungskörpers der resultierenden Leuchte mit einem Gerät – egal ob es sich um eine Automotiveanwendung (1.1 Goniophotometer) oder um eine Allgemeinbeleuchtungsanwendung (1.3 Goniophotometer) handelt.

Eine Norm zur Nahfeldgoniophotometrie ist in Kürze zu erwarten. Eine Großzahl der Anforderungen an die Messung kann aber heute schon, auch für die Nahfeldgoniophotometrie, aus der DIN EN 13032-4 verwendet werden.

Zusammenfassung

Dieser Artikel beschreibt einen grundsätzlich neuen und wesentlich flexibleren Ansatz der Goniophotometrie im Hinblick auf die relativ neue DIN EN 13032-4. Die beschriebene Technologie kann in einer Vielzahl von Märkten der Lichttechnik eingesetzt werden. Das roboterbasierte Goniophotometer stellt ein wertvolles Gerät für den gesamten Prozess der lichttechnischen Entwicklung, von der Lichtquelle bis zur Leuchte, dar. Anforderungen der DIN EN 13032-4, wie z.B. das Warmlaufen in der Gebrauchslage, können einfach umgesetzt werden.

All diese Vorteile stehen im Kontext mit einer herausragenden Präzision, Robustheit, und einer sehr hohen Messgeschwindigkeit zu einem vergleichbar interessanten Preis.

QUELLEN UND MARKEN

- [1] R. Baer, D. Gall, "Grundlagen Beleuchtungstechnik", Huss-Medien GmbH, 2006
- [2] DIN 5032-1 Lichtmessung - Teil 1: Photometrische Verfahren, 1999.
- [3] DIN EN 13032-1 Licht und Beleuchtung – Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten – Teil 1: Messung und Datenformat, 2004.
- [4] CIE 70 The measurement of absolute luminous intensity distributions, 1987.
- [5] CIE121 The photometry and goniophotometry of luminaires, 1996.
- [6] V. Schumacher, J. Weißhaar, F. Potekev, "Lichtquellenmodellierung für optische Simulation", Photonik 1/2001.
- [7] D. Hansen, " Messung und Simulation polychromatischer Strahlendaten", Automobiltechnische Zeitung 11, 868 – 873, 2012
- [8] TÜV Fahrzeug - Lichttechnik GmbH, TÜV Rheinland, Certification and Technical Report No. 5356066, opsira robogonio, 2013
- [9] DIN EN 13032-4 - Licht und Beleuchtung-Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten - Teil 4: LED-Lampen, -Module und -Leuchten; Deutsche Fassung prEN 13032-4:2013
- [10] Prof. Dr.-Ing. Peter Marx, "Neue Goniophotometer für lichttechnische Laboratorien", LICHT, Pflaum Verlag, München, 1997
- [11] Jürgen P. Weißhaar, „Neue Wege in der Goniophotometrie“, LICHT2014, Den Haag, Holland
- [12] TÜV Rheinland Lichttechnik GmbH, Certification and Technical Report No. 53507553, opsira robogonio, 2015
- [13] robogonio® ist ein eingetragenes Warenzeichen der opsira GmbH, Weingarten, Deutschland

Erfahrungen aus zwei Jahren Betrieb einer biologisch wirksamen Lichtlösung in einem Produktionsgebäude

*Johannes Zauner M.Sc., Prof. Mathias Wambsganß,
3ipi lichtplaner + ingenieure, München*

Problemstellung

Kunstlichtanlagen die nach circadian wirksamen Prinzipien geplant werden, zeigen in zahlreichen Studien positive Effekte für den Nutzer. Diese äußern sich bspw. in der Erhöhung der Aufmerksamkeit, Konzentrationsfähigkeit und der Verbesserung des allgemeinen Wohlbefindens. Dem gegenüber ist – neben anderen Aspekten – mit einem erhöhten Aufwand im Betrieb zu rechnen. Zum einen erfordert eine circadian wirksame Anlage gegenüber einer klassischen Lichtlösung (bei gleicher Technologie) mehr Licht und damit mehr Energie. Zum anderen ist die Einhaltung der nicht-visuellen lichttechnischen Schwellwerte im Wartungszyklus deutlich schwieriger zu prüfen und nachregulieren. Dazu gibt es bisher kaum Erfahrungswerte, wie sich Anlagen und Raumboflächen im Hinblick auf den nicht-visuell relevanten Spektralbereich über einen längeren Zeitraum hinweg verhalten.

Ziel

Die IWL gGmbH erlaubt es Menschen mit Behinderungen am Arbeitsleben teilzuhaben. Der Neubau eines Anfang 2014 in Betrieb genommenes Produktionsgebäudes umfasste unter anderem eine durch die Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte, circadian wirksame Tages- und Kunstlichtlösung, sowie daran anschließend ein qualifiziertes Energiemonitoring. Im Rahmen des Monitorings wurden auch die oben aufgezeigten Problemstellungen untersucht. Dazu wurde der Energieverbrauch und das Anlagenverhalten der Kunstlichtkomponenten in hoher zeitlicher Auflösung ermittelt, mit den Planungswerten verglichen und Abweichungen systematisch analysiert. Darüber hinaus werden Vor-Ort-Messungen nach 2 Jahren Betrieb der Anlage, sowie im Anschluss an einen Wartungszyklus durchgeführt. Der Vergleich mit der Messung zur Inbetriebnahme wird zeigen, wie stark der visuelle und nicht-visuelle Anteil des Kunstlichts abgenommen haben, wie gut die Kunstlichtsteuerung dies kompensiert hat und welchen Einfluss ein Reinigungs-/Wartungsintervall nach dieser Zeit tatsächlich besitzt. Die Hochschule München begleitet diese Untersuchungen mit einer fortlaufenden Evaluationsstudie der erwarteten Effekte auf die Mitarbeiter.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Wenn überhaupt werden circadian wirksame Anlagen lichttechnisch nur nach der Errichtung vermessen, über die Alterung der Anlagen ist kaum etwas bekannt. Darüber hinaus sind für diese komplexen Lichtlösungen häufig nur Planungswerte des Energieverbrauchs vorhanden. In diesem Projekt werden lichttechnische und energetische Parameter im Betrieb dokumentiert und mit der Planung abgeglichen, sowie durch eine wissenschaftliche Evaluation zu einer ganzheitlichen Betrachtung ergänzt. Bis zum Sommer 2016 wird das energetische Monitoring durchgeführt und ausgewertet. Die Daten zur abschließenden Bestimmung der lichttechnischen Kennwerte werden im Zeitraum Februar und März 2016 vor Ort erhoben.

Operation and maintenance of a circadian lighting-solution for a manufacturing plant – lessons learned after two years

*Johannes Zauner M.Sc., Prof. Mathias Wambsganß,
3lpi lichtplaner + ingenieure, München*

Issue

Artificial lighting solutions with non image forming effects as part of their design principal show their positive effects in a number of studies. Those include, but are not limited to raised vigilance, higher concentration and an overall better comfort level. Those benefits come at a cost however, since additional light (and often lighting fixtures) is needed for the application. That means a raised invest as well as higher energy consumption. Furthermore, it is difficult to guarantee that thresholds for non visual effects are implemented correctly and don't change over time. At present there are not many empirical studies that show how the spectral composition of (reflected) light changes in real settings over time.

Aim

The IWL gGmbH is helping people with special needs by integrating them into a real working environment. In 2014 a new production facility was commissioned. With funding from the "Deutsche Bundesstiftung Umwelt" (DBU) a human centric lighting solution was developed, implemented and monitored. As part of the monitoring the issues stated above were explored. To this end, the energy consumption as well as the characteristics of the lighting solutions were recorded and analyzed against energy demand and other parameters from the planning phase. Furthermore an intensive measurement campaign was conducted two years after commissioning. In this campaign, valuable measurements regarding illuminance values, melanopic daylight equivalent illuminance, spectral irradiance as well as luminance-distribution were taken and analyzed. From this, the effects of ageing, as well as the compensation needed and implemented by the lighting-automation were deduced.

The University of Applied Sciences Munich conducts the monitoring by an evaluation of the anticipated positive effects for the user.

Description of the innovation/»best practice«

If at all, measurements on the non-visual design-parameters for human centric lighting solutions are done right after implementation. There is not a lot of practical knowledge about the effects of ageing for those solutions. Additionally the energy demand for those solutions is very theoretical, since measurements for the energy consumption of HCL are scarce. In this project, not only are there real measurements documented during the usage phase of the building, but they are compared and – if possible – optimized according to the design. The scientific study concerning the effects on the user further adds to the holistic approach of the project.

Erfahrungen aus zwei Jahren Betrieb einer biologisch wirksamen Lichtlösung in einem Produktionsgebäude

Johannes Zauner M.Sc., Prof. Mathias Wambsganß, 3ipi lichtplaner + beratende ingenieure, partnerschaftsgesellschaft mbb, seitd wambsganß zach zauner, München

Zusammenfassung

Die IWL gGmbH erlaubt es Menschen mit Behinderungen am Arbeitsleben teilzuhaben. Im Jahr 2012 fiel die Entscheidung für einen Neubau. Die integrale Planungsphase wurde ebenso wie die anschließende Evaluation, durch die Deutsche Bundestiftung Umwelt (DBU) gefördert. Ein wichtiger Bestandteil der Förderung war die Entwicklung und anschließende Überprüfung eines an den Erkenntnissen über biologisch wirksames Licht orientierten, Tages- und Kunstlichtkonzeptes. Im Tagungsband der Veranstaltung Licht2014 in Den Haag wurde der Planungs- und Inbetriebnahmeprozess erläutert. Der folgende Text beschreibt die Erkenntnisse aus zwei Jahren Betrieb der Anlage, insbesondere in Bezug auf den Energieverbrauch und die Einhaltung der besonderen Planungsvorgaben.

1 Projektbeschreibung

Heute ist gut belegt, dass durch Licht weit mehr Wirkungen über das Auge vermittelt werden, als nur der reine Sehvorgang. In den vergangenen Jahren wurden in verschiedensten Anwendungsbereichen Kunstlichtanlagen realisiert, die diese Wirkungen zum Wohle der Nutzer berücksichtigen sollen. Im vorliegenden Fall werden neben der Evaluierung des erwarteten Nutzens für die Mitarbeiter durch die Hochschule München auch die Qualität der Anlage im Betrieb in Bezug auf die Planungsparameter untersucht.

1.1 Projektbeschreibung

Die IWL gGmbH erlaubt es Menschen mit Behinderungen am Arbeitsleben teilzuhaben. Nachdem die gewachsene Struktur der Werkstätten und Büroräume in Landsberg am Lech den Anforderungen an eine moderne Produktion nicht mehr genügten, fiel im Jahr 2012 die Entscheidung für einen Neubau. Die für anspruchsvolle Projekte essentielle integrale Planungsphase wurde ebenso wie die anschließende Evaluation durch die Deutsche Bundestiftung Umwelt (DBU) gefördert. Die Förderung umfasst dabei die Entwicklung eines mitwachsenden Holzbaus, eines zukunftsorientierten Energiekonzeptes und eines, an den Erkenntnissen über melanopisch wirksames Licht orientierten, Tages- und Kunstlichtkonzeptes. Der erste Bauabschnitt hat eine Nutzfläche von ca. 2.500 m² und besteht vor allem aus Produktionsflächen des Schreinerhandwerks. Die Flächen wurden im Februar 2014 in Betrieb genommen. Die Lichtanlage wurde nach den Empfehlungen in der DIN SPEC 67600 geplant und errichtet. Das Prinzip einer melanopisch wirksamen Beleuchtungslösung ist die Beleuchtungsstärke am Auge eines Nutzers, welche melanopisch und tageslichtäquivalent bewertet wird, über einem bestimmten Schwellwert zu halten. Dies jedoch ausschließlich, sofern sich der Nutzer in seinem circadianen Rhythmus in einer für Synchronisation an die Außenzeit empfänglichen und vorteilhaften Phase befindet.

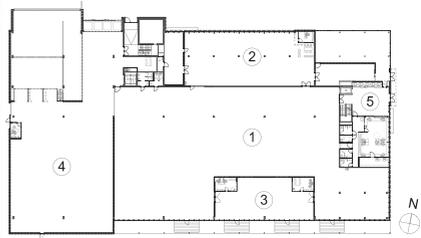


Abb. 1: Links Innenraum (Pos. 3), Blick in Längsrichtung der Sheddächer; Rechts Grundrisschema mit den relevanten Produktionsflächen (1-3) für die für melanopisch wirksame Beleuchtung

Die Umsetzung dieser Erkenntnisse in der gegebenen Raumgeometrie mündete in ein Mehr-Komponenten-Konzept (Abbildung 2). Eine LED-Direktkomponente mit einer Farbtemperatur von 4.000 Kelvin stellt die normgerechte Basisanforderungen an das Kunstlicht energieeffizient sicher. Der melanopische Wirkfaktor dieser Komponente liegt bei 0,6. Diese Komponente allein kann die Anforderungen an eine melanopisch wirksame Beleuchtung jedoch nicht oder nur sehr ineffizient erfüllen. In Ergänzung zur LED-Beleuchtung wurde eine T16-Indirektkomponente gewählt, die auf den Decken- und Sheddachbereich ausgerichtet ist, um einen möglichst großen Raumwinkel für den Nutzer auszuleuchten. Dieses Leuchtmittel hat eine Farbtemperatur von 17.000K und einen melanopischen Wirkfaktor von 1,11. Damit ist diese Lichtquelle in hohem Maße biologisch wirksam.

Aufgrund der Komplexität der Steuerung wurde im April 2014 eine umfangreiche Inbetriebnahme durchgeführt. Neben horizontalen und zylindrischen Beleuchtungsstärken wurden auch Leuchtdichte-, sowie Spektralmessungen durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Kunstlichtanlage und insbesondere auch deren Steuerung bis auf wenige, im Nachgang optimierte Ausnahmefälle, den gesteigerten Anforderungen der Planung gerecht wurde.

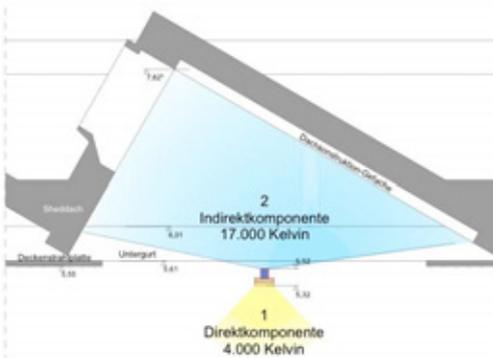


Abb. 2: Systemschnitt der Kunstlichtkomponenten und realisierte Anlage

2 Ergebnisse aus der Monitoringphase (08/2015 – 07/2016)

2.1 Aufgabenstellung im Monitoring

Im Rahmen der integralen Planungsphase wurden für die Hauptflächen im IWL-Projekt umfangreiche Simulationsreihen durchgeführt. In diesen wurde der Tageslichteintrag für unterschiedliche Hallenbereiche ermittelt und auf dieser Basis der Kunstlichtbedarf errechnet. Zentraler Bestandteil der Monitoringaufgabe war es, diesen Bedarf mit dem Verbrauch zu vergleichen und mögliche Abweichungen zu analysieren. Abweichungen können aus verschiedenen Gründen entstehen. Drei dieser Abweichungen wurden in eine aktualisierte Bedarfsberechnung eingepflegt:

1. Abweichende Positionierung/Stückzahl von Leuchten gegenüber der Simulation
2. Veränderung der räumlichen Geometrie/Oberflächen gegenüber der Simulation
3. Angenäherte Lichtstromreduktion / Raumverschmutzung zum Monitoringzeitraum.

2.2 Vergleich Kunstlichtstromverbrauch gegen -bedarf

Die Planungsprognose bezifferte den Kunstlichtstrombedarf mit $8,81 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Unter Berücksichtigung der unter 2.1 genannten Punkte liegt der für den Monitoringzeitraum relevante Kunstlichtstrombedarf bei $7,67 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Der Jahresverbrauch stellt sich mit $7,00 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ nochmals etwas niedriger ein (-9%). Die Indirektkomponente ist für ca. 40% des Kunstlichtstromverbrauchs im Monitoringzeitraum verantwortlich.

Daten für den Monat Juli, der zum Abgabe im Tagungsband noch nicht zur Verfügung stand, wurden auf kalkulatorischer Basis berücksichtigt. Ebenso die Indirektkomponente in den Monaten August, sowie von Mitte Februar bis Mitte März. Im Rahmen der Evaluation der Hochschule München war die Indirektkomponente zu diesen Zeiten deaktiviert (Einstellung „Kontrollgruppe“).

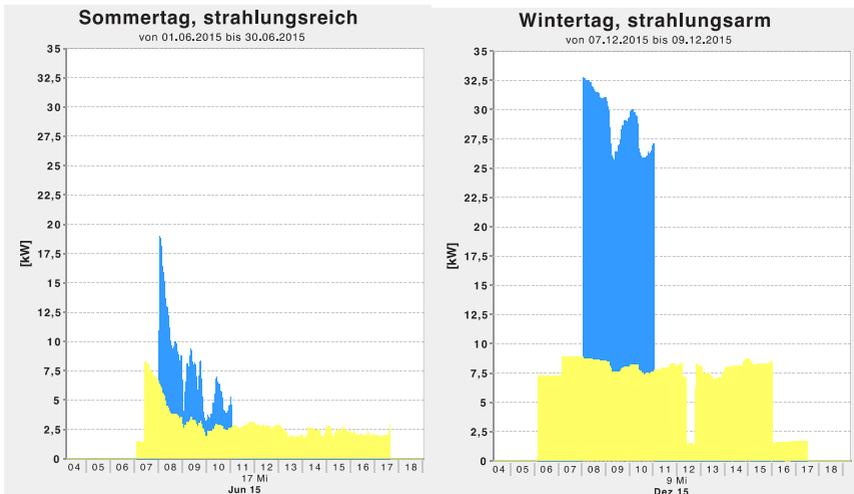


Abb. 3: Beispielhafte Leistungsaufnahme der Direktkomponente (gelb) und der Indirektkomponente (blau) für zwei sehr unterschiedliche Tage. Die Indirektkomponente ist von 8:00 bis 11:00 Uhr aktiv.

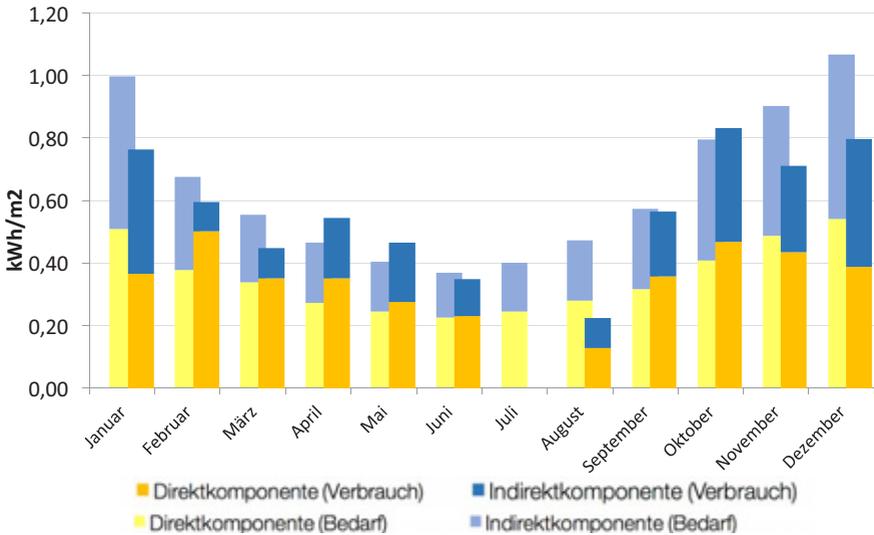


Abb. 4: Monatsweiser Vergleich von Verbrauchs- (dunkel) und angepassten Bedarfswerten (hell) der Direktkomponente (gelb) und Indirektkomponente (blau) von August 2015 bis Juni 2016. Daten für Monat Juli standen zum Berichtszeitpunkt noch nicht zur Verfügung. Bedarfswerte berücksichtigen Urlaubszeiten gleichmäßig über das Jahr (Grund für große Abweichungen in einigen Monaten)

Häufig stehen im Monitoring keine Bedarfswerte aus der Realisierung, sondern aus früheren Planungszuständen zur Verfügung. Im vorliegenden Fall erlaubt der Vergleich mit dem angepassten Prognosewert (neben Abweichungen des Strahlungsangebots) vor allem Aussagen über die Kunstlichtsteuerung. Mit einer Abweichung von weniger als 10% ist das Verhalten der Automation als sehr nahe an der Planung zu vermuten.

Der etwas geringere Verbrauch erklärt sich zumindest in Teilen durch die in Abschnitt 3 weiter erläuterten Alterungserscheinungen, nach denen die Kunstlichtanlage insbesondere in der Aktivierungsphase von 8-11 Uhr etwas höhere Dimmwerte hätte annehmen müssen.

3 Überprüfung von Planungsparametern nach zwei Betriebsjahren

Im Rahmen einer umfangreichen Messkampagne im Februar 2016 wurden wichtige Untersuchungen aus der Inbetriebnahmemessung 2014 wiederholt bzw. ergänzt. Diese betrafen horizontale Beleuchtungsstärken, zylindrische melanopisch bewertete tageslicht-äquivalente Beleuchtungsstärken, die Alterung von Lampen und Leuchten, sowie die Verschmutzung von Leuchten und Oberflächen. Im Folgenden werden Auszüge daraus dargestellt.

In der Planungs- und Inbetriebnahmephase der Kunstlichtanlage fand Hinblick auf die nichtvisuellen Wirkungen von Licht über das Auge mit dem damals gültige Stand der Wissenschaft das Spektrum der Melatonin-Suppression nach Gall seine Anwendung (sogenanntes $c(\lambda)$ -Wirkspektrum). Dieses Spektrum besitzt nach wie vor Gültigkeit für die Melatonin-Suppression. Mit der Überarbeitung der DIN SPEC 5031-100 im August 2015 wurde für die Planung der nichtvisuellen Wirkungen jedoch ein anderes Wirkspektrum auf Basis

neuester Erkenntnisse gewählt (sogenanntes $s_{mel}(\lambda)$ -Wirkpektrum). Dieses beschreibt die Absorptionseigenschaften der photosensitiven Ganglienzellen im menschlichen Auge, die für die nichtvisuellen Wirkungen von zentraler Bedeutung sind. Beide Spektren unterscheiden sich in ihrem Peak um ca. 30nm, der tatsächliche Effekt auf die Planungsparameter der Kunstlichtanlage ist jedoch gering. Für die folgenden Bewertungen findet die $s_{mel}(\lambda)$ - Kurve als derzeit gültiges Bewertungskriterium Anwendung.

3.1 Melanopische tageslichtäquivalente Beleuchtungsstärke (zylindrisch)

Tab. 1: Messung der melanopisch wirksamen, tageslichtäquivalenten Beleuchtungsstärke auf einer Höhe von 150cm bei reinem Kunstlichteinfluss. Dabei wurde das Kunstlicht einmal mit aktiver Steuerung (Dimmung aktiv, Steuerung auf "Wartungswert") und einmal bei 100% Einstellung der Komponenten

Standort	Anforderung	Messung, nur Kunstlicht, Steuerung aktiv	Messung, nur Kunstlicht, Komponenten 100%
Nr.	mel D65 lux	mel D65 lux	mel D65 lux
Sheddachbereich	240	198	295
Sheddachbereich 2	240	225	334
Sheddachbereich 3	240	222	325
Fassadennah	240	235	334
Fassadennah 2	240	128	208
Fassadennah 3	240	160	268
Nordfassade	240	221	386

Aus Tabelle 1 ist deutlich erkennbar, dass der Anforderungswert nicht erreicht wird. Gleichzeitig ist bis auf einen Fall das notwendige Potential vorhanden. Wie ist dieses Ergebnis zu werten? Die Ergebnisse zeigen, dass die Kunstlichtsteuerung die Lichtstromabnahme über die Zeit nicht adäquat kompensiert. Bei der Inbetriebnahmemessung waren bis auf zwei Bereiche ausreichende Beleuchtungsstärken vorhanden. Es ist demnach besonderes Augenmerk auf das Handling von Alterungseffekten solcher Anlagen zu legen, damit eine Erfüllung der Planungsvorgaben über die Nutzungszeit sichergestellt ist. Denn diese nichtvisuellen Parameter sind für den Nutzer oder Betreiber nicht oder nur schwer prüfbar.

Es stellt sich weiterhin die Frage, was die Unterschreitung der Anforderung für den Nutzer im realen Betrieb bedeutet. Relevant ist hier die gesamtheitliche Betrachtung. Selbst fassadenferne Bereiche werden über Sheddachöffnungen mit Tageslicht versorgt. Fassadennahe Bereiche waren bezüglich der Kunstlichtsituation bereits bei der Simulation, wie auch der Inbetriebnahmemessung als herausfordernde Positionen bekannt. Über die Glasfläche, sowie den teils hohen Anteil an OSB-Oberflächen im Blickfeld erreicht nur wenig Licht den Nutzer über Reflektionen. Diese Bereiche profitieren gleichzeitig am meisten von Tageslicht im Außenraum. An den Nutzerstandorten zeigte sich, dass in Summe mit dem Tageslicht – wenn überhaupt - lediglich an wenigen, besonders strahlungsarmen Tagen im Winter zwischen 8:00 und 9:00 Uhr Morgens eine Unterschreitung des Anforderungswertes zu erwarten ist.

3.2 Leuchtenverschmutzung

Im Rahmen der Messungen wurden die Leuchtenkomponenten auf Verschmutzung bzw. Verstaubung hin geprüft. Während die Direktkomponente im relevanten Inneren der Leuchte praktisch keinerlei sichtbare Staubablagerung aufwies, hat sich auf der Indirektkomponente im Verlauf von zwei Betriebsjahren eine dünne aber sichtbare Schicht an Raumstäuben abgelagert. Die Indirektkomponente reflektiert über den Sheddachbereich in den Raum, primär über die dem Fenster gegenüberliegende Fläche. Um den Effekt einer umfangreichen Leuchtenreinigung abschätzen zu können, wurde eine einzelne Leuchte mit maximalem Lichtstrom betrieben, sämtliche anderen Leuchten waren ausgeschaltet. Der Lichtstrom der Leuchte war konstant über die Messungen. Von der relevanten Sheddach-Fläche wurde dann ein Leuchtdichtebild erstellt bevor und nachdem die Leuchtenoberfläche gereinigt wurde.

Die beiden Leuchtdichtebilder wurden mittels bildbasierter Berechnungen voneinander abgezogen und die Differenz auf den derzeitigen Leuchtenstand bezogen (ungereinigt). Das Resultat zeigt die relative Verbesserung durch die Reinigung. Diese liegt im Mittel bei ca. 5% des derzeitigen Lichtstromes von der Sheddachfläche. Diese 5% sind Bestandteil der gesamten Beleuchtungsstärkeabnahme horizontal und vertikal durch die Indirektkomponente (E_h -14%, E_z -22%). Der Rest ist auf den Lichtstromrückgang der Leuchte, sowie die „Verschmutzung“ des Raumes zurückzuführen. Wenn angenommen wird, dass die Verschmutzung jährlich ca. 2,5% zunimmt, wäre eine Reinigung mit Kosten in Höhe von 1.000€ aufgrund der Energiekosten erst 9 Jahre nach der Inbetriebnahme wirtschaftlich. Im Hinblick auf die melanopischen Wirkungen ist eine Reinigung jedoch früher notwendig.

4 Fazit

Seit Projektbeginn haben sich die Bewertungsmaßstäbe, wie auch die Terminologie bezüglich der nichtvisuellen Lichtwirkungen über das Auge fortlaufend weiterentwickelt. Damit ist auch weiterhin zu rechnen, weil der wissenschaftliche Prozess in diesem vergleichsweise jungen Planungsfeld direkter eingebunden ist als üblich – das verdeutlicht die Dringlichkeit, mit der diese Thematik in die Praxis eingeführt werden muss. Denn jede Kunstlichtlösung aktiviert den nichtvisuellen Wirkkanal mehr oder weniger und beeinflusst damit das Wohlbefinden der Nutzer in hohem Maße.

Die im Projekt entwickelte Kunstlichtlösung zeigt, dass essentielle Planungsparameter dieser Wirkungen für den Lichtplaner nutz-, umsetzbar und vor allem auch kontrollierbar sind. Ein Energie-Mehraufwand ist im Betrieb unvermeidlich, aber vorab im Rahmen der Planung realistisch kalkulierbar. Die Integration einer tageslichtabhängigen Regelung für melanopisch wirksame Komponenten hat sich als zielführend für die Minimierung dieses Verbrauchs erwiesen. Die gute Tageslichtversorgung an den Fassaden lässt vermuten, dass Kunstlichtlösungen in bestimmten Fällen ggf. nicht aufwändig ertüchtigt werden müssen, um die Anforderungen an eine melanopisch wirksame Anlage zu erfüllen. Hier fehlen dringend Hinweise für frühe Phasen der Architekturplanung, in der eine Optimierung der Fassade mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich ist.

Es wurde abschließend auch gezeigt, dass Alterungserscheinungen im Hinblick auf die melanopischen Lichtwirkungen noch nicht adäquat berücksichtigt werden. Der Überwachung und Nachregelung einer Anlage kommt dadurch eine noch größere Bedeutung zu, als es bei visuellen Parametern der Fall ist.

Investigating the effect of personalized dynamic light scenarios on the desk and on the eye – A field study

Yvonne A. W. de Kort, Karin C. H. J. Smolders, and Renske de Bruijn, Human-Technology Interaction group, Eindhoven University of Technology, The Netherlands

Research issue

Research on non-image forming effects of light have indicated that optimal light settings are crucial not only for vision, but also for a healthy entrainment of the biological clock and momentary alertness and vitality. This means that in future we should be formulating lighting standards not only for horizontal levels on the desk, but also for vertical levels on the eye. The current study presents a field study testing the effects of such optimized light settings on visual appraisals, wellbeing and performance in real life.

State of science/technology

For years we have heard the promise of LED offering unlimited opportunities to deliver dynamic and individually tailored light conditions throughout the day, but its implementation in realistic settings still poses numerous challenges. The PILCS project uniquely addressed three of these challenges. First, optimal levels of light received on the desk and on the eye as a function of time of day and personal characteristics were determined based on the available scientific literature. Second, state of the art office luminaires were redesigned so that they were able to independently deliver light on the desk and on the eye, tuneable in level as well as colour temperature. Third, an intelligent lighting infrastructure (hard- and software) was developed that enabled us to deliver personalized lighting in realistic office environments, individually tuned for Chronotype, SAD-sensitivity and age. We will present the first analysis of the effects of such an intelligent light system.

Research hypothesis

Light exposure patterns on eye and desk, optimized for time of day and tailored to person characteristics should improve alertness, vitality, and cognition in real-life office conditions.

Experimental setup

Office employees (N=25) experienced two weeks of standard lighting and two weeks of a personally optimized scenario (counterbalanced) in their own offices. During these phases, we employed ecological momentary assessment to track vitality, alertness, appraisals and cognitive performance throughout the day. Also, sleep diaries, actigraphy and ambulatory light measurements were utilized to track sleep and to control for actual light exposure.

Results in comparison with previous findings

Data collection is currently in progress (phase two). At the conference, we will report on the effects of the personalized light scenarios on employees' vitality, alertness and cognitive performance employing hierarchical modelling. In addition, we analyze and report on user experiences of such dynamic and personalized lighting in their office environment.

Licht und Bildung – Nicht-visuelle Effekte auf die akademische Leistung

Philipp Novotny, Hochschule für angewandte Wissenschaften München

Herbert Pliischke, Hochschule für angewandte Wissenschaften München

Problemstellung und Forschungsfragen

Um den Einfluss von künstlichem Licht mit erhöhten Blauanteilen auf die akademische Leistung bei Schülern, Jugendlichen und Studenten zu erfassen, wurden unterschiedliche Parameter wie zum Beispiel Konzentrationsleistung oder der Lesefluss untersucht. Bisher konnte noch keine eindeutige Dosis-Wirkungsbeziehung ermittelt werden, um eine bestimmte Steigerung der akademischen Leistung zu erzielen.

Stand der Wissenschaft/Technik

Es gibt einige Bestrebungen die akademische Leistung durch die Benutzung von Lichtszenarien mit erhöhten Beleuchtungsniveaus und Farbtemperaturen zu erhöhen. Systeme die Human Centric Lighting (HCL) nutzen werden bald veraltete, statische Lichtsysteme ersetzen. Erkenntnisse aus der Forschungsliteratur zeigen, dass HCL die akademische Leistung auf unterschiedliche Weise verbessern kann.

Forschungshypothesen

Wir haben wissenschaftliche Publikationen untersucht, die sich mit Effekten von Licht auf die akademische Leistung befassen haben. Wir haben versucht einen Zusammenhang zwischen akademischer Leistung und alpha-opischen Beleuchtungsstärken zu finden. Die Nullhypothese stellt dabei da, dass es keinen Effekt von Licht auf akademische Leistung gibt.

Versuchsaufbau

Über 1000 Publikationen von PubMed, ScienceDirect und Google Scholar wurden begutachtet. In direktem Zusammenhang wurden 15 Publikationen identifiziert, welche die Auswahlkriterien erfüllten. Sechs Studien benutzten den d2-test um die Konzentrationsleistung bzw. die Reduzierung der Fehlerrate zu ermitteln und wurden für eine qualitative Auswertung verwendet. Die alpha-opischen Beleuchtungsstärken wurden aus den angegebenen Daten neu berechnet. Der Gewinn an Konzentrationsleistung und Reduzierung von Fehlern wurde in Abhängigkeit der jeweiligen alpha-opischen Beleuchtungsstärke ermittelt

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Sowohl die Konzentrationsleistung, als auch die Anzahl der Fehler verbesserten sich mit zunehmender alpha-opischer Beleuchtungsstärke, insbesondere der tageslichtäquivalent melanopisch gewichteten Beleuchtungsstärke. Dies lässt sich in einer quantitativen Betrachtung über alle untersuchten Publikationen bestätigen. Es wird trotzdem ausdrücklich empfohlen weitere Untersuchungen mit besser definierten Lichtszenarien und standardisierten Messverfahren durchzuführen um die bestehenden Ergebnisse zu bestätigen.

Light and education – Non-visual effects on academic performance

Philipp Novotny, Munich University of Applied Sciences

Herbert Plischke, Munich University of Applied Sciences

Research issue

To determine the influence of artificial blue enriched light on academic performance in pupils, adolescents and students, different parameters like concentration performance or reading fluency have been used. Until now a dose response relationship is not established, or what is the best spectral composition and illuminance to achieve a certain amount of gain in academic performance.

State of science/technology

There are some efforts to increase academic performance by using lighting conditions with higher illuminance levels and colour temperature. Now Human Centric Lighting (HCL) Systems will soon replace old static lighting systems. Findings in the scientific literature show that HCL can improve academic performance in different ways.

Research hypothesis

We reviewed scientific papers that examined the effect of light on academic performance. To determine the relationship we compared academic performance and alpha-opic illuminance levels. Also we wanted to determine which alpha-opic spectrum has the best fit. The null hypothesis is that light has no significant effect on academic performance.

Experimental setup

Over 1000 publications from PubMed, ScienceDirect, and Google Scholar have been reviewed using the keywords: light, lighting, school, children, pupil(s), student(s), adolescent(s), performance, education, academic, illuminance, illumination, luminance, sleep, sleepiness, circadian rhythm, and melatonin. A total of 15 publications with direct correlation to light and academic performance met the selection requirements and had sufficient detailed data for evaluation. Six studies used the d2-test to measure concentration performance or reduction of errors and where therefore chosen for qualitative analysis. Alpha-opic illuminance levels have been calculated from the study dataset. Gain scores of concentration performance and gain scores of reduction in errors were calculated in respect to exposed alpha-opic illuminance levels with the respective coefficient of determination.

Results in comparison with previous findings

Concentration performance and reduction of errors improved with increased alpha-opic illuminance levels, particularly for melanopic weighted illuminance levels. Over all, this correlates quite well in a quantitative observation with the findings of the reviewed papers. Nevertheless, we recommend further research with better defined lighting scenarios and standardized measurement setup to confirm or reject our research hypothesis.

Licht und Bildung – Nicht-visuelle Effekte auf die akademische Leistung

*Philipp Novotny und Herbert Plischke
Hochschule für angewandte Wissenschaft München
Fakultät für angewandte Naturwissenschaften und Mechatronik
Lothstraße 34, 80335 München, Deutschland*

Zusammenfassung / Summary

In dieser Untersuchung wurden die Daten aus vorhandenen Studien zu Licht und akademischer Leistung über α -opische Berechnungen bewertet. Die Bewertung über melanopische lichttechnische Größen scheint die nicht-visuellen Wirkungen über das Auge hinreichend gut abzubilden. Auch wenn aufgrund der Komplexität der biologischen Verschaltungen im Auge und Gehirn noch nicht quantitativ exakt festgelegt werden kann, welche Beleuchtungsstärke mit welcher Farbtemperatur zu welcher Zeit oder je nach Aufgabe die besten Ergebnisse liefert, lassen sich zumindest „Leitplanken“ für die Planung von Beleuchtungsanlagen in Schulen gut definieren. Über die untersuchten Publikationen hinweg ist belegt, dass eine Raumbelichtung während des Vormittages mit höheren Intensitäten und Farbtemperaturen positive Auswirkungen auf die akademische Leistung haben können. Wichtig ist, dass die künstliche Beleuchtung mit dem natürlichen Verlauf des Sonnenlichtes abgestimmt wird, um die circadiane Rhythmik zu stärken. Dann ist es möglich, die akademische Leistung zu unterstützen und in der Nacht einen erholsamen Schlaf zu fördern. Tageslichtähnliche Verhältnisse (bezüglich der Farbtemperatur bei vorgeschriebener Beleuchtungsstärke) in der Nacht erhöhen auch die Konzentrationsleistung, sind aber aufgrund der Störung des circadianen Rhythmus zu vermeiden. Dies gilt für Schulbeleuchtung aber auch für Computermonitore und selbstleuchtende mobile Lesegeräte (eBooks, Tablets). Hier wären die negativen Auswirkungen bezüglich der Effekte auf den circadianen Rhythmus höher als die positiven Effekte der akuten Leistungserhöhung.

1 Beleuchtung und akademische Leistung von Schülern

Seit der Beschreibung einer neuen Art von Photozelle in der menschlichen Netzhaut, hat Licht und seine nicht-visuelle Wirkung über das Auge einen starken Interessensschub in Forschung und industrieller Anwendung erhalten. Neben der Erforschung von nicht-visuellen Wirkungen von Licht auf die Arbeitsumgebung des Menschen, sei es an Büroarbeitsplätzen oder für die Schichtarbeit, hat sich die Forschung auch dem Bildungssektor zugewandt und dabei die nicht-visuelle Wirkung von Licht auf Schüler unterschiedlicher Altersgruppen, Studenten und Erwachsene und ihre akademischen Leistungen untersucht. Die Forscher haben sich dabei hauptsächlich auf die Messung von Konzentration und Aufmerksamkeit fokussiert und dabei unterschiedliche Methoden zur Erfassung ihrer Daten herangezogen.

Bisher wurde noch keine Metaanalyse der vorhandenen Studien durchgeführt.

2 Der Review Prozess

Um relevante Studien zu identifizieren wurden in den wissenschaftlichen Datenbanken PubMed, ScienceDirect und Google Scholar folgende Suchbegriffe in unterschiedlicher Kombination zur Recherche verwendet: light, lighting, illuminance, illumination, luminance, school, academic, performance, education, learning, student(s), pupil(s), children, sleep, sleepiness, circadian rhythm, melatonin.

Eine Schwierigkeit bildeten hierbei die im englischen mehrdeutigen Begriffe ‚pupil‘ und ‚light‘, die in dem hier gesuchten Kontext ‚Schüler‘ und ‚Licht‘ und nicht ‚Pupille‘ und ‚leicht‘ bedeuten. Die Trefferquote lag demnach bei weit über 1000 Publikationen. Ein Teil der begutachteten Publikationen war nicht in deutscher oder englischer Sprache verfügbar und musste deswegen aus der Analyse ausgeschlossen werden. Insgesamt konnten 28 Publikationen identifiziert werden, die sich mit Licht und Schule beschäftigen.

3 Gemessene Parameter

In den relevanten Studien wurden teilweise unterschiedliche Parameter untersucht, die einen Einfluss auf die akademische Leistung haben. Während in einigen Untersuchungen zum Beispiel die Konzentrationsleistung über entsprechende Tests analysiert wurde, haben sich andere Forschergruppen auf die Lesefähigkeit oder das Verhalten der Schüler konzentriert. Wenige Studien haben neben Tests auch Umgebungsvariablen dokumentiert, die einen Einfluss auf die akademische Leistung haben und sich über Licht beeinflussen lassen. In nachstehender Tabelle sind die Parameter aufgeschlüsselt, die während der Studien mit aufgenommen und wie häufig diese innerhalb der herangezogenen Publikationen verwendet wurden.

Tabelle 1: Verteilung der verwendeten und gemessenen Parameter innerhalb der durchgeführten Studien.

KSS	d2	ZVT	Lesen	Aktivität	Verhalten	Lärm
3	6	2	6	2	5	2

Diese Parameter lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe beinhaltet die aktiv an einem Schüler messbaren Auswirkungen auf die Konzentrationsleistung, Lesefähigkeit und generell Aufnahmefähigkeit. Die zweite Gruppe umfasst Einflussfaktoren, welche die Aufnahmefähigkeit einschränken oder ablenkend wirken.

Für die erste Gruppe sind folgende Parameter in den Studien verwendet:

Die Karolinska Sleepiness Scale (KSS) ist eine Schläfrigkeitsskala, die den Grad der Müdigkeit zum dem Zeitpunkt erfasst, an dem dieser Test ausgefüllt wird.

Der d2-Test ist ein Konzentrationsleistungstest bei dem aus 658 kleinen Buchstaben (p und d) mit Strichen oberhalb oder unterhalb diejenigen „d“ mit insgesamt zwei Strichen – darüber oder darunter – in einem bestimmten Zeitintervall markiert werden müssen. Falsch markierte Zeichen oder vergessene relevante „d“ werden als Fehler gewertet. Über diesen Test lässt sich ein Wert für die Konzentrationsleistung bestimmen.

Der Zahlenverbindungstest (ZVT) ist ähnlich dem d2-Test ein Konzentrationsleistungstest bei dem es darum geht innerhalb einer vorgegebenen Zeit die Zahlen auf einem Blatt möglichst schnell, fehlerfrei in aufsteigender Reihenfolge zu verbinden.

Für das Leseverständnis wurden innerhalb der Studien unterschiedliche Leseverfahren eingesetzt. Dabei ging es hauptsächlich um das fehlerfreie Lesen, so wie die Lesegeschwindigkeit.

Die zweite Gruppe sind indirekte Verhaltensparameter, die die akademische Leistung beeinflussen.

Aktivität umfasst dabei die Unruhe innerhalb einer Klasse, dabei geht es um aktive Körperbewegung (zappeln auf dem Platz) während von den Schülern aufmerksames Zuhören gefordert wird. Diese Messungen wurden teilweise mit Aktigraphen oder per Videoanalyse durchgeführt.

Das Verhalten der Schüler in Bezug auf ihr prosoziales Verhalten wurde ebenfalls über eine Videoanalyse von Experten, als auch über die Aussage der Lehrkraft beurteilt. Ebenfalls untersucht wurde der Gemütszustand der Schüler.

Als Umgebungsvariable wurde in einigen Studien Lärm bestimmt. Dabei wurde die Lautstärke in der Klasse subjektiv durch die Lehrkraft beurteilt.

4 Kategorisierung von Lichteffekten in akademischer Umgebung

Die Wirkung von Licht auf die akademische Leistung lässt sich in drei Kategorien unterteilen. Einmal in solche Effekte die unmittelbar auftreten sobald die entsprechende Beleuchtung angeschaltet wird, solche Effekte die erst nach einer länger andauernden Exposition ihre Effekte zeigen und jene Effekte die eine Person nicht direkt betreffen sondern indirekt über die Umgebung einen Einfluss auf die akademische Leistung nehmen.

4.1 Effekte erster Ordnung

Positiv beeinflussende Effekte auf die akademische Leistung die unmittelbar nach einschalten der entsprechenden Beleuchtung auftreten, können als Effekte erster Ordnung bezeichnet werden. Sie betreffen eine Person direkt und sind oftmals nur für die Dauer der Exposition wirksam. Bereiche in denen Effekte erster Ordnung zum Tragen kommen sind zum Beispiel Prüfungssituationen bei denen eine auf die Prüfungssituation abgestimmte Beleuchtung aktiviert wird. Sie äußern sich zum Beispiel durch konzentriertes Arbeiten.

4.2 Effekte zweiter Ordnung

Langfristig wirkende Effekte können als Effekte zweiter Ordnung bezeichnet werden. Sie wirken zusätzlich zu Effekten erster Ordnung. Effekte zweiter Ordnung sind zum Beispiel ein gefestigter circadianer Rhythmus. Sie wirken oftmals erst nach einer längeren Expositionsdauer.

4.3 Effekte dritter Ordnung

Anders als die Effekte erster und zweiter Ordnung, die direkt auf eine Person einwirken, lassen sich Effekte dritter Ordnung als jene definieren, die auf die unmittelbare Umgebung einen Einfluss nehmen und dadurch auf die akademische Leistung einwirken. Beispiele für Effekte dritter Ordnung wären Unruhe und Lärm im Klassenraum. Dementsprechend sind Effekte dritter Ordnung auf andere Personen wirkende Effekte erster und zweiter Ordnung.

5 Beschriebene Ergebnisse nicht-visueller Wirkungen von Licht bezüglich der akademischen Leistung und α -opische Bewertung

Eine systematische Bewertung der Studien bezüglich der nicht-visuellen Wirkung von Licht auf die akademische Leistung lässt sich durch die unterschiedlich erhobenen Parameter nur bedingt durchführen. Teilweise ist auch eine Bewertung innerhalb eines Parameters schwierig, da die Testbedingungen nicht standardisiert waren und sich je nach Studie unterscheiden. Jedoch können über eine Umrechnung der angegebenen korrelierten Farbtemperatur und der Beleuchtungsstärke α -opische Kennzahlen berechnet werden. Hierzu wurde ein Excel-Tool verwendet, das im Rahmen des EU-Projektes „ssl-erate : Lighting for people“ weiterentwickelt wurde und frei zur Verfügung gestellt wird. Die melanopische Bewertung und ein Vergleich der Studien sind somit in ausreichendem Maß möglich.

5.1 Aufmerksamkeit / Müdigkeit

Der Grad der Wachheit wurde über die Karolinska Sleepiness Scale erfasst. In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich erhöhte Intensität und Farbtemperatur positiv auf die Wachheit der Versuchspersonen auswirkt [1-3]. Dieser positive Effekt tritt unmittelbar auf und kann daher als Effekt erster Ordnung gewertet werden. In einer Studie wurde der folgende Tag ebenfalls mit untersucht und es konnte gezeigt werden, dass die mittlere Müdigkeit ebenfalls geringer war als die zuvor aufgenommene Baseline [3]. Demzufolge kann auch von einem Effekt zweiter Ordnung ausgegangen werden.

5.2 Konzentrationsleistungstest

Für die Bestimmung der Konzentrationsleistung wurden unterschiedliche, validierte Testverfahren verwendet. Die Verwendung des d2-Test in einem Großteil der Studien erlaubt es hier einen Vergleich vorzunehmen und zeigt, dass sowohl akute, als auch längerfristige Exposition mit höheren Intensitäten und erhöhten Farbtemperaturen die Konzentrationsleistung erhöhen, beziehungsweise die Anzahl gemachter Fehler reduzieren kann. Ein ähnlicher Trend ist für den ZVT ebenfalls zu entnehmen [4-9].

5.3 Lesefähigkeit

Der Vergleich der Lesefähigkeit stellt sich durch die unterschiedlichen verwendeten Testverfahren und Bedingungen als schwierig heraus. Dennoch kann für eine bessere Lesegeschwindigkeit und ein besseres Leseverständnis ein allgemeiner Trend für höhere Beleuchtungsstärken und Farbtemperaturen angenommen werden [4, 6, 8-11].

5.4 Aktivität

Es wurde untersucht, ob sich bestimmte Beleuchtungsszenarien dafür eignen, die motorische Unruhe in einem Klassenzimmer zu reduzieren. In einer Feld- und einer Laborstudie konnte gezeigt werden, dass vor allem die Zeit, die benötigt wird, damit sich die Schüler beruhigen, deutlich reduziert werden konnte. Bezüglich der absoluten Reduktion der motorischen Unruhe zeigt nur die Feldstudie deutliche Unterschiede zwischen Experimental und Kontrollgruppe zugunsten einer blauangereicherten Beleuchtung. Im Laborsetup erreicht die Kontrollgruppe verspätet ähnliche Werte wie die Experimentalgruppe [8, 9].

5.5 Verhalten

In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich aggressives und pro-soziales Verhalten, sowie die Fähigkeit sich auf eine Aufgabe langfristiger zu konzentrieren, durch tageslichtäquivalente Beleuchtung positiv beeinflussen lassen. Eine Erhöhung der Intensität und Farbtemperatur wirkt sich außerdem weiterhin positiv auf depressive Stimmungslage und das allgemeine Wohlbefinden aus. Eine Bewertung der Studien ist aufgrund unterschiedlicher Erhebungsmethoden nicht sinnvoll [1, 8, 9, 12-14].

5.6 Lärm

Die Lärmentwicklung zeigt in den Studien keine Korrelation zu den untersuchten Beleuchtungsszenarien. Daher scheint die Wirkung von Licht hier wenig Einfluss zu haben [2, 7].

6 Weitere Einflussfaktoren und Konfounder

Neben den in Tabelle 1 genannten Parametern wurden teilweise noch andere Parameter wie Raumtemperatur oder der CO₂-Gehalt mit aufgenommen. Für die Untersuchungen, die diese Einflussfaktoren nicht mit gemessen haben, muss angenommen werden, dass diese Parameter konstant gehalten wurden. Diese durch Licht nicht beeinflussbaren bauphysikalischen Parameter sind ebenfalls maßgeblich bestimmend für die Varianz der Leistungsfähigkeit. Bei der Konzeption von Studien und der räumlichen Ausgestaltung oder der Dokumentation der Testumgebung ist es daher wichtig solche Einflussfaktoren mit zu berücksichtigen. Leider ist die Lärmentwicklung nur in wenigen Studien mit aufgenommen worden, sehr oft sind die aktuelle Raumtemperatur und der CO₂-Gehalt der Luft unter Testbedingungen nicht dokumentiert. Es kann daher nicht bewertet werden, ob sich der Lärmpegel in den Studien, die sich auch mit Unruhe beschäftigt haben, durch die Beleuchtung reduziert hat. Ebenso sind die Variationen, die sich durch schlechte Luft oder ungünstige Temperaturbedingungen ergeben, starke Konfounder.

Ein häufiger systematischer Fehler sind Lerneffekte, die über die Zeit auftreten. So schneiden Schüler bei einem d2-, oder ZVT-Test beispielsweise besser ab, je öfter sie die Tests durchführen. Bei nur zweimaliger Durchführung (pre und post) ist dieser systematische Fehler sehr hoch. Eine weitere Herausforderung kann die Bildung der Kontroll- beziehungsweise Experimentalgruppe darstellen. Die Klassen sollten idealerweise über die gleiche durchschnittliche Leistungsstärke verfügen, um das Ergebnis im Vorfeld nicht bereits positiv oder negativ zu beeinflussen. Auch das Alter der Schüler beeinflusst die Ergebnisse mancher Tests und sollte daher kritisch betrachtet werden. Ebenso muss hinterfragt werden, ob die besseren Testergebnisse nicht alleine durch bessere Erkennung der Zeichen über eine höhere Beleuchtungsstärke zustande kommen, die im Gegensatz zu den Kontrollbedingungen vorlagen. Bei gleichzeitiger Variation von Beleuchtungsstärke und korrelierter Farbtemperatur sollten die Ergebnisse visuell anspruchsvoller Tests bezüglich aktueller Sehstärke und Transmission (Brillenträger) korrigiert werden.

7 Zusammenfassung

Auch wenn es aufgrund der Studienlage noch nicht möglich ist Aussagen mit hoher wissenschaftlicher Evidenz zu treffen, sind jedoch Empfehlungen aus den bewerteten Studien zu künstlicher Beleuchtung und akademischer Leistung durchaus zu extrahieren. International wird zur Beschreibung nicht-visueller Wirkungen die α -opische Bewertung über

Strahlungsgrößen vorgeschlagen [15]. Die melanopische Bewertung scheint aus der Studienlage am besten geeignet nicht-visuelle Wirkungen zu beschreiben. Um für die Lichttechniker passende lichttechnische Bewertungsmaßstäbe zur Verfügung zu stellen, wurde in Deutschland die tageslichtäquivalente melanopische Beleuchtungsstärke als Parameter für die nicht-visuellen Wirkungen von Licht vorgeschlagen [16]. Durch die untersuchten Publikationen ist wissenschaftlich belegt, dass Raumbelichtung während des Vormittages mit höheren Intensitäten und Farbtemperaturen positive Auswirkungen auf die akademische Leistung haben kann. Über melanopisch bewertete lichttechnische Größen wird eine bessere Vergleichbarkeit erreicht und es können auch Leitlinien zum Einsatz von Licht in Schulen definiert werden.

8 Literatur

1. Goel, N. and G.R. Etwaroo, *Bright light, negative air ions and auditory stimuli produce rapid mood changes in a student population: a placebo-controlled study*. Psychol Med, 2006. **36**(9): p. 1253-63.
2. Rautkylä, E., et al., *Effects of correlated colour temperature and timing of light exposure on daytime alertness in lecture environments*. Journal of Light & Visual Environment, 2010. **34**(2): p. 59-68.
3. Teixeira, L., et al., *Exposure to bright light during evening class hours increases alertness among working college students*. Sleep Med, 2013. **14**(1): p. 91-7.
4. Barkmann, C., N. Wessolowski, and M. Schulte-Markwort, *Applicability and efficacy of variable light in schools*. Physiol Behav, 2012. **105**(3): p. 621-7.
5. Keis, O., et al., *Influence of blue-enriched classroom lighting on students' cognitive performance*. Trends in Neuroscience and Education, 2014(0).
6. Mott, M.S., et al., *Illuminating the Effects of Dynamic Lighting on Student Learning*. SAGE Open, 2012. **2**(2).
7. Slegers, P., et al., *Lighting affects students' concentration positively: Findings from three Dutch studies*. Lighting Research and Technology, 2013. **45**(2): p. 159-175.
8. Wessolowski, N., C. Barkmann, and M. Schulte-Markwort, *Wirksamkeit von dynamischem Licht im Schulunterricht*. HAMBURG: UNIVERSITY OF HAMBURG-EPPENDORF, 2009.
9. Wessolowski, N., M. Schulte-Markwort, and C. Barkmann, *Laborstudie zur Replizierung der Wirksamkeit von dynamischem Licht im Schulunterricht*. 2010.
10. Govén, T., et al. *The Influence of Ambient Lighting on Pupils in Classrooms-Considering Visual, Biological and Emotional Aspects as well as Use of Energy*. in *Adjunct Proceedings*. 2010.
11. Heschong, L., et al., *Daylighting impacts on human performance in school*. Journal of the Illuminating Engineering Society, 2002. **31**(2): p. 101-114.
12. Grangaard, E.M., *Color and Light Effects on Learning*. 1995.
13. Küller, R. and C. Lindsten, *Health and behavior of children in classrooms with and without windows*. Journal of Environmental Psychology, 1992. **12**(4): p. 305-317.
14. Schulman, M., *The effects of full spectrum lighting on the distractibility of elementary school learning disabled children*. 1989, s.n. .; S.I. p. 1 online resource (ix, 124 p.).
15. CIE, *Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry, 2013*. 2015: http://www.cie.co.at/index.php?i_ca_id=978. p. 39.
16. DIN, *DIN SPEC 5031-100:2015 Optical radiation physics and illuminating engineering - Part 100: Non-visual effects of ocular light on human beings - Quantities, symbols and action spectra*, in 2015, Beuth Verlag.

Circadiane Beleuchtung – Planungspraxis auf Basis der aktuellen Regelwerke und Planungsempfehlungen

Dipl.-Ing. (FH) M. Boeser, licht raum stadt planung GmbH, Wuppertal

Problemstellung

Die Planung circadianer Beleuchtungsanlagen fordert als neues Aufgabengebiet Lichtplaner zu einer Erweiterung ihrer Kompetenzen. Aus den Ergebnissen von Grundlagenforschung und Studien sind Regelwerke und Planungsempfehlungen entwickelt worden (DIN SPEC 5031-100; DIN SPEC 67600), die ein System von Bewertungsgrößen und Verfahren zur Festlegung von Anforderungen an spezifische Gütemerkmale definieren sowie Anwendungsempfehlungen formulieren. Die Ermittlung der Beleuchtungsanforderungen erfolgt in einem komplexen Verfahren. Dieses erfordert entsprechend der Definition der Kenngrößen über eine spektrale melanopische Wirkungsfunktion eine spektrale Betrachtung von Lichtquellen und Materialien (z.B. Raumbooberflächen) sowie die Berücksichtigung der altersbedingten physiologischen Veränderungen der visuellen und nichtvisuellen Wahrnehmung. Für die konkrete Anwendung muss der Fachplaner zunächst klären, welche Wirkung durch die Beleuchtung erzielt werden soll (in enger Abstimmung mit dem medizinischen Fachpersonal) und ein geeignetes Beleuchtungskonzept zur technischen Umsetzung bestimmen. Aus den spektralen Eigenschaften der eingesetzten Lichtquellen sind unter Berücksichtigung der konkreten Altersstruktur der Klientel Schwellwerte für sichere melanopische Wirksamkeit bzw. Vermeidung melatonin-unterdrückender Wirkung zu ermitteln. Weiter muss für die beabsichtigte Wirkung ein Profil des zeitlichen Verlaufs von Intensität und Spektrum definiert und daraus die Anforderungen an die erforderliche Steuerung abgeleitet werden. Damit unterscheidet sich die Planung circadianer Beleuchtung grundlegend von der konventioneller Beleuchtungslösungen. Eine fachgerechte Lichtplanung muss darüber hinaus das Erreichen der geforderten nichtvisuellen Wirkung gewährleisten, ohne aber die Anforderungen an visuelle Wirkung und gestalterischen Anspruch zu vernachlässigen.

Ziel des Beitrages

An einem konkreten Projekt-Beispiel – der Planung einer circadianen Beleuchtungsanlage für eine Wohneinrichtung von Menschen mit dementiellen Erkrankungen im Rahmen des BMBF geförderten Forschungsprojekts „Silverlighting“ – wird der gesamte Planungsprozess auf Basis der aktuellen Regelwerke und Planungsrichtlinien bis zur Realisierung dargestellt. Sowohl das Verfahren als auch die Ergebnisse werden diskutiert und bewertet.

Beschreibung der Innovation / »best practice«

Der Vortrag beschreibt ein Beispiel von „best practice“ im Sinne der Darstellung eines praxisorientierten, gangbaren Weges bei der Planung einer circadianen Beleuchtungsanlage, der zwischen den theoretischen Grundlagen und Vorgaben der Regelwerke sowie den Randbedingungen der praktischen Realisierung vermittelt. Abweichend von Anlagen in klinischen oder Labor-Situationen wurde die circadiane Beleuchtung im Bestand realisiert und umfasst alle Bereiche der Wohngruppen.

Circadian lighting – Planning practice based on current standards and design guidelines

Dipl.-Ing. (FH) M. Boeser, licht raum stadt planung GmbH, Wuppertal / Germany

Issue

Designing circadian lighting facilities requires designers to enhance their competences on this new field of action. Findings from fundamental research and studies promoted drafting design guidelines and standards (DIN SPEC 5031-100; DIN SPEC 67600). A system of assessment criteria, a procedure for determining specific quality requirements and recommendations for practical applications were defined. Evaluating the lighting requirements results from a complex method which is referring to the parameters of the melanopic action spectrum of light sources and material properties (for e.g. ambient surfaces). Further age related, physiological changes of visual and non-visual perception have to be taken into consideration. In practical terms the consultant first has to sort out the targeted effect of the lighting (in agreement with the medical expert staff) in order to develop a suitable lighting concept for technical implementation. This concept has to take the spectral properties of the used light sources and the related age pattern of the clients into account for selecting the right threshold value which provides a reliable melanopic efficacy respectively prevents melatonin-suppression. A time-dependent profile of the lighting intensity and spectrum is then being defined and resulting requirements for the control system are laid out. Therefore planning circadian lighting is fundamentally different from conventional lighting design. A professional lighting design has to guarantee achieving the non-visual effects while maintaining the requirements of visual effects and creative ambition.

Aim

By means of a practical example - the design of circadian lighting facilities for a home for elderly people suffering dementia as part of a research program supported by the federal ministry of education and sciences (BMBF) called "Silverlighting" – the complete planning process up to realization and based on the current guidelines and standards will be portrayed. Methods and results will be discussed and evaluated.

Description of the innovation / »best practice«

The talk describes an example of "best practice" in terms of presenting a practicable way of planning a circadian lighting system, within the theoretical principles and guidelines as well as site conditions of a real project scenario. Differing from a clinical or laboratory setting this project is being realized in an existing building and comprises all areas of the living community.

Level of realization

The detailed design (lighting facilities, infrastructure and control management) has been finalized in 2015, lighting equipment was installed in 2016 and the installation is in operation since July 2016.

Ansätze zur Optimierung des Binnings weißer LEDs?

Bieske, K.; Michl, J.; Stubenrauch, N.; Schierz, Ch., Technische Universität Ilmenau; Frohnapfel, A., Zumtobel Lighting GmbH; Wilm, A., OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Problemstellung und Forschungsfragen

Untersuchungen haben gezeigt, dass standardisierte Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 und 1964 bei LED-Spektren zu Metamerie-Brüchen führen können, trotz messtechnisch gleicher Farbörter (Metamerie) werden Lichtfarbenunterschiede erkannt. Basierend auf umfangreichen Arbeiten mit LED-Spektralkombinationen für weiße LED-Lichtfarben gibt es von POLSTER Vorschläge für neue Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° und 2006-TUIL-10°. Bieten diese Funktionen Ansätze zur Optimierung des Binnings von LED?

Stand der Wissenschaft/Technik

Standard für die farbmetrische Messung von LED und das LED-Binning sind die CIE-1931-Normspektralwertfunktionen. Je nach Spektralverteilung sind für weiße LED mit identischen Farbkoordinaten für visuelle Gleichheit der Lichtfarben Farbraumfehler bis zu $\Delta u'v' = 0,0165$ von POLSTER beschrieben worden. Die Farbdiskriminationsschwelle für weiße LED-Lichtfarben liegen nach KRAMER zwischen $\Delta u'v' = 0,0004$ bis $\Delta u'v' = 0,0018$. Die beobachteten Lichtfarbenunterschiede sind zum Teil deutlich auffällig und führen in praktischen Anwendungen zu nicht akzeptierbaren Farbunterschieden.

Forschungshypothesen

Die neu vorgeschlagenen Spektralwertfunktionen nach POLSTER modellieren die Farbwahrnehmung von weißen LED-Lichtquellen in praxisrelevanten Anwendungen bei Leuchten besser und führen zu weniger Metamerie-Brüchen. Altersabhängige Veränderungen des Auges müssen bei der Modellierung der Farbwahrnehmung berücksichtigt werden.

Versuchsaufbau

Basierend auf der Simulation möglicher Variationen im Spektrum durch den Herstellungsprozess wurden LED-Typen bezüglich Metamerie-Brüche ausgewählt, gefertigt und messtechnisch charakterisiert. 10 LED-Typen wurden in Lichtboxen mit einer Streuscheibe und in handelsübliche Strahler verbaut und visuell durch 20 jüngere (< 35 Jahre) und 20 ältere (> 60 Jahre) Probanden hinsichtlich der Lichtfarbenunterschiede bei direkter und indirekter Beobachtung bewertet. Die gemessenen Spektralverteilungen wurden mit verschiedenen Spektralwertfunktionen verrechnet, Farbabstände zwischen den unterschiedlichen LED-Typen bestimmt und mit den visuellen Urteilen der Probanden verglichen. Altersbedingte Änderungen der Farbwahrnehmung wurden mit betrachtet.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Erste Ergebnissen deuten darauf hin, dass die Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/2006-TUIL-10° die Farbwahrnehmung zum Teil besser modellieren als dies mit dem standardisierten Verfahren möglich ist. Derzeit sind die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen und umfänglich ausgewertet.

Approaches to optimize the Binning of white LEDs?

Bieske, K.; Michl, J.; Stubenrauch, N.; Schierz, Ch., Technische Universität Ilmenau; Frohnapfel, A., Zumtobel Lighting GmbH; Wilm, A., OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Research Issues

Studies have revealed inconsistency of metamerism. Large colour differences are perceived between LEDs even though the colour coordinates are identical when the colour-matching functions of the CIE standard of 1931 and of 1964 are used for the calculations. On the basis of numerous colour matching experiments POLSTER has suggested new colour matching functions (2006-TUIL-2° and 2006-TUIL-10°). Do these serve to model human perception better? Might they be a means of optimising the binning of white LEDs?

State of the Art

Currently, the colour-matching functions of the CIE standard observer of 1931 are the standard for general colorimetry and for the binning of white LEDs. POLSTER found colour differences between visually matched LED spectra and the results of calculations based on the CIE 1931 colour-matching functions up to $\Delta u'v' = 0.0165$. KRAMER investigated which differences in luminous colours are just noticeable. The threshold values he found are in the range between $\Delta u'v' = 0.0004$ and $\Delta u'v' = 0.0018$. In some cases, the visible differences in luminous colour are so clearly perceptible that users find them unacceptable.

Hypotheses

The colour-matching functions recommended by POLSTER are more successful in modelling the perception of luminous colours of white LEDs in common use, so that less inconsistency arises due to metamerism. Age-related changes in the human eye must be taken account of in the modelling procedure for variation in how appearance is perceived.

Experimental Setup

Having used simulation to establish the possibility of variation in the spectral distribution due to the manufacturing procedure, we selected 10 LED types which were likely to be relevant in a study of inconsistency of metamerism, had them manufactured and then characterised them by colorimetry. We fitted them into luminaires and in boxes with diffusers. They were then evaluated by 20 young (< 35 years) people and 20 older (> 60 years) people, who rated the luminous colour differences they perceived in the 23 LED-combinations tested. The measured spectral distributions were weighted in respect of the different colour-matching functions, the colour coordinates were determined and the colour difference for each combination of LEDs was calculated. Besides comparing the calculated colour differences with the subjective ratings of the participants in the experiment, we also focused on the changes in colour perception attributable to ageing.

Results

Initial indication is that the colour-matching functions recommended by POLSTER model colour perception better than the standard procedure used to date. The investigations are continuing and the results are being analysed in detail.

Ansätze zur Optimierung des Binnings weißer LEDs?

Bieske, K.¹; Michl, J.¹; Stubenrauch, N.¹; Schierz, Ch.¹; Frohnapfel, A.²; Wilm, A.³

¹Technische Universität Ilmenau; ²Zumtobel Lighting GmbH; ³OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Dr.-Ing. Karin Bieske, TU Ilmenau, Fak. MB, FG Lichttechnik, PF 100565 98684 Ilmenau

Zusammenfassung

Das bisherige Binning-Verfahren für LEDs basiert auf den CIE-1931-Normspektralwertfunktionen. Jedoch zeigen sich in der Praxis trotz messtechnisch gleicher Farbörter zum Teil deutliche Lichtfarbenunterschiede. Von POLSTER sind neue Spektralwertfunktionen vorgeschlagen worden, die die Farbwahrnehmung besser modellieren. Im Laborversuch wurden ausgewählte LED-Typen in realitätsnahen Aufbauten dargeboten und von Probanden bewertet. Der Vergleich der subjektiven Probandenbewertung mit den rechnerischen Farbabständen $\Delta u'v'$ liefert eine Aussage über die Eignung der untersuchten Spektralwertfunktionen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Spektralwertfunktionen 2006-TUIL die Farbwahrnehmung zum Teil besser modellieren als dies mit dem standardisierten Verfahren möglich ist.

1 Einleitung und Stand der Wissenschaft

LEDs (Licht emittierende Dioden) haben sich in vielen Bereichen der Beleuchtungstechnik etabliert. Dabei werden oft mehrere LEDs in einem Beleuchtungssystem verbaut. Wesentlich für die Qualität der Beleuchtung ist ein homogenes Erscheinungsbild in Leuchtdichte und Lichtfarbe innerhalb und zwischen Leuchten. Toleranzen im Herstellungsprozess und im Betrieb von LEDs führen zu Varianzen in Spektralverteilung und Lichtfarbe [1]. Deren Kontrolle macht eine fotometrische und farbmetrische Charakterisierung und Klassifizierung (Binning) der LEDs erforderlich. Standard für die farbmetrische Messung von LEDs und das LED-Binning sind die CIE-1931-Normspektralwertfunktionen [2].

In Untersuchungen zeigten sich jedoch Schwierigkeiten bei der Modellierung der Farbwahrnehmung auf Basis der standardisierten Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 und 1964. Trotz messtechnisch gleicher Farbörter werden Lichtfarbenunterschiede erkannt [3],[4]. Je nach Spektralverteilung sind für weiße LED mit identischen Farbkoordinaten bewertet mit den Normspektralwertfunktionen 1931 für visuelle Gleichheit der Lichtfarben Farbraumfehler bis zu $\Delta u'v' = 0,0165$ von POLSTER beschrieben worden [5]. Die Farbdiskriminationsschwelle für weiße LED-Lichtfarben liegen nach KRAMER zwischen $\Delta u'v' = 0,0004$ bis $\Delta u'v' = 0,0018$ [6]. Die beobachteten Lichtfarbenunterschiede sind zum Teil deutlich auffällig und führen in praktischen Anwendungen zu kritisierten Farbunterschieden.

Basierend auf umfangreichen Arbeiten mit LED-Spektralkombinationen für weiße Lichtfarben gibt es von POLSTER Vorschläge für neue Spektralwertfunktionen: 2006-TUIL 2° und 2006-TUIL 10° [5]. Wenn durch diese Spektralwertfunktionen die Farbwahrnehmung von LED-Lichtquellen verlässlicher beschreibbar ist, bieten diese Ansätze zur Optimierung des Binnings von LED.

Die Farbwahrnehmung wird durch viele Faktoren beeinflusst. Neben dem Sehobjekt selbst und den Beobachtungsbedingungen, spielen individuelle Unterschiede zwischen Beobachtern eine Rolle. Eigenschaften der Linse und der Schicht des Makulapigments, die Dichte des Photopigments sowie die Anzahl und Verteilung der Rezeptoren in der Retina variieren zwischen Personen [7],[8]. Interindividuelle Unterschiede sowie altersabhängige Bewertungen liegen nahe und werden in Auswertung der Untersuchung mit betrachtet.

2 Forschungshypothesen

Ziel der Untersuchung ist es, unterschiedliche Spektralwertfunktionen auf ihre Eignung für die Modellierung der Farbwahrnehmung zu testen. Dabei wird von folgenden Hypothesen ausgegangen:

1. Die neu vorgeschlagenen Spektralwertfunktionen nach POLSTER modellieren die Farbwahrnehmung von weißen LED-Lichtquellen in praxisrelevanten Anwendungen bei Leuchten besser.
2. Bei der Bewertung von Lichtfarbenunterschieden zeigen sich Unterschiede in Abhängigkeit vom Alter.

3 Untersuchungen

Basierend auf der Simulation möglicher Variationen im Spektrum durch den Herstellungsprozess für weiße leuchtstoffkonvertierte LEDs mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von $CCT = 4000$ K wurden LED-Typen bezüglich ihrer Farbortunterschiede bei Verwendung unterschiedlicher Spektralwertfunktionen ausgewählt, gefertigt und messtechnisch charakterisiert. Dabei wurden die Normspektralwertfunktionen CIE 1931 und CIE 1964, die Spektralwertfunktionen CIE 2006 2° und 10° , sowie die von POLSTER vorgeschlagenen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL 2° und 2006-TUIL 10° einbezogen [9],[10],[5]. Außerdem wurden auf Grundlage von CIE 170-1 Spektralwertfunktionen für ein Alter von 60 Jahren berechnet [10]. Ausgewählt wurden solche Spektren, die in den Bewertungssystemen verschiedene Lichtfarbenunterschiede vorhersagen. Zehn unterschiedliche LED-Typen konnten gefertigt werden und wurden vom Hersteller für unterschiedliche Betriebsbedingungen charakterisiert. Diese wurden in praxisnahe Versuchsaufbauten integriert. Anhand von Probandenurteilen werden die Vorhersagen überprüft.

3.1 Versuchsaufbau

Die LED-Typen wurden in Lichtboxen mit einer Streuscheibe (Lichtaustrittsfläche $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$) und in handelsübliche Strahler (ZUMTOBEL VIVO L LED) verbaut. Den Versuchsaufbau für beide Situationen zeigt Abb. 1.

In einem Laborraum ($l = 6,6 \text{ m}$, $b = 4,2 \text{ m}$, $h = 2,8 \text{ m}$) werden jeweils zwei benachbarte Lichtboxen vor einer beleuchteten Projektionswand ($2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$) den Probanden in einer Entfernung von $1,7 \text{ m}$ dargeboten. Dies entspricht einer Beobachterfeldgröße von 10° . Die Beobachterposition ist über eine Kopfstütze fixiert. Das Umfeld ($\approx 40^\circ$) wird über Leuchten mit Leuchtstofflampen ($CCT = 3500 \text{ K}$, angepasst an die resultierende ähnlichste Farbtemperatur der Lichtboxen) mit einer mittleren Leuchtdichte von $L = 200 \text{ cd/m}^2$ gleichmäßig beleuchtet.

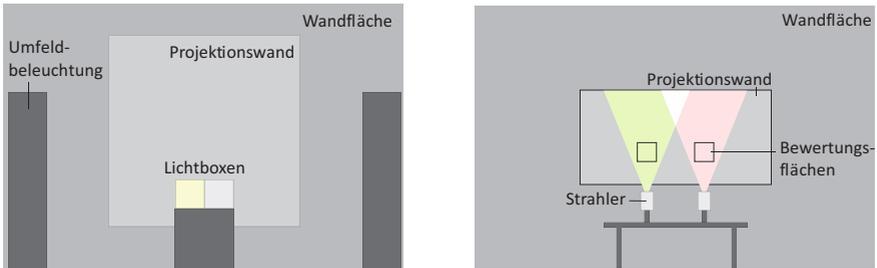


Abb. 1: Schema der Versuchsaufbauten im Laborraum für die Beurteilung der Lichtfarbenunterscheide an Lichtboxen links und zur Bewertung der Strahler rechts

In umfangreichen Messungen wurden Einflüsse der Lichtboxen auf Spektralverteilung der LED, Homogenität, zeitliche Stabilität und Reproduzierbarkeit der Lichtfarbe untersucht und optimiert. Innerhalb der Lichtbox wurden die Gleichmäßigkeit für die Leuchtdichte und die Lichtfarbe an 15 Messpunkten gemessen. Verwendet wurden dafür die Leuchtdichte- und Farbmesskamera LMK 98-4 color (TechnoTeam) sowie das Spektralradiometer CS 2000A (Minolta). Die Lichtboxen weisen Leuchtdichten von $L = 800 \pm 93 \text{ cd/m}^2$ ($MW \pm \sigma$) auf. Die Standardabweichung um den Mittelwert des Farborts beträgt $\Delta u' = \pm 0,0003$ und $\Delta v' = \pm 0,0005$. Zwischen benachbarten Boxen lagen die Unterschiede in der Leuchtdichte bei maximal $\Delta L = 56 \text{ cd/m}^2$ (7%). Grenzen sind durch die Ansteuerung über das DALI-Protokoll gegeben.

Die Bewertung der Strahler erfolgt innerhalb des Lichtkegels auf einer Projektionsfläche, die mit mattweißem, aselectivem Canson-Papier bezogen ist. Die Leuchten sind dabei vertikal ausgerichtet und beleuchten die Projektionsfläche von unten. Die Beobachterentfernung der Probanden beträgt 1,3 m. Das Bewertungsfeld je Strahler (200 mm x 200 mm) ist für eine Beobachterfeldgröße von 10° definiert und auf der Projektionsfläche markiert. Es wurde so gewählt, dass störende Inhomogenitäten innerhalb der Bewertungsfläche vermieden werden. Durch den graduellen Verlauf sind sie tolerierbar. Die Messwerte innerhalb der Bewertungsfelder liegen bei Leuchtdichten von $L = 350 \pm 60 \text{ cd/m}^2$ ($MW \pm \sigma$) und streuen für die Farbkoordinaten um $\Delta u' = \pm 0,0002$ $v' = \pm 0,0008$. Der maximal zwischen zwei Strahlern auftretende Leuchtdichteunterschied liegt bei $\Delta L = 11 \text{ cd/m}^2$ (3%).

3.2 Probanden

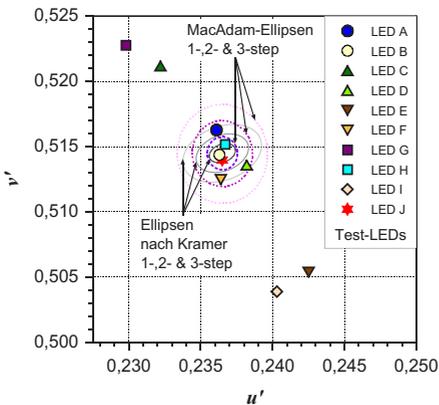
An der Untersuchung nahmen 40 Probanden, darunter 20 Frauen teil. Die Gruppe setzt sich aus 20 jüngeren (< 35 Jahre) und 20 älteren (> 60 Jahre) Personen zusammen. Die Probanden wurden vorab auf Farbtüchtigkeit und Sehschärfe geprüft. Personen mit ausgeprägten Augenkrankheiten (z.B. grauer Star) und früheren Augenoperationen (z.B. Einsatz einer künstlichen Linse) wurden von der Untersuchung ausgeschlossen.

3.3 Methode

Den Probanden wurden 23 LED-Kombinationen je Versuchssituation in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Einzelne Kombinationen wurden für die Erfassung der Reproduzierbarkeit der Bewertungen wiederholt getestet. Es werden diejenigen Kombinationen geprüft, die nach dem bisherigen Binning-Verfahren keinen oder nur einen kleinen Farbabstand

aufweisen dürften. Außerdem werden alle weiteren Kombinationen untersucht, die bei Bewertung mit einer anderen Spektralwertfunktion einen kleinen Farbunterschied vorher-sagen.

Zur Bestimmung des resultierenden Farborts der Lichtboxen und der mit den Strahlern beleuchteten Flächen wurde jeweils der Messwert im Mittelpunkt der Bewertungsfläche verwendet. Abb. 2 zeigt die Verteilung der Farbortkoordinaten in der UCS $u'v'$ -Farbtafel auf Grundlage der Normspektralwertfunktionen CIE 1931. Zur Orientierung sind die MacAdam-Ellipsen und die 2015 an der TU Ilmenau bestimmten Ellipsen nach KRAMER [6] eingezeichnet. Das bisherige Binning-Verfahren orientiert sich üblicherweise an 3-Step MacAdam-Ellipsen. Die Farbörter der LED-Typen B, H und J befinden sich innerhalb der 1-Step-Ellipsen. Die Lichtfarben dieser Typen sollten voneinander nicht unterscheidbar sein. Für ausgewählte Kombinationen sind die berechneten Farbabstände $\Delta u'v'$ beispielhaft für unterschiedliche Spektralwertfunktionen und Altersgruppen in der Tabelle neben der Abbildung zusammengefasst.



Farbabstand $\Delta u'v'$ für ausgewählte LED- Kombinationen auf Grundlage unterschiedlicher Spektralwert-funktionen und Altersgruppen nach [5],[9]

LED-Kom-bination	CIE 1931	2006-TU11 10°	2006-TU11 10° 60 Jahre
BH	0,0009	0,0016	0,0007
BJ	0,0005	0,0084	0,0056
HJ	0,0012	0,0100	0,0058
GJ	0,0111	0,0019	0,0048
FJ	0,0015	0,0022	0,0021
AB	0,0019	0,0013	0,0011

Abb. 2: Farbörter der Lichtboxen in der UCS $u'v'$ -Farbtafel auf Grundlage der Normspektralwertfunktionen CIE 1931. Außerdem eingezeichnet: MacAdam-Ellipsen und Ellipsen nach KRAMER [6] mit Ellipsenschwerpunkt im Mittelwert der Farbortkoordinaten der verwendeten LED-Typen B, H und J (links) und berechnete Lichtfarbenunterschiede $\Delta u'v'$ für ausgewählte LED- Kombinationen (rechts)

Der Farbabstand wurde für die getesteten Kombinationen nach Gleichung (1) bestimmt:

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

Jede Kombination der Lichtfarbe wurde von den Probanden anhand der Bewertungsskala (Abb. 3) bewertet.

0	1	2	3	4	5	6	7	8
kein Unterschied		gerade erkennbar		kleiner Unterschied		großer Unterschied		sehr großer Unterschied

Abb. 3: Skala zur Bewertung der gesehenen Lichtfarbenunterschiede

4 Ergebnisse

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrags waren die Untersuchungen nicht abgeschlossen, sodass sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine endgültigen Ergebnisse darstellen lassen. Abb. 4 und Abb. 5 zeigen erste Resultate. Dargestellt sind Mittelwerte (MW) und Standardabweichung (σ) für die subjektiven Bewertungen der Lichtfarbenunterschiede für die untersuchten Lichtfarbenkombinationen in den Lichtboxen und bei den Strahlern für 11 Probanden. Die dargestellten Trendlinien basieren auf den Bewertungen aller Probanden für alle LED-Kombinationen (nicht auf den Mittelwerten). Darauf beziehen sich auch die angegebenen Bestimmtheitsmaße R^2 .

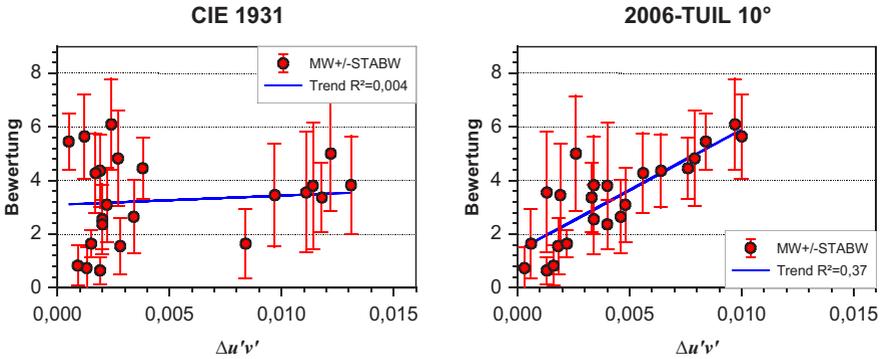


Abb. 4: Subjektiv wahrgenommene Lichtfarbenunterschiede zwischen den Lichtboxen beurteilt nach Bewertungsskala in Abb. 3, (MW \pm σ , 11 Probanden)

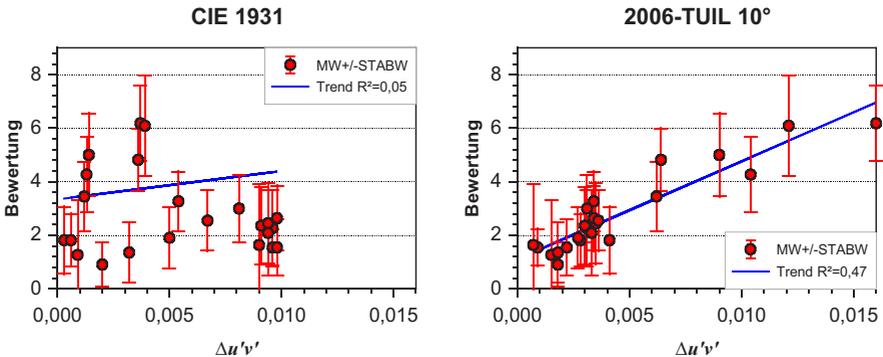


Abb. 5: Subjektiv wahrgenommene Lichtfarbenunterschiede zwischen den Bewertungsflächen der Strahler beurteilt nach Bewertungsskala in Abb. 3, (MW \pm σ , 11 Probanden)

Beschreibt die verwendete Spektralwertfunktion die Farbwahrnehmung hinreichend korrekt, ist zu erwarten, dass mit größer werdenden Farbabstand $\Delta u'v'$, der subjektiv wahrgenommene Farbunterschiede und damit die Bewertung ansteigt. Erwartet wird eine hohe Korrelation der Daten.

Die ersten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Spektralwertfunktionen 2006-TUIL 10° die Farbwahrnehmung in realitätsnahen Versuchsaufbauten für weiße leuchtstoffkonver-

tierte LED-Lichtquellen zum Teil besser modellieren als dies mit dem standardisierten Verfahren nach CIE 1931 möglich ist. Aussagen über den Alterseinfluss in der Untersuchung sind bisher nicht möglich, da die Daten zu diesem Aspekt noch nicht analysiert wurden.

5 Zusammenfassung

Zum jetzigen Stand der Auswertung wird von der Bestätigung der These 1 ausgegangen. Auf Basis des bisherigen Binning-Verfahrens sind auffällige Lichtfarbenunterschiede trotz ähnlicher Farbörter für die LED-Auswahl in der Anwendung nicht auszuschließen.

Die Untersuchung fand in enger Zusammenarbeit mit den Praxispartnern OSRAM Opto Semiconductors GmbH und Zumtobel Lighting GmbH statt und wurde im Rahmen des Projektes UNILED II (Förderkennzeichen: 13N13395) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.



6 Literaturverzeichnis

- [1] Krückeberg, J.: HochleistungsLEDs in der Praxis. Franzis Verlag. 2007.
- [2] ANSI_NEMA_ANSLG C78.377-2008. American National Standard for Electric Lamps. Specifications for the chromaticity of solid state lighting products; 2008.
- [3] Bieske, K.; Csuti, P.; Schanda, J.: Colour appearance of metameric lights and possible colorimetric description CIE Expert Symposium on Visual Appearance Paris 2006.
- [4] Csuti, P.; Schanda, J.: Colour Matching Experiments with RGB-LEDs. In: Color Research and Application 33 (2008), S. 108-112.
- [5] Polster, S.: Neue Spektralwertfunktionen für die korrekte Bewertung von LED-Spektren und Einführung eines Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit. Dissertation TU Ilmenau. Der Andere Verlag. 2014.
- [6] Kramer, G.: Farbdiskrimination - Ein empirischer Ansatz für die Gruppierung weißer LEDs. Dissertation TU Ilmenau. Der Andere Verlag. 2014.
Kramer, G., Schierz, Ch.: Color discrimination subject to illuminant and color transition. Color Research and Application (2015), DOI: 10.1002/col.21979.
- [7] Stockman, A.; Sharpe, L.: Cone spectral sensitivities and color matching. In: Gegenfurtner, K. (Hrsg.); Sharpe, L. (Hrsg.): Color vision: from genes to perception. Cambridge University Press, 1999, S. 53–87.
- [8] Webster, M.; MacLeod, D.: Factors underlying differences in the color matches of normal observers. In: Journal of the Optical Society of America A 5 10 (1988), S. 1722–1735.
- [9] Deutsches Institut für Normung: Farbmeterik - Teil 1. CIE farbmeterische Normalbeobachter. DIN EN ISO 11664-1, Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- [10] Commission Internationale de L'eclairage: Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes. Technical Report CIE 170-1:2006. Wien. 2006.

Weiß? Minimierung der sichtbaren Farbtönigkeit bei verschiedenen Lichtfarben und Adaptationszuständen

Tralau, B., Zumtobel Lighting GmbH; Schierz, Ch., Technische Universität Ilmenau

Problemstellung und Forschungsfragen

Farbtemperaturvernderliche Leuchten werden oftmals durch die Mischung zweier Lichtfarben hinter einem Diffusor realisiert. Auf Grund der additiven Farbmischung beider Lichtquellen kommt es in der Normfarbtafel zu einer Abweichung vom Planckschen Kurvenzug, was oftmals mit einer sichtbaren Farbtönigkeit einhergeht. Da zudem die Variation entlang des Planckschen Kurvenzugs für verschiedene Lichtquellen wie z.B. der LED nicht wahrnehmungsgetreu weiß ist, stellt sich die Frage in welchem Farbbereich idealerweise die Farbtemperatur verändert werden sollte, um eine Sichtbarkeit einer Grün- und Violett-Farbtönung zu minimieren und so die Nutzerakzeptanz bei der Kombination verschiedener Lichtquellen zu maximieren.

Stand der Wissenschaft/Technik

Untersuchungen von *REA 2013* haben gezeigt, dass Farbörter mit weniger sichtbarer Farbtönigkeit für warmweiße Lichtfarben unterhalb des Planckschen Kurvenzugs liegen, im tageslichtweien Bereich aber darüber.

Forschungshypothesen

Zur Optimierung des Variationsbereiches der Farbtemperatur bei Leuchten, sowie deren Kombination untereinander ist die Definition eines Farbbereiches mit minimal sichtbarer Farbtönigkeit bei verschiedenen Farbtemperaturen und Adaptationszuständen notwendig. Eine sichtbare Farbtönigkeit, vor allem bei der Kombination mehrerer Leuchten, führt zu einer geringeren Akzeptanz in der Praxis.

Versuchsaufbau

Für die Untersuchungsreihe wurden fünf Boxen auf Blickhhe in einem Laborraum aufgestellt. Die Boxen sind jeweils mit einer in der Farbtemperatur, im Farbort und im Lichtspektrum variablen LED Beleuchtung ausgestattet. Die Umgebungsbeleuchtung ist ebenfalls in der Farbtemperatur variabel. Für verschiedene Lichtfarben und Adaptationszustnde wird jeweils die Farbtönigkeit von rein weiß bis stark grün oder violett bestimmt.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Die Ergebnisse zeigen ähnlich wie in den Untersuchungen von *REA* Abweichungen von Plank für warmweiße Farbtemperaturen, wenn auch mit nicht so starker Ausprägung. Für tageslichtweie Lichtfarben konnte eine Abweichung nicht nachgewiesen werden. Generell ist die Sichtbarkeit einer Farbtönung abhängig vom Adaptationszustand und führt bei Variation der Lichtfarbe zu einer verminderten Akzeptanz.

Weiß? Minimierung der sichtbaren Farbtönigkeit bei verschiedenen Lichtfarben und Adaptationszuständen

Tralau, B., Zumtobel Lighting GmbH; Schweizerstr. 30, 6850 Dornbirn, AT
Schierz, Ch., TU Ilmenau, FG Lichttechnik; Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau, DE

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie zeigt in welchem Farbbereich idealerweise die Farbtemperatur variiert werden sollte, so dass die sichtbare Grün- oder Violett-Farbtönigkeit der Lichtquelle minimiert wird und damit die Nutzerakzeptanz von farbtemperaturdynamischer Beleuchtung steigt.

1 Problemstellung und Forschungsfragen

Farbtemperaturveränderliche Leuchten werden oftmals durch die Mischung zweier Lichtfarben hinter einem Diffusor realisiert. Auf Grund der additiven Farbmischung beider Lichtquellen kommt es in der Normfarbtafel zu einer Abweichung vom Planckschen Kurvenzug, was oftmals mit einer sichtbaren Farbtönigkeit einhergeht. Da zudem die Variation entlang des Planckschen Kurvenzugs für verschiedene Lichtquellen wie z.B. der LED nicht wahrnehmungsgetreu weiß ist, stellt sich die Frage in welchem Farbbereich idealerweise die Farbtemperatur verändert werden sollte, um die Sichtbarkeit einer Grün- oder Purpur-Farbtönung zu minimieren und so die Nutzerakzeptanz bei der Kombination verschiedener Lichtquellen zu maximieren.

2 Stand der Wissenschaft

Untersuchungen von REA 2013 /1/ haben gezeigt, dass Farbörter mit geringer sichtbarer Farbtönigkeit für warmweiße Lichtfarben unterhalb des Planckschen Kurvenzugs liegen, im tageslichtweißen Bereich aber darüber (siehe Abb.1).

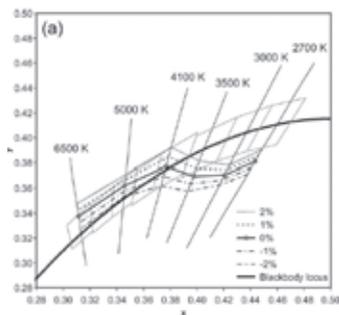


Abb. 1: Ergebnis der Untersuchung von REA 2013 in der CIE 1931 Normfarbtafel. Angaben in Prozent bezeichnen den wahrgenommenen Buntanteil.

3 Forschungshypothesen

Zur Optimierung des Variationsbereiches der Farbtemperatur bei Leuchten, sowie deren Kombination untereinander ist die Definition eines Farbbereiches mit minimal sichtbarer Farbtönigkeit bei verschiedenen Farbtemperaturen und Adaptationszuständen notwendig. Eine sichtbare Farbtönigkeit, vor allem bei der Kombination mehrerer Leuchten, führt zu einer geringeren Akzeptanz in der Praxis.

4 Methodik

4.1 Versuchsaufbau

Für die Untersuchungsreihe wurden fünf Boxen auf Blickhöhe in einem Laborraum aufgestellt (Abb. 2). Die Boxen haben eine Grundfläche von 60x60cm und sind 60cm hoch.



Abb. 2: Aufbau des Laborraumes

Die Boxen sind jeweils mit einer in der Farbtemperatur, im Farbort und im Lichtspektrum variablen LED Beleuchtung von TeleLumen (USA) ausgestattet. Die Beleuchtung ist hinter eine 30cm hohen Blende versteckt und leuchtet die Box durch einen zusätzlichen Diffusor gleichmäßig aus. Die Umgebungsbeleuchtung ist ebenfalls in der Farbtemperatur variabel, so dass unterschiedliche Adaptationszustände realisiert werden können.

4.2 Versuchspersonen

An der Untersuchung nahmen 19 Versuchspersonen im Alter von 25-56 Jahren teil. Davon waren 15 männlich und 4 weiblich. Neben einer Einweisung in den Versuchsablauf wurden in einer Voruntersuchung persönliche Daten aufgenommen, sowie die Eignung der Person (z.B. auf Farbtüchtigkeit) geprüft. Auch die bevorzugte Lichtfarbe am Arbeitsplatz wurde erfragt.

4.3 Durchführung

Die Studie gliedert sich in fünf Untersuchungsreihen.

In der 1. Untersuchungsreihe wurden 7 Farborte entlang der Juddschen Geraden sechs Mal (3-mal ohne Hintergrundbeleuchtung, 3-mal mit Hintergrundbeleuchtung in der gleichen ähnlichsten Farbtemperatur) in unterschiedlicher Reihenfolge in den Boxen dargeboten. Der Durchgang wurde für die 4 ähnlichsten Farbtemperaturen 3000K, 4000K, 5000K und 6000K wiederholt. Die Probanden beurteilten jeweils, welche Box am ehesten Weiß erscheint und sortierten die anderen Boxen nach Grad ihrer Farbtönung.

Die 2. Untersuchungsreihe galt der Verifizierung der Ersten, nur wurden die Farborte diesmal nacheinander in einer Box dargeboten. Die Probanden stufen unmittelbar nach dem Umschalten, sowie nach 45 Sekunden Adaptationszeit den Grad der Farbtonung auf einer Skala von 0 („rein Weiß“) bis 100 („reiner Farbton“) ein.

Die Farbörter für die 4 ähnlichsten Farbtemperaturen aus den ersten beiden Untersuchungsreihen, die jeweils als ‚reinstes Weiß‘ bezeichnet wurden, wurden in der 3. Untersuchungsreihe mehrfach in unterschiedlicher Reihenfolge, mit und ohne Hintergrundbeleuchtung in den jeweiligen Farbtemperaturen den Probanden dargeboten. Die Versuchspersonen beurteilten erneut, welche Box am ehesten Weiß erscheint und welchen Grad der Farbtonung die anderen Boxen hatten.

Für die Farbtemperaturen, bei denen das ‚reinste Weiß‘ nach Probandenurteil vom Planckschen Kurvenzug abweicht, wurden in der 4. Untersuchungsreihe auf dem Planckschen Kurvenzug die ähnlichsten Farben gesucht. Dafür wurde eine Box mit dem Farbort des ‚reinsten Weiß‘ beleuchtet, die Lichtfarbe der benachbarten Box wurde auf Planck in 150K Farbtemperatur-Schritten variiert. Die Versuchspersonen beurteilten, bei welchem Farbort sich die beiden Boxen am Ähnlichsten sind.

In der 5. Untersuchungsreihe wurde der Bereich rund um das ‚reinste Weiß‘ aus Untersuchungsreihe 3 gesucht, bei dem gerade noch keine Farbtonung sichtbar ist. Dafür wurde der Farbort in einer Schrittweite von $\Delta xy=0,05$ in 4 Achsrichtungen variiert. Die Probanden beurteilten, ab wann eine sichtbare Farbtonung auftrat.

5 Ergebnisse

5.1 Wahrnehmung und Akzeptanz von Farbtonungen bei verschiedenen Lichtfarben

Die Untersuchungsreihen 1 und 2 zeigen für 3000K und 4000K eine Abweichung des Farbortes mit der geringsten Farbtonung vom Planckschen Kurvenzug.

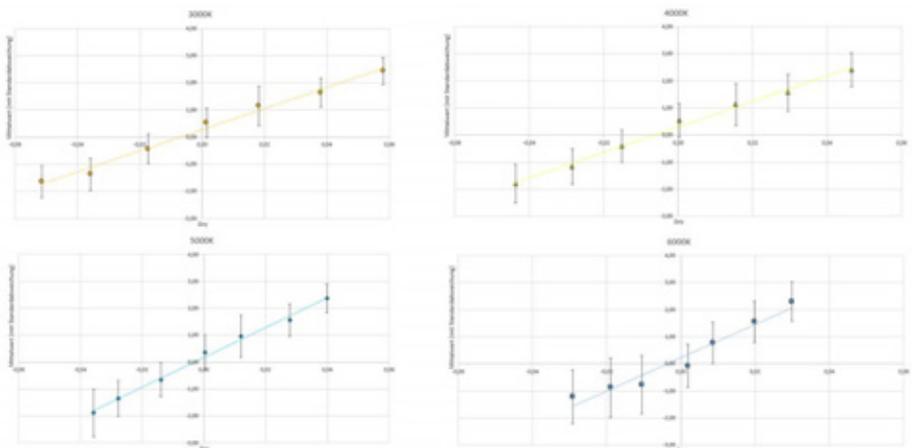


Abb. 3: Die Diagramme zeigen die Mittelwerte der subjektiven Bewertung und ihre Streuung in Relation zum xy-Farbabstand vom Planckschen Kurvenzug

Die Farborte liegen, wie Abb.3 und Abb.4 zeigen, für eine Bewertung von 0 leicht unterhalb von Planck (3000K: $\Delta xy = -0,01$; 4000K: $\Delta xy = -0,009$). Der Abstand entspricht von der Größe her ungefähr einem 3-fachen MacAdam-Abstand (nicht wahrnehmungsgetreu gleichabständig). Bei 5000K und 6000K liegt der Farbort mit der geringsten sichtbaren Farbtonung nahezu auf dem Planckschen Kurvenzug (5000K: $\Delta xy = -0,003$; 6000K: $\Delta xy = -0,0008$).

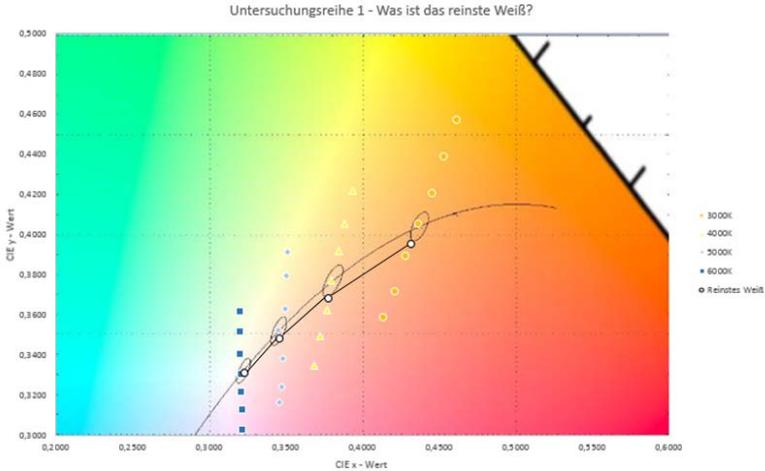


Abb. 4: Die Grafik zeigt für die vier untersuchten Farbtemperaturen (7 Farborte entlang der Juddschen Geraden - farbige Punkte mit weißem Rand) die Lage der Farborte, die als reinstes Weiß gewählt wurden (weiße Kreise mit schwarzem Rand). Zusätzlich sind der Plancksche Kurvenzug und 3-Step MacAdam-Ellipsen für die untersuchten Farbtemperaturen dargestellt

In der 3. Untersuchungsreihe wurde beim direkten gegenseitigen Vergleich der vier als ‚reinstes Weiß‘ beurteilten Farborte derjenige mit der ähnlichsten Farbtemperatur 5000K als am Häufigsten im 1. Rang der geringsten sichtbaren Farbtonung gesehen (siehe Abb. 5.).

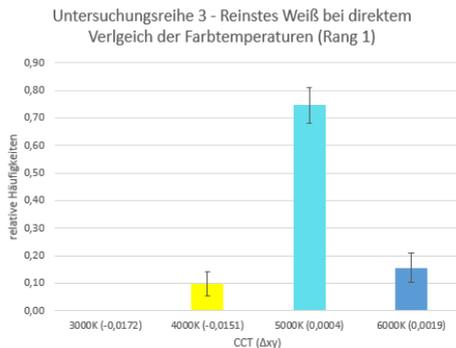


Abb. 5: Häufigkeit der Nennung ‚reinstes Weiß‘ (Rang 1) der Farbtonung für die 4 ähnlichsten Farbtemperaturen im Vergleich zueinander

5.2 Minimierung des Bereiches der sichtbaren Farbtonung für weißes Licht

Aus der Untersuchungsreihe 5 lässt sich der Bereich ableiten in dem noch keine sichtbare Farbtonung wahrgenommen wird. Die Untersuchungsreihe wurde für die ähnlichste Farbtemperatur 5000K durchgeführt, da diese sich aus Untersuchungsreihe 3 als der Farbort der geringsten Farbtonigkeit ergeben hat.

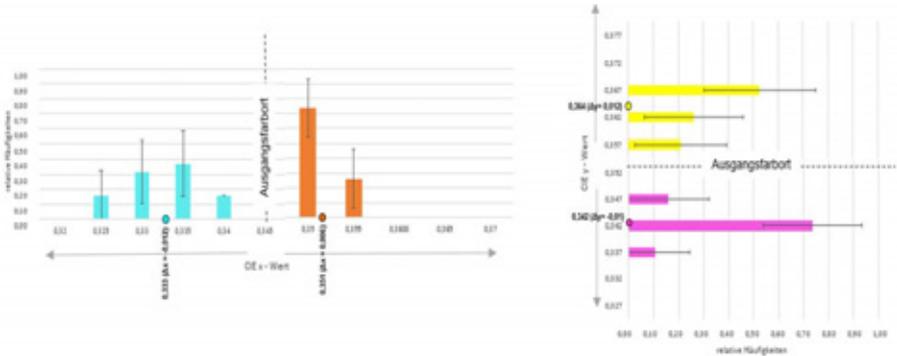


Abb. 6: Die Balkendiagramme zeigen für die untersuchten Farbabstände die Häufigkeit, dass noch keine Farbtonigkeit wahrgenommen wurde für die Farbtemperatur 5000K in x- (links) und y-Richtung (rechts). Das gewichtete Mittel ist jeweils als farbiger Punkt dargestellt.

Abbildung 6 zeigt die relativen Häufigkeiten und die Vertrauensintervalle für die dargebotenen Farborte in alle 4 Variationsrichtungen. Stellt man das Ergebnis als gewichtetes Mittel in der xy-Farbtabelle dar, ergibt sich annähernd eine Ellipse (siehe Abb. 7).

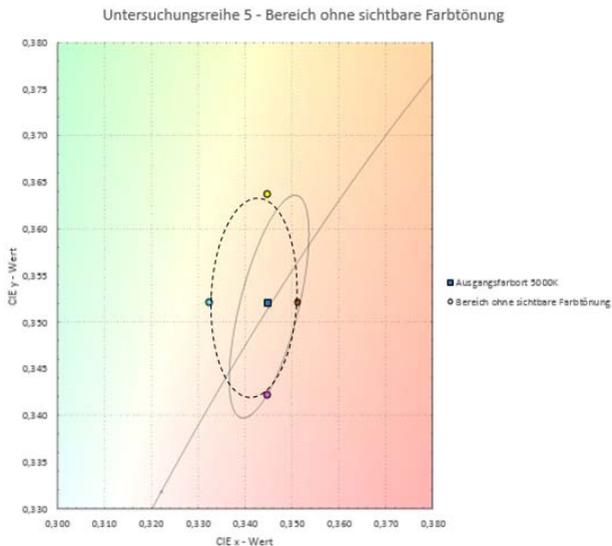


Abb. 7: Das Diagramm zeigt ausgehend für den Farbort 5000K auf Planck die MacAdam 5-Step Ellipse (durchgezogene Linie) und die aus der Untersuchungsreihe resultierende Ellipse (gestrichelt) dargestellt

5.3 Bestimmung der auf dem Planckschen Kurvenzug liegenden ähnlichsten Farbtemperatur für den idealen Weißpunkt

Die Farborte der geringsten Farbtönigkeit bei 3000K und 4000K lag leicht unterhalb des Planckschen Kurvenzuges. Für sie wurde in der Untersuchungsreihe 4 der ähnlichste Farbort auf dem Planckschen Kurvenzug liegend gesucht. Abbildung 8 zeigt die relativen Häufigkeiten und die Vertrauensintervalle der von den Versuchspersonen genannten ähnlichsten Farbe auf dem Planckschen Kurvenzug.

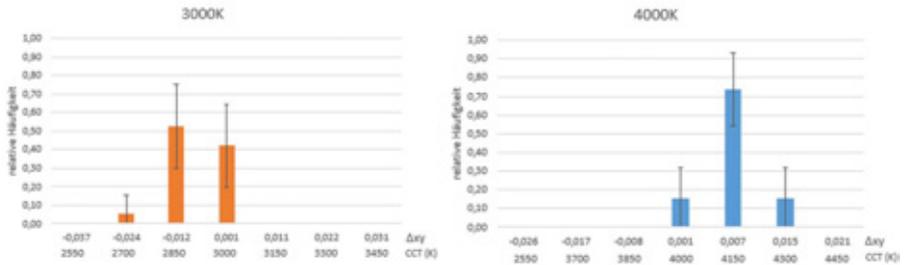


Abb. 8: Die Balkendiagramme stellen die relativen Häufigkeiten der mit den als ‚reinstes Weiß‘ am ähnlichsten wahrgenommenen Farben auf dem Planckschen Kurvenzug dar.

Das Äquivalent des Farbortes der geringsten Farbtönigkeit für die ähnlichste Farbtemperatur von 4000K liegt auf Planck bei 4150K ($\Delta xy=0,007$). Verbindet man die Punkte mit einer Geraden ergibt sich eine leichte Drehung gegenüber der Juddschen Geraden, wie bisher bekannt. Bei der ähnlichsten Farbtemperatur von 3000K ist das Ergebnis nicht eindeutig. Die häufigsten Nennungen lagen im Bereich von 2850K und 3000K auf dem Planckschen Kurvenzug. Eine feinere Auflösung der Schrittweiten würde hier Aufschluss bringen. Die Daten werden in Zukunft noch weiter ausgewertet und die Abweichungen auf Signifikanz geprüft.

6 Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen ähnlich wie in den Untersuchungen von REA Abweichungen von Plank für warmweiße Farbtemperaturen, wenn auch mit nicht so starker Ausprägung. Für tageslichtweiße Lichtfarben konnte eine Abweichung nicht nachgewiesen werden. Als ‚reinstes Weiß‘ wurde der Farbort von 5000K auf dem Planckschen Kurvenzug empfunden. Falls in der Praxis keine sichtbare Farbtonung gewünscht ist, sollte der Farbort nicht von dem Bereich $x=0,333-0,351$ und $y=0,342-0,64$ abweichen.

In wie weit die Sichtbarkeit der Farbtonung vom Adaptationszustand abhängt und wann es zu einer Verminderung der Akzeptanz kommt muss in weiteren Auswertungen und Untersuchungen geprüft werden.

/1/ Rea, M., „Value Metrics for better lighting“, SPIE Press, Bellingham, Washington, USA (2013)

Wahrnehmungsunterschiede zwischen Licht- und Körperfarben

David Ruland / CUT GmbH Ingenieurbüro für Licht, Medien, Design / Heidelberg

Problemstellung und Forschungsfragen

Eine Vielzahl von Untersuchungen im Lichtbereich zeigen auf, dass der Mensch rötliches Licht als entspannend und beruhigend empfindet. Bläuliches Licht wird im Gegensatz als aktivierend empfunden. Bei den Körperfarben, schreibt man diesen Farben genau das Gegenteil zu. Wie kann es zu diesen unterschiedlichen Aussagen kommen? Unter welchen Bedingungen ist der Mensch in der Lage zwischen einer Licht- und einer Körperfarbe zu unterscheiden?

Stand der Wissenschaft/Technik

Die Aussagen zur emotionalen Bewertung der nicht visuellen Wirkung des Lichts, stehen erkennbar im Widerspruch zu den Aussagen der Farbtherapie und des Farbdesigns. Dennoch ist diese Inkompatibilität an der Disziplinen-Schnittstelle bislang nicht wissenschaftlich untersucht worden. Durch die an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften und Kunst (HAWK) Hildesheim, vertretenen Kompetenzfelder Farbdesign und Lichtdesign, konnte dies erstmalig geschehen.

Forschungshypothesen

Der Mensch ist nicht in der Lage zwischen einer Körperfarbe und einer Lichtfarbe zu unterscheiden, wenn kein Kontext vorhanden ist. Sobald sich der Kontext erhöht, wird auch der wahrgenommene Unterschied größer.

Versuchsaufbau

Zwei 1m x 1m große Farbtafel, wurden vor einer schwarzen Wand in einem Schwarzen Raum abgependelt. Die linke Platte war weiß gestrichen und wurde mit einem RGBW Wallwasher beleuchtet. Die rechte Platte konnte ausgetauscht werden und es wurde in unterschiedlicher Reihenfolge, verschiedene Farbplatten mit einem 4000 K Wallwasher beleuchtet. In der Mitte wurden die Farbtafeln durch eine 1 m x 1 m große, schwarze Platte getrennt. Sie vermied, das Streulicht von der einen zur anderen Platte gelangt. Die Lichtfarbe wurde auf die Körperfarbe eingestellt und die Probanden sollten die beiden Platten anhand eines Fragebogens bewerten. Jeder Proband wurde zu vier Farben mit jeweils vier Farbnuancen und jeweils 3 Situationen (ohne Kontext, wenig Kontext, viel Kontext) befragt.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Ein Ergebnis war, dass wir nicht eindeutig zwischen einer Licht- und einer Körperfarbe unterscheiden können, wenn kein Kontext vorhanden ist. Da eine solche Studie bislang nicht durchgeführt wurde, gibt es keine mir bekannten Vergleiche.

Gedächtnisfarben Teil I: Vergleich chinesischer und deutscher Probanden

Sebastian Fischer¹, Peter Bodrogi¹, Tran Quoc Khanh¹, Yuteng Zhu², Lihao Xu², Xiaoyu Liu^{2,3}, Guihua Cui⁴, and M. Ronnier Luo^{2,5}

¹Laboratory of Lighting Technology, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany

²State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, China

³College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, China

⁴School of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, China

⁵School of Design, University of Leeds, Leeds, United Kingdom

Problemstellung und Forschungsfragen

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Untersuchung des regionalen und kulturellen Einflusses auf die Bewertung von Gedächtnisfarben. Es wird ein Vergleich zwischen chinesische und deutschen Probanden durchgeführt.

Stand der Wissenschaft/Technik

Für zahlreiche Anwendungen im Bereich der Beleuchtung und Bilderzeugung (z.B. Shop- und Museumsbeleuchtung, in Film- und TV-Studio etc.) ist ein tiefgreifendes Verständnis darüber, wie Menschen Gedächtnisfarben bewerten und beurteilen, extrem wichtig. Um hervorragende Ergebnisse zu erzielen, müssen eventuell auftretende, kulturelle Unterschiede berücksichtigt werden.

Forschungshypothesen

Das Ziel dieser Forschung ist es daher, eine Methodologie zu entwickeln, mit deren Hilfe sich auf relativ einfache Art und Weise die Bewertung von Gedächtnisfarben im internationalen Vergleich untersuchen lässt.

Versuchsaufbau

In einem vollständig dunklen Raum wurden den Probanden 22 wohlvertraute Objekte (z.B. Banane, blauer Himmel, Hautfarben etc.) in Form von homogenen Farbpatches auf einem optimal kalibrierten LCD Monitor präsentiert. Über eine grafische Benutzeroberfläche konnten die Probanden den Farbeindruck des jeweiligen Farbpatches so lange variieren, bis dieser ihrer Vorstellung für das jeweilige Objekt entsprach. In beiden Ländern wurde das Experiment mit exakt demselben Versuchsaufbau durchgeführt. Insgesamt nahmen 25 chinesische und 44 deutsche Probanden an der Untersuchung teil.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Um kulturelle Unterschiede herauszuarbeiten wurden im CIELAB Raum die Farbzentren der Bewertungen der beiden Probandengruppen berechnet. Darüber hinaus wurde die Streuung der Probandenbewertungen untersucht. Die Resultate zeigen, dass die Streuung bei der Bewertung von Gedächtnisfarben innerhalb einer Probandengruppe im Normalfall wesentlich größer ist als der durch den Abstand der Farbzentren des jeweiligen Objektes definierte kulturelle Unterschied. Im Vergleich zu früheren Arbeiten basierend auf Fotografin realer Objekte konnte eine größere Streuung der Bewertungsergebnisse festgestellt werde. Weitere signifikante Unterschiede bei der Interpretation der Ergebnisse werden in der Langfassung diskutiert.

Memory Colors Part I: Comparison of Chinese and German Observers

Sebastian Fischer¹, Peter Bodrogi¹, Tran Quoc Khanh¹, Yuteng Zhu², Lihao Xu², Xiaoyu Liu^{2,3}, Guihua Cui⁴, and M. Ronnier Luo^{2,5}

¹Laboratory of Lighting Technology, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany

²State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, China

³College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, China

⁴School of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, China

⁵School of Design, University of Leeds, Leeds, United Kingdom

Research issue

A display-based experiment was conducted to investigate the effect of memory colors in an intercultural context comparing Chinese and German observers.

State of science/technology

A deep understanding of how humans assess memory colors is extremely important for various lighting and image applications, such as color and image reproduction as well as image enhancement. Potentially occurring cultural differences have to be considered for obtaining best results – a topic which has barely been discussed in the present literature.

Research hypothesis

The aim of this study, therefore, is to establish a methodology to study memory colors across different countries and cultures based on homogeneous color patches.

Experimental setup

For the experiment, 22 familiar object colors were chosen (e.g., banana, blue sky, skin colours etc.), each of which was presented to the observers on a well-calibrated wide gamut LED backlight display under controlled experimental conditions in a darkened room. A graphical user interface had been developed and was applied for the observers to match the homogeneous patch colors shown on the display through object-specific descriptors with their memory colors. In both countries, the experiment was carried out with exactly the same equipment, which had been shipped from Germany to China and vice versa. Throughout the whole experiment, each memory color was assessed by a total number of 25 Chinese and 44 German observers.

Results in comparison with previous findings

The corresponding color centers in CIELAB space were calculated to determine the cultural differences. In addition, inter-observer variability was analysed in CIELAB color space in terms of the mean of color differences from the mean (MCDM) and by calculating chromatic tolerance ellipses. Results indicate that the cross-cultural differences in the assessment of the memory colors are smaller than the inter-observer variations within each group. Compared to previous studies of memory colors based on real object images, the present results show significant differences but also larger observer variability.

Memory Colors Part I: Comparison of Chinese and German Observers

Sebastian Fischer¹, Peter Bodrogi¹, Tran Quoc Khanh¹, Yuteng Zhu², Lihao Xu², Xiaoyu Liu^{2,3}, Guihua Cui⁴, and M. Ronnier Luo^{2,5}

¹Laboratory of Lighting Technology, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany

²State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, China

³College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, China

⁴School of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, China

⁵School of Design, University of Leeds, Leeds, United Kingdom

Summary

A deep understanding of how humans assess memory colors is extremely important for various lighting and imaging applications, such as color and image reproduction as well as image enhancement (e.g., in film and TV-studios, in professional and home cinema applications, in shop and museum lighting). Potentially occurring cultural differences have to be considered for obtaining best results – a topic which has barely been discussed in the present literature. The aim of this study, therefore, is to establish a methodology to study memory colors across different countries and cultures based on homogeneous color patches. As a prove of concept, results of Chinese and German observers will be presented and compared. The inter-observer variability was analyzed in CIELAB color space in terms of the mean of color differences from the mean (MCDM) and by calculating chromatic tolerance ellipses. Results indicate that the inter-observer variability in the assessment of the memory colors is strongly context-dependent and twice as large as the inter-group variations. Hence, no significant differences in the overall assessment could be found between Chinese and Germans.

1 Introduction

In psychology, the term “memory color” has been known since the late 19th century. Following the definition of Hering [1], it describes “the color in which we have most consistently seen the external object” and which, therefore, is “indelibly impressed on our memory”. In other words, the term “memory color” is used to describe the color appearance an individual observer has in mind when thinking of or looking at certain familiar objects, i.e., objects that are frequently visually experienced in the course of a lifetime. Even though this creates a relatively stable but also very personal standard on how the color of familiar objects should look like for the individual observer, memory colors of different observers are typically more general in their characteristics as one might expect at first glance [2]. Hence, a deep understanding of how humans assess memory colors can be extremely important for various lighting and imaging applications, such as color and image reproduction as well as image enhancement.

First experiments aiming to quantify the human assessment of memory colors were conducted by Newhall and Pugh [3] in 1947 and by Bartleson [4] in 1960. Both experiments investigated the memory colors of familiar objects (e.g., green grass, skin, red brick, blue sky,...) using a large number of Munsell color patches which were presented to the observers under controlled experimental conditions. The results of both experiments indicate that

memory colors often tend to be exaggerated towards the typical or dominant hues commonly associated with these objects, i.e., the color of grass is recalled greener, the color of a brick is recalled redder, etc. than their average measured colors [5, 6]. Furthermore, the data showed a tendency of the memory colors to appear more saturated than the actual object colors, an overall trend which has been confirmed in various subsequent experiments [2, 7-11].

However, none of these studies considered cultural variations or influences regarding the assessment of memory colors. In 2005, Tarczali *et al.* [12] were the first to address this topic by providing a comparative study of Korean and Hungarian observers. In their work, they examined six important long-term memory colors (both Caucasian and Oriental skin, green grass, blue sky, foliage, orange, and banana) in the viewing situation of a self-luminous color monitor, revealing significant differences between the Korean and the Hungarian assessments.

In order to further investigate the influence of cross-regional or cross-cultural differences on the assessment of memory colors, Smet *et al.* [13] examined 11 familiar objects across 7 different countries (Belgium, Hungary, Brazil, Colombia, Taiwan, China and Iran) using color-processed images which, in each country, were presented to the observers on calibrated monitors. Even though their results indicate a significant statistical difference in the assessment of memory colors between different cultures, Smet *et al.* stated that regional and cultural impact is likely to be of no practical importance due to large inter-observer variability.

Although, memory colors are considered to be of major importance in color reproduction [2, 10, 14-16] and color rendering [17-19] applications, Refs. [12] and [13] are the only two publications found in the literature that additionally deal with cross-cultural variations. Therefore, the aim of the present study is to further extend this research topic by establishing a display-based methodology using homogeneous color patches which easily allows to study memory colors in an inter-cultural context across various countries.

For the experiment, 22 familiar object colors were chosen (e.g., banana, blue sky, skin colors etc.), each of which was presented to the observers on a well-calibrated wide gamut LED backlight display under controlled experimental conditions in a darkened room. A graphical user interface had been developed and was applied for the observers to match the homogeneous patch colors shown on the display through object-specific descriptors with their memory colors.

The results reported in this paper are based on the assessments of 25 Chinese and 44 German observers. For each of the 22 test objects inter-observer variability was analyzed in CIELAB color space in terms of the mean of color differences from the mean (MCDM) and by calculating chromatic tolerance ellipses. In addition, a comparison with the results of Smet *et al.* will be presented.

2 Experimental Setup

Since we attempt to establish a methodology for studying memory colors which can easily be adopted by various laboratories all over the world, a display-based approach using homogeneous color patches has been favored. For the experimental setup, we used an Eizo CG277 wide gamut LED backlight display offering excellent color reproduction properties, high resolution (2,560 x 1,440 pixels) and a good contrast ratio (1,000:1). It was installed in

a fully darkened room in order to guarantee that the display is the only light source and to avoid distracting reflections on the display. Afterwards, the monitor was carefully calibrated with its correlated color temperature (CCT) close to the CIE D_{65} white point and colorimetrically characterized using the well-known gain-offset-gamma (GOG) model developed by Berns [20]. Further details on the calibration and characterization procedure, the selection of the familiar objects defining the memory colors, and the design of the graphical user interface (GUI) used for data acquisition will be discussed in the following sections.

2.1 Display Calibration and Characterization

For a proper calibration, the Eizo display was set to the build-in AdobeRGB preset mode. The corresponding white point was measured using a Konica Minolta CS-2000 spectroradiometer focused on a 10 cm x 10 cm white patch (RGB = 255, 255, 255) which was displayed right in the center of the monitor on a mid-grey background with a luminance of 20 % of the peak white. A fine-tuning of the display parameters via the hardware control panel on the monitor, finally led to a white point as close to D_{65} as possible, giving a $\Delta u'v'$ of 0.0025. The corresponding xy chromaticity values were [0.309, 0.328] at a luminance level of 110.4 cd/m^2 and a CCT of 6584 K.

The subsequent colorimetric display characterization was performed using the same measurement setup. For the characterization, the well-known GOG model was applied, assuming additive color mixing of the single R, G, and B channels of the device. Since it has originally been developed for the characterization of CRT displays [21], obviously, there is no *a priori*

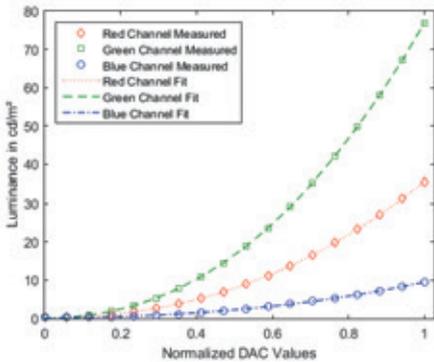


Fig. 1 – TRCs of the Eizo CG277 as a function of normalized DAC input values. Open symbols indicate measured luminance levels, while the dashed lines represent the fits obtained by using the simple GOG model.

reason to believe that this model would also be appropriate to describe the tone reproduction curves (TRCs) of an LCD monitor such as the Eizo CG277. Normally, LCDs have more S-shape like TRCs which, in general, cannot be modeled adequately by a simple gamma approach [22, 23]. However, in the case of the Eizo monitor used for this study, its digital circuitry is designed in such a way that the resulting TRCs mimic the typical responses of a CRT and, therefore, an implementation of the simple GOG model appears to be justified.

In Fig. 1 the measured TRCs of the used Eizo monitor are shown as a function of the digital-to-analog converter (DAC) input values. As can be seen, the simple GOG model perfectly fits the measured data and, therefore, justifies its application.

The model performance has been tested using 150 randomly chosen RGB color patches as well as 18 equally spaced, neutral grey levels, resulting in an average prediction error of less than $0.6 \Delta E_{ab}^*$ and a maximum error of less than $2.1 \Delta E_{ab}^*$. Considering only the neutral colors, the prediction errors were even smaller, i.e., approximately $0.5 \Delta E_{ab}^*$ in average and

with a maximum of less than $0.9 \Delta E_{ab}^*$ indicating an excellent model performance. Furthermore, the channel additivity of the Eizo monitor was examined giving an average deviation from the neutral test colors of approximately $0.45 \Delta E_{ab}^*$.

In order to account for changing display properties and to guarantee an adequate display characterization, the whole characterization procedure including the determination of new GOG model parameters was performed each time before starting the data acquisition. Comparing these measurements, very good performance stability could be observed with a variation of less than $0.4 \Delta E_{ab}^*$ averaged from 72 test colors (red, green, blue, and grey channels with 18 equally spaced DAC input values ranging from 0 to 255).

2.2 Selection of Memory Colors

For the experiment, a total number of 26 familiar object colors were selected with regard to their familiarity, color distribution, importance in application and cultural context. Three different categories were defined: (i) common natural colors (such as blue sky, face skin colors etc.), (ii) common vegetable, fruit, and flower colors, and (iii) cultural-specific colors. The first two categories summarize object colors that are considered to be familiar across various cultures and countries, whereas the third category aims at explicitly investigating cultural-specific object colors.

Fig. 2 gives an overview of the object colors used in this study. As can be seen, the first category consists of six different common natural colors which are blue sky, green grass, blue jeans as well as Caucasian, African and Asian face skin. Here, the memory assessment

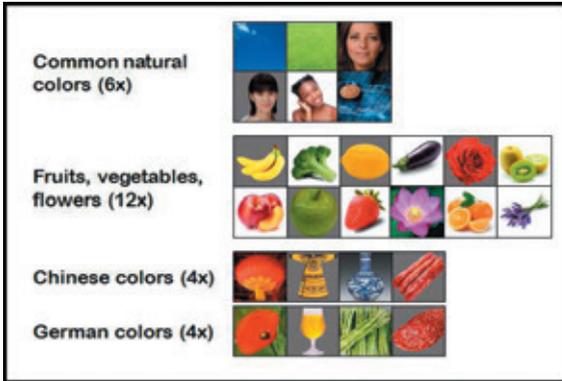


Fig. 2 – Overview of the selected 26 familiar object colors, classified into three different categories. Note that the cultural-specific color category is subdivided into typical Chinese and typical German objects.

of skin colors is supposed to be of particular importance, especially for lighting and imaging applications [2, 4]. The second category consists of twelve different, commonly known kinds of fruits, vegetables and flowers. These are banana, broccoli, lemon, eggplant, red rose, kiwi flesh, nectarine, green apple, strawberry, pink lotus, orange, and lavender. The third category, summarizing cultural-specific object colors, is subdivided into four typical German and four typical Chinese objects. Green asparagus, salami, red poppy, and Pilsner beer were chosen as typical German object colors which were presented only to the German observers, while Imperial robe yellow, Chinese festival red, Cantonese sausage, and the blue on white porcelain were selected as typical Chinese object colors which were presented only to the Chinese observers. Hence, each observer was asked to assess a total number of 22 different familiar objects (6x common natural objects, 12x fruit, vegetable, and flower colors, and 4x cultural-specific objects).

2.3 Graphical User Interface

Since the experimental data acquisition is based on the assessment of homogeneous color patches, an interactive graphical user interface (GUI) was developed which allows the observers to easily manipulate the color appearance of the displayed color patch in order to match it through object-specific descriptors with the color they think it should have (memory color).

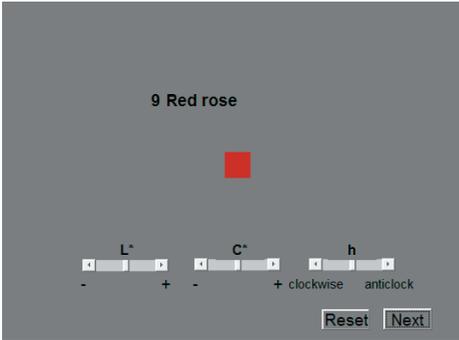


Fig. 3 – Layout of the graphical user interface for manipulating the color appearance of the homogeneous color patches.

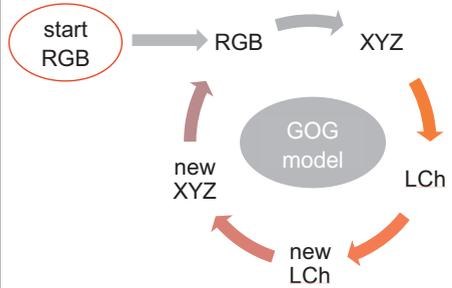


Fig. 4 – Illustration of the back end workflow of the GUI during the manipulation of a color patch by the observer.

The layout of the GUI is shown in Fig. 3. As can be seen, the homogeneous color patch accompanied by its object-specific descriptor is placed exactly in the center of the screen. As a surrounding a mid-grey background with a luminance of 20 % of the peak white was chosen. The size of the patch is 2 cm by 2 cm resulting in a viewing angle of 2° from the observer's eyes when seated at a distance of 60 cm from the monitor. The CIELAB coordinates lightness L^* , chroma C_{ab}^* , and hue angle h_{ab} can easily be manipulated in steps of 0.5 units by moving the three sliders. For each object color, the presented RGB starting values of the color patch were taken as the average of a representative region of the corresponding image shown in Fig. 2. The transformation to CIELAB color space and back to RGB signals throughout the manipulation process is performed in real time by applying the previously derived GOG model describing the colorimetric characteristics of the monitor. For a better understanding, Fig. 4 illustrates the back end workflow of the GUI during the manipulation of a color patch by the observer. When being satisfied with the color appearance of the homogeneous color patch matching his/her memory color, the observer can proceed to the next object by pressing the “Next” button, while pushing the “Reset” button resets the current color patch to its initial RGB values.

3 Results and Discussion

For this study, a total number of 25 Chinese and 44 German observers participated in the experiments. They all passed the Ishihara test of normal color vision. Before the experiment, the concept of lightness, chroma, and hue were explained and each observer was asked to manipulate the 22 familiar object colors until they match his/her memory color given through the object-specific descriptors. For this purpose, the GUI was designed in such a way that the corresponding homogeneous color patches were presented twice to the observers in

random order. No time limit was given to complete the task and the average observer took approximately one hour to finish the session.

For each group of observers (Chinese vs. German) and object color, the individual results were first averaged, giving the mean color centers of the objects' memory colors in CIELAB color space. Fig. 5 compares the obtained results for the 18 object colors assessed in both

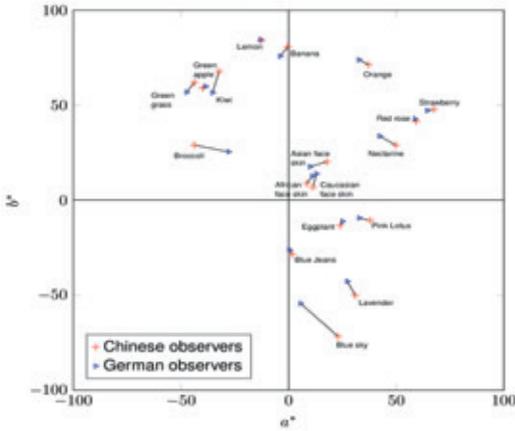


Fig. 5 – Comparison of the calculated color centers of Chinese and German observers in CIELAB chromaticity space.

countries. As can be seen, the smallest chromatic differences $\Delta E_{\text{chrom}}^*$ can be observed for objects from the second category (see Fig. 2), e.g., green apple, lemon, strawberry, red rose and eggplant all have $\Delta E_{\text{chrom}}^* < 3.2$. As expected, the largest differences between the two observer groups can be found for the memory colors of different face skins, blue sky, and green grass, each of which is supposed to be strongly influenced by cultural and geographical factors. The large deviations observed for broccoli, kiwi, nectarine, and lavender are due to the fact that in these cases most observers reported difficulties in recalling one single color associated

with the object's descriptor. Somewhat surprisingly is that in both countries the memory color of blue jeans was rated more or less the same, larger deviations had been expected. The mean CIELAB color difference $\Delta \bar{E}_{ab}^*$ and the mean chromatic difference $\Delta \bar{E}_{\text{chrom}}^*$ of the 18 color centers shown in Fig. 5 are 8.71 and 6.75, respectively.

Considering the mean chroma values, the color centers of the German observers tend to be less saturated than those of the Chinese observers, with the exception of African and Caucasian face skin where the opposite trend is observed. Regarding the lightness and hue coordinates of the color centers, no overall trend could be derived.

In order to obtain a measure for the inter-observer variability in the assessment of memory colors, the mean of the color differences from the mean (MCDM) as well as the corresponding chromatic tolerance ellipse were calculated for each test object. The smaller the MCDM value and ellipse size, the smaller is the inter-observer variability. In Fig. 6, the two memory colors with the smallest (African face skin) and largest (Blue sky) MCDM for Chinese observer are shown and compared with the corresponding results for German observers. Here, the chromatic tolerance ellipses were calculated using the method of Johnson and Wichern [24]. The boundary of each tolerance ellipse corresponds to a 95% statistical confidence interval and the blue line defines the hue angle of the color center. Significant differences in both size and shape as well as orientation of the tolerance ellipses can be observed between Chinese and German results, indicating an influence of cultural and geographical factors which is particularly evident in the case of blue sky.

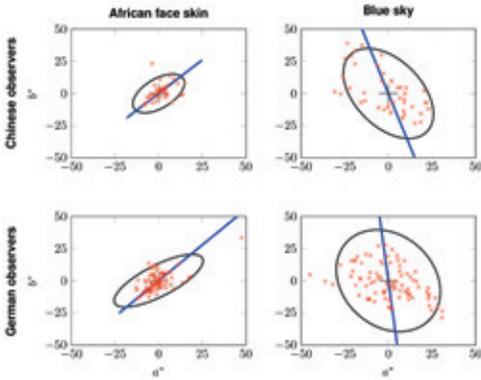


Fig. 6 – Comparison of the chromatic tolerance ellipses assigned to the smallest (on the left) and largest (on the right) MCDM for Chinese observer (upper row) with the corresponding results for German observers (lower row).

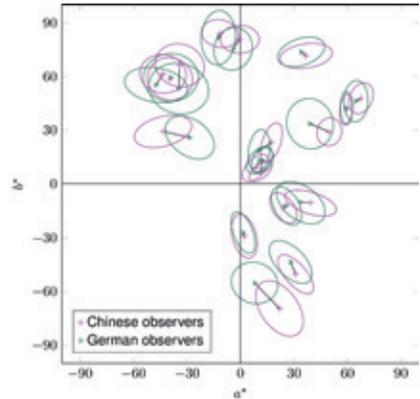


Fig. 7 – Chromatic tolerance ellipses and color centers for the 18 object colors assessed in both countries. Note that for a better clarity the size of the tolerance ellipses is reduced by a factor of 2.

Furthermore, Fig. 7 compares the chromatic tolerance ellipses of the 18 object colors labelled in Fig. 5. For both observer groups, the inter-observer variations in the assessment of the memory colors are strongly context-dependent. In most cases significant differences in size, shape, and orientation of the tolerance ellipses can be found. Chinese assessments for example tend to be more stressed in hue direction, whereas the German results are more chroma oriented. Regarding the size of the tolerance ellipses, Chinese observers on average show less inter-observer variability than German observers do. This finding is also reflected by the mean MCDM value calculated from the MCDM values of all 22 tested object colors (including cultural-specific colors), which is 13.45 (11.22, chromatic only) for Chinese and 16.31 (12.77, chromatic only) for German observers.

Comparing the MCDM values of each object color with the color difference of the corresponding color centers (inter-group variation), it can be found that the assumed cross-cultural differences are smaller than the inter-observer variations. On average, the inter-observer variability is twice as large as the inter-group variations and, therefore, no significant differences in the overall assessment of memory colors between Chinese and German observers could be found, which is in accordance with the study of Smet *et al.* [13]. However, in contrast to the findings of Smet *et al.* who stated that “regional impact is not likely to be of practical importance”, we emphasize that from our point of view it is extremely important to take into account the size, shape, and orientation of the tolerance ellipsoids, which for some memory colors differ significantly between Chinese and German observers. Considering for example the memory color of blue sky, in real imaging applications it is rather a color gradient of various blue tones than a single color. Hence, for good image enhancement and quality it might be necessary to shift this accumulation of blue tones according to the assessments of the different observer groups, so that all blue tones of the blue sky lie within the corresponding memory ellipsoid.

4 Conclusion and Outlook

For the present study, an experiment based on homogeneous color patches was carried out to investigate the cross-cultural impact on the assessment of memory colors between Chinese and German observers. The results were analyzed by calculating the corresponding color centers, tolerance ellipses and MCDM values. It could be found that the overall mean color difference of the color centers is $\Delta\bar{E}_{ab}^* = 8.71$, whereas the inter-observer variability in terms of MCDM is 13.45 for Chinese and 16.31 for German observers. These results indicate that the cross-cultural differences are smaller than the inter-observer variations and, therefore, no significant differences in the overall assessment of memory colors between Chinese and German observers could be found. However, we would like to stress that for obtaining a good image quality in real imaging applications it might be important to take into account the cross-cultural memory effects being reflected in the size, shape, and orientation of the tolerance ellipsoids.

As a consequence, a new model for the evaluation of the color quality in lighting and imaging technology based on memory color effects is being developed by the authors and should be published in the near future.

References

- [1] E. Hering, "Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn," Springer-Verlag (1920).
- [2] C. J. Bartleson, "Color in Memory in Relation to Photographic Reproduction," *Photogr. Sci. Eng.* **5**, 327 (1961).
- [3] S. M. Newhall, R. W. Burnham, and J. R. Clark, "Comparison of Successive with Simultaneous Color Matching," *J. Opt. Soc. A.* **47**, 43 (1957).
- [4] C. J. Bartleson, "Memory Colors of Familiar Objects," *J. Opt. Soc. A.* **50**, 73 (1960).
- [5] G. B. Buck and H. C. Froelich, "Color Characteristics of Human Complexions," *Illum. Eng.* **43**, 27 (1948).
- [6] C. D. Hendley and S. Hecht, "The Colors of Natural Objects and Terrains, and their Relation to Visual Color Deficiency," *J. Opt. Soc. Am.* **39**, 870 (1949).
- [7] P. Siple and R. M. Springer, "Memory and Preference for the Colors of Objects," *Percept. Psychophys.* **34**(4), 363 (1983).
- [8] J. Pérez Carpinell et al., "Familiar Objects and Memory Color," *Color Res. Appl.* **23**(6), 416 (1998).
- [9] S. N. Yendrikhovskij, F. J. J. Blommaert, and H. de Ridder, "Representation of Memory Prototype for an Object Color," *Color Res. Appl.* **24**(6), 393 (1999).
- [10] P. Bodrogi and T. Tarczali, "Colour Memory for Various Sky, Skin, and Plant Colours: Effect of the Image Context," *Color Res. Appl.* **26**(4), 278 (2001).
- [11] K. Smet et al., "Colour Appearance Rating of Familiar Real Objects," *Color Res. Appl.* **36**(3), 192 (2011).
- [12] T. Tarczali et al., "Long-Term Memory Colors of Korean and Hungarian Observers," *Color Res. Appl.* **31**(3), 176 (2005).
- [13] K. A. G. Smet et al., "Cross-culture variation of memory colors of familiar objects," *Opt. Express* **22**, 32308 (2014).
- [14] P. Bodrogi and T. Tarczali, "Investigation of Memory Color," in *Color Image Science: Exploiting Digital Media*, L. W. MacDonald and M. R. Luo, eds., John Wiley & Sons Limited, pp. 23-48 (2002).

- [15] H. Zeng and R. Luo, "Modelling Memory Color Region for Preference Color Reproduction," in Proc. of the SPIE Vol. **7528**, Color Imaging XV: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications, 752808 (2010).
- [16] S. Xue et al., "Exploring the use of memory colors for image enhancement," in Proc. of the SPIE Vol. **9014**, Human Vision and Electronic Imaging XIX, 901411 (2014).
- [17] K. A. G. Smet et al., "Memory Colours and Colour Quality Evaluation of Conventional and Solid-State Lamps," *Opt. Express* **18**, 26229 (2010).
- [18] K. A. G. Smet et al., "A Memory Color Quality Metric for White Light Sources," *Energy Build.* **49**, 216 (2012).
- [19] K. A. G. Smet and P. Hanselaer, "Memory and Preferred Colours and the Colour Rendition of White Light Sources," *Lighting Res. Technol.* **0** (online-first), 1-19 (2015).
- [20] R. S. Berns, "Methods for Characterizing CRT Displays," *Displays* **16**(4), 173 (1996).
- [21] N. Kato, T. Deguchi, and R. S. Berns, "An Accurate Characterization of CRT Monitor (I) Verifications of Past Studies and Clarifications of Gamma," *Opt. Rev.* **8**(5), 305 (2001).
- [22] L. D. Silverstein and T. G. Fiske, "Colorimetric and Photometric Modelling of Liquid Crystal Displays," Proc. of the 1st CIC: Transforms and Transportability of Color, 149 (1993).
- [23] Y. Kwak and L. MacDonald, "Characterisation of a desktop LCD projector," *Displays* **21**, 179 (2000).
- [24] R. A. Johnson and D. W. Wichern, "Applied Multivariate Statistical Analysis," Pearson Education Ltd., Upper Saddle River, NJ, USA (2002).

Variation von Spektralwertfunktionen für unterschiedliche Probanden und Lichtsituationen

Stubenrauch, N.; Schierz, Ch., TU Ilmenau

Problemstellung und Forschungsfragen

LEDs gleicher Farbtemperatur und gleichen Farbortes können für verschiedene Beobachter sehr unterschiedlich aussehen, da die bekannten Spektralwertfunktionen nicht alle Spektren gut beschreiben. Außerdem sind die Funktionen für alle Probanden und Versuchsbedingungen einheitlich. Aber welchen Einfluss hat die Linsenvergilbung und Charakteristik der Makula? Wie beeinflussen andere Umstände, wie das Streulicht im Auge und das genutzte Spektrum, die Farbwahrnehmung?

Stand der Wissenschaft/Technik

Der Großteil der heutigen Messtechnik nutzt die Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 für das 2° Beobachterfeld. Daneben existieren verschiedene andere Spektralwertfunktionen, zum Beispiel die der CIE 1964 (10°) oder die Funktionen der CIE von 2006. Des Weiteren gibt es jüngere Untersuchungen von CSUTI und POLSTER, deren Funktionen eine deutlich bessere Übereinstimmung von berechneter und wahrgenommener Farbe erreichen. Es ist zu vermuten, dass einige Funktionen besser für ältere Probanden, für Versuchsbedingungen mit einem großen Beleuchtungsniveau oder andere Rahmenbedingungen, passen. Außerdem ist der Einfluss der Beobachterfeldgröße wichtig (2° oder 10°).

Forschungshypothesen

- Die Spektralwertfunktionen unterschiedlicher Altersgruppen und Versuchsbedingungen, wie der Leuchtdichte, unterscheiden sich signifikant voneinander.
- Der Einfluss des Alters tritt beim Vergleich von LED-Lichtfeldern abhängig vom Spektrum unterschiedlich stark hervor. Für jedes Spektrum kann ein Metamerieindex rechnerisch hervorgesagt werden.
- Der Einfluss der retinalen Leuchtdichte tritt beim Vergleich von LED-Lichtfeldern abhängig vom Spektrum unterschiedlich stark hervor. Für jedes Spektrum kann ein Metamerieindex rechnerisch hervorgesagt werden.

Versuchsaufbau

Der Proband bewertet Farbunterschiede in einem mittig geteilten, kreisrunden, leuchtendem Testzeichen, umgeben von einer gleichmäßigen Beleuchtung. Beide Feldhälften unterscheiden sich im Spektrum, wobei der Farbort gleich bleibt. Das Referenzfeld bleibt gleich und das Testfeld variiert in einem Muster von etwa 100 Farbörtern. Durch sechs farbige und drei weiße LEDs, mit denen die Spektren flexibel erzeugt werden, können unterschiedlichste Kombinationen von den Probanden bewertet werden.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

In bisherigen Studien haben die Funktionen von POLSTER unabhängig vom Alter der Probanden die besten Ergebnisse geliefert. Die Untersuchung der Linsenvergilbung zeigt wie erwartet eine große Streuung und erschwert die Gruppierung der Probanden.

Variation of the color matching functions for different subjects and lighting situations

Stubenrauch, N.; Schierz, Ch., TU Ilmenau

Research issue

LEDs with identical color temperatures and chromaticity coordinates do not always appear the same for a human observer. This is due to the fact, that the known color matching functions are not fully appropriate for most of the spectra. There cannot be one color matching function for all people and circumstances. But which differences exist between people of different states of lens-yellowing and different characteristic of the macula? How do other circumstances, like more scattered light or a spectrum with more peaks, influence the color perception?

State of science/technology

The majority of color measurement devices use the CIE 1931 tristimulus values for the 2° visual angle observer. However, other color matching functions exist, for example the CIE 1964 (10°) values or the functions published by CIE in 2006. In addition recent investigation from CSUTI and POLSTER results in better fitting curves. Maybe some set of curves are best for older people or for other viewing conditions, like different luminance levels. Equally important is the influence of the viewing field size (2° or 10°).

Research hypothesis

- Color matching functions, best fitting for different groups of conditions differ significantly.
- The influence of the age on color perception differs dependent on the spectrum. A metamerism index can be predicted.
- The influence of the retinal luminance on color perception differs dependent on the spectrum. A metamerism index can be predicted.

Experimental setup

The subject has to evaluate color differences between two semicircular luminous areas. It is placed in front of a uniform illuminated field, looking at the test symbol. Each area contains another spectrum, but nearly the same color coordinates. One semicircular area remains steady as a reference. The other changes its color within a narrow pattern of about 100 chromaticity points. The provided LEDs of the circular test symbol are white (2700 K, 4100 K, 6560 K) and colored (dominant wavelengths 655 nm, 627 nm, 505.5 nm, 530 nm, 447.5 nm and 470 nm). Thereby different combinations of spectra can be investigated by diverse subjects.

Results in comparison with previous findings

In previous studies POLSTER's color matching functions show the best agreement between color difference and human perception, independent to the subject age. The estimation of the lens yellowing demonstrates the huge variance between observers and make grouping difficult.

Variation von Spektralwertfunktionen für unterschiedliche Probanden und Lichtsituationen

*Stubenrauch, N.; Schierz, Ch.,
Fachgebiet Lichttechnik / TU Ilmenau
Postfach 100565, 98693 Ilmenau*

Zusammenfassung

Um aus spektralen Verteilungen Farbkoordinaten zu berechnen existieren seit 1931 die 2° Normspektralwertfunktionen der CIE, welche den farbmetrischen Normalbeobachter definieren. Von Anfang an standen diese Funktionen unter Kritik, weil der Unterschied zwischen Normalbeobachter und individueller Farbwahrnehmung groß sein kann. Dies fällt besonders bei LED-Anwendungen auf. Es wurden weitere alternative Spektralwertfunktionen vorgeschlagen. Aufgrund der Unterschiede zwischen den Menschen (z.B. Alterseinflüsse) und den Versuchsbedingungen (z.B. Beleuchtungsniveau, Spektren im Umfeld, Feldgröße) unterscheiden sich diese stark. Hier wird untersucht, wie verschiedene Einflüsse die Spektralwertfunktionen verändern und wie man den Restfehler mit Metamerieindizes beschreiben kann um diese für Anwendungen korrigieren zu können.

1 Motivation

1.1 Bekannte Spektralwertfunktionen und ihre Unterschiede

LEDs mit identischem Farbort können für unterschiedliche Beobachter stark unterschiedlich aussehen. Messtechnisch werden die Farbörter meist mit den Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 [CIE 15:2004] bewertet und gebinnt. Neben diesen gibt es noch weitere Spektralwertfunktionen für 2° und 10°-Beobachterfeldgröße. Zum Beispiel die Normspektralwertfunktionen der CIE von 1964 für 10°-Felder [CIE 15:2004] und ihre Nachfolger von 2006 (2° und 10°) [CIE 170-1:2006]. Außerdem wurden weitere Variationen der bekannten Funktionen vorgeschlagen. So haben JUDD & VOS [Ops86] bereits 1978 die Funktionen von 1931 überarbeitet und weiterentwickelt. CSUTI & SCHANDA [Csu11] sowie POLSTER [Pol14] haben an Beispielen gezeigt, dass durch eine Verschiebung der angenommenen Empfindlichkeit der S-Zapfen die Übereinstimmung von messtechnisch metameren Spektren mit der visuellen Empfindung deutlich verbessert werden kann.

Bei dieser Vielfalt an Untersuchungen und Spektralwertfunktionen wird deutlich, dass es keine allgemeingültigen Funktionen geben kann, die mit dem Sehen aller Menschen gut übereinstimmt. Zu dieser Erkenntnis ist auch SARKAR gekommen und hat in seinen Untersuchungen acht Beobachtergruppen klassifiziert [Sar10]. Diese Gruppen unterscheiden sich teilweise sehr deutlich in ihren Spektralwertfunktionen. In der Praxis weist dieses Verfahren jedoch große Probleme auf, da immer Beobachter verschiedener Gruppen eine Lichtsituation betrachten.

Viele Ursachen für die Unterschiede in den Spektralwertfunktionen sind bekannt [Web88]. Teilweise sind diese auf die unterschiedlichen Versuchsbedingungen zurückzuführen. Je nach verwendeter Leuchtdichte bei Objekt und Umfeld schwankt der Einfluss der Stäb-

chen [Sti58] und durch die Wahl von Größe und Anordnung des Testzeichens beeinflusst die Gelbfärbung der Makula die Farbwahrnehmung unterschiedlich.

Auch die Probandengruppen unterscheiden sich zwischen den Versuchen deutlich. Durch das unterschiedliche Alter ist die Linsenvergilbung unterschiedlich stark ausgeprägt und verändert die Spektren auf der Netzhaut teilweise deutlich [Pok87]. Außerdem ist bekannt, dass es nicht nur drei Gruppen von Zapfen gibt, sondern diese Untergruppen aufweisen. Es gibt bisher jedoch keinen einfachen Test um die Häufigkeit der Untergruppen von Zapfen zu ermitteln.

Es ist also durchaus möglich, dass alle Studien für ihren Versuchsaufbau und für ihr Probandenkollektiv die bestmöglichen Spektralwertfunktionen ermittelt haben. Diese stellen jedoch nicht die bestmögliche Lösung für die Allgemeinheit dar.

1.2 Alterseinfluss

Wie zuvor erwähnt, verändert sich die menschliche Linse im Alter, sie vergilbt. Es steht außer Frage, dass sich die Transmission absolut und spektral verringert und sich dadurch die Spektralwertfunktionen verändern. In vielen bisherigen Untersuchungen hat sich aber gezeigt, dass altersabhängige Funktionen, wie sie mit den Normspektralwertfunktionen der CIE von 2006 existieren, keine guten Übereinstimmungen zu den visuellen Urteilen liefern. Funktionen, welche altersangepasst sind, ergeben keine signifikant besseren Abgleichergebnisse als die Standardfunktionen für 32-jährige Probanden [Nor93]. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Linsenalterung sich zwischen den Menschen, auch unter Ausschluss von Augenkrankheiten, wie dem grauen Star, sehr stark unterscheidet. Die genauen Ursachen für diese Unterschiede sind unklar. Eine Vermutung liegt im Ausmaß der okularen UV-Exposition [Pok87].

1.3 Einfluss der Leuchtdichten von Testzeichen und Umfeld

Ein großer Unterschied der bekannten Untersuchungen liegt in den Leuchtdichten von Testzeichen und Umfeld. Je nach retinalem Beleuchtungsniveau unterscheidet sich der Einfluss der Stäbchen auf die Farb- und Helligkeitswahrnehmung deutlich [Sti58].

Frühe Untersuchungen haben mit Temperaturstrahlern und entsprechenden Filtern gearbeitet, um Spektren gezielt zu verändern und Farbörter zu erreichen. Da man sich vor allem mit Körperfarben beschäftigt hat, wurden in Versuchsaufbauten nur vergleichbar geringe Leuchtdichten verwendet. Heute wird der Einfluss von hohen Leuchtdichten immer wichtiger, da sie auch in der Praxis verwendet werden. Der Unterschied der Beleuchtungsstärke im Auge und folglich auch der Beteiligung der Stäbchen soll untersucht werden.

1.4 Metamerieindex

Selbst unter der Annahme eines idealen Normalbeobachters gibt es immer noch Diskrepanzen zwischen wahrgenommen und rechnerisch identischen Farben. Aufgrund von Intra- und Interbeobachterstreuungen (z.B. unterschiedliche Untergruppen einzelner Rezeptoren [Sto08]) wird es immer einen Bereich und keinen exakten Wert für einen Abgleich geben. Außerdem ist es oft der Fall, dass verschiedene Probandengruppen (z.B. verschiedene Altersklassen) Farben zusätzlich aus verschiedenen Beobachterfeldgrößen se-

hen. Daher ist es wichtig abschätzen zu können, wie groß der Einfluss dieser Unterschiede für das jeweilige verwendete Spektrum ist.

Mit dem Metamerieindex für Beobachterfeldgröße (MIB) hat POLSTER eine Möglichkeit geliefert, diesen Einfluss zu beschreiben [Pol14]. Dabei gleicht sie zwei Spektren im 2° Farbraum aufeinander ab und berechnet im Anschluss den Farbabstand im 10° Farbraum. Der Farbabstand in der UCS-Farbtabelle der CIE von 1976 stellt dann den Wert für den MIB dar. Dabei hat sich gezeigt, dass der MIB in einem für die Praxis bedeutenden Bereich variiert.

2 Forschungsfragen

- Die Spektralwertfunktionen unterschiedlicher Altersgruppen und Versuchsbedingungen, wie der Leuchtdichte, unterscheiden sich signifikant voneinander.
- Der Einfluss des Alters tritt beim Vergleich von LED-Lichtfeldern abhängig vom Spektrum unterschiedlich stark hervor. Für jedes Spektrum kann ein Metamerieindex rechnerisch hervorgesagt werden.
- Der Einfluss der retinalen Beleuchtungsstärke tritt beim Vergleich von LED-Lichtfeldern abhängig vom Spektrum unterschiedlich stark hervor. Für jedes Spektrum kann ein Metamerieindex rechnerisch hervorgesagt werden.

3 Versuchsvorbereitung

3.1 Mechanischer Aufbau

Zur Untersuchung wurde eine Abmusterungskabine entworfen, welche eine Vielzahl an Variationen an Testzeichen und Umfeld erlaubt (Abb. 1) [Haa15].

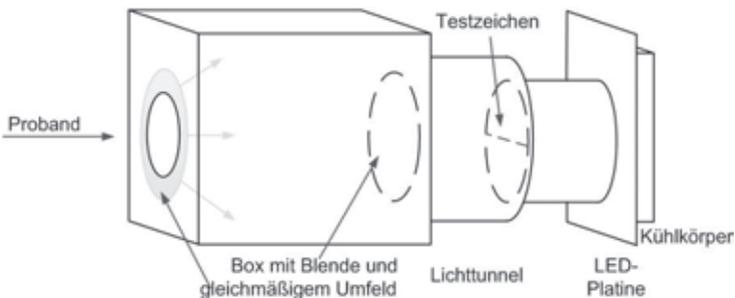


Abb. 1: Versuchsaufbau zur Bewertung von Farbunterschieden

Der Proband sitzt auf einem höhenverstellbaren Stuhl vor der Box (L: 1,37 m; B: 0,66 m, H: 0,66 m). Der Kopf ist mit Hilfe einer Kinn-Kopf-Stütze fixiert. Die Betrachtung des Testzeichens erfolgt monokular. Beim Blick in die Box ist das Testzeichen etwa 1 m entfernt. Mit Hilfe einer Blende 0,3m vor dem Testzeichen kann dessen sichtbare Größe variiert werden. Hier sind Beobachterfeldgrößen von 2° und 10° vorgesehen. Durch einen Lichttunnel wird der Einfluss der Umfeldbeleuchtung auf das Testzeichen minimal gehalten. Eine LED-Platine zur Erzeugung der Testzeichenspektren ist hinter einem Mischzylinder, bestehend aus zwei Kammern, angebracht und kann bei Bedarf getauscht werden.

3.2 Spektren

Die LED-Platine im Versuchsaufbau ist, genau wie der Mischzylinder und das Testzeichen, in zwei Teile geteilt. Auf jeder befinden sich sechs verschiedene farbige LEDs (dominante Wellenlängen von 655nm, 627nm, 505,5nm, 530nm, 470nm, 447,5nm), sowie drei weiße LED-Typen unterschiedlicher ähnlichster Farbtemperatur (2700K, 4100K, 6560K). Durch diese verschiedenen LEDs kann ein großer Gamut aufgespannt (Abb. 2) und eine Vielzahl an Spektralverteilungen realisiert werden.

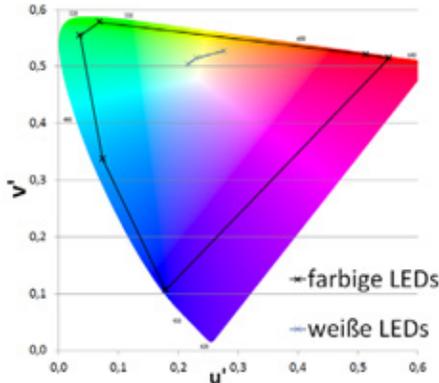


Abb. 2: Gamut, welcher mit den verwendeten LEDs aufgespannt wird

Für die Umfeldbeleuchtung wurden die weißen LEDs genutzt, welche auch auf der Platine verbaut sind. Die Umfeldbeleuchtung kann somit im weißen Bereich weitgehend an die Farbe des Testzeichens angepasst werden, sodass sie sich nur im Spektrum unterscheiden.

3.3 Verfahren

Mit einer selbst erstellten Software ist es möglich, ein Raster von Farbörtern in einem zuvor festgelegten Farbenraum zu definieren (voreingestellt sind CIE 1931 2°, CIE 1964 10°, CIE 2006 2° & 10°, TUIL 06 2° & 10°). Im Versuch wird eine Testzeichenhälfte als Referenz konstant bleiben und die zweite innerhalb eines Rasters (Abb. 3) leicht variiert. Beide Spektren sind dabei, trotz gleichen Farbortes, deutlich unterschiedlich. Aufgabe des Probanden wird es sein, die beiden Hälften des Testzeichens auf Gleichheit zu bewerten.

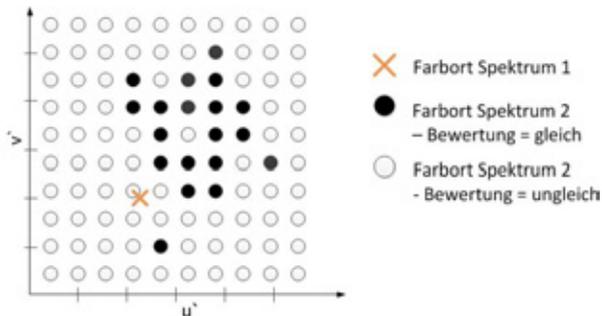


Abb. 3: Raster der abzufragenden Farbörter

Für die Durchführung der Versuche wird es verschiedene Kombinationen an Spektren mit unterschiedlichen Primärwellenlängen geben. Außerdem wird mit der Umfeldleuchtdichte der Einfluss von Streulicht im Auge variiert. Die Farbe des Umfeldes wird, wie zuvor beschrieben, an das Testzeichen angepasst.

3.4 Probanden

Bei dem zu wählenden Probandenkollektiv ist darauf zu achten, dass einzelne Probandengruppen gut abgrenzbar sind. So sind mindestens zwei Altersgruppen zu wählen, welche zur genaueren Charakterisierung auf ihre Linsenvergilbung untersucht werden. Die Farbtüchtigkeit aller Probanden wird vor dem Versuch getestet.

Um die Intrabeobachterstreuung zu ermitteln, wird eine kleine Probandengruppe mehrmals zu unterschiedlichen Tageszeiten untersucht. Außerdem werden beide Augen einzeln getestet.

3.5 Flimmerphotometer

Zur Einschätzung der Linsenalterung wurde ein Flimmerphotometer entworfen, mit welchem es möglich ist, die Vergilbung zu ermitteln. Die Probanden werden in Altersgruppen sortiert und Abschätzungen zur Auswirkungen auf die Farbwahrnehmung getroffen. [Pöh16]

4 Auswertung

4.1 Beste Spektralwertfunktionen

Im Anschluss an die Versuche werden die Antwortraster der Probanden für die verschiedenen Umfeldbedingungen und Spektren ausgewertet. Für verschiedene Farbsysteme wird der Farbort vom Referenzspektrum sowie der Mittelwert, der mit gleich bewerteten Testspektren, berechnet. Somit wird das beste Farbsystem für die jeweilige Probandengruppe ermittelt. Dabei wird auch untersucht, welche Verschiebung der Spektralwertfunktion des S-Zapfens für welche Altersgruppe die beste Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den wahrgenommenen Werten ergibt.

4.2 Metamerieindex für LEDs

Um die Unsicherheiten zwischen den Probanden beschreiben zu können, erfolgt eine Analyse von Ausdehnung und Orientierung der mit gleich bewerteten Farbörter. Je weiter die Probandenurteile streuen, umso größer ist der entsprechende Metamerieindex. Die Indexe für die Metamerie für verschiedene Beobachterwinkel, Umgebungsleuchtdichten und Altersgruppen sollen zu einem Robustheitsmaß für das Spektrum vereint werden. Dieser drückt aus, wie stark sich die Wahrnehmung einer Lichtquelle für verschiedene Beobachter und unterschiedliche Betrachtungsbedingungen ändert. Außerdem gilt es allgemeingültige Regeln zu finden, mit denen auch neue Spektren bewertet werden können.

5 Ausblick

Ziel der Untersuchung ist es festzustellen, wie sich die Spektralwertfunktionen für verschiedene Probandengruppen und Versuchsbedingungen unterscheiden. Für ideale Spektralwertfunktionen können die Abweichungen mit einem Robustheitsmaß, zusammengesetzt aus mehreren Metamerindizes, beschrieben werden.



Die Untersuchungen finden in Zusammenarbeit mit den Praxispartner OSRAM Opto Semiconductors GmbH und Zumtobel Lighting GmbH statt und wurde im Rahmen des Projektes UNILED II (Förderkennzeichen: 13N13395) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

6 Quellen

- [Sto08] Stockman, A.: Physiologically-based color matching functions. In (Society for Imaging Science and Technology Hrsg.): 16th Color and Imaging Conference. Final Program and Proceedings, 2008; 1-5 (5).
- [Ops86] Opstelten, J.; Rinzema, G.; Stierum, A.: New Insights in chromaticity and tolerance areas of fluorescent lamps. Report: LA 1005/86, 1986
- [Csu11] Csuti, P. et al.: Improved color matching functions for better visual matching of LED sources. In (CIE Hrsg.): 27th Session, 2011; S. 10–15
- [Pol14] Polster, S.: Neue Spektralwertfunktionen für die korrekte Bewertung von LED-Spektren und Einführung eines Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit. Dissertation, Ilmenau, 2014
- [Sar10] Sarkar, A. et al.: Toward Reducing Observer Metamerism in Industrial Applications: . Colorimetric Observer Categories and Observer Classification. In (Society for Imaging Science and Technology Hrsg.): 18th Color and Imaging Conference. Final Program and Proceedings, 2010; S. 307–313 [10]
- [Web88] Webster, M. A.; MacLeod, D. I.: Factors underlying individual differences in the color matches of normal observers. In Journal of the Optical Society of America, 1988; S. 1722–1735
- [Sti58] Stiles, W. S.; Burch, J. M.: N.P.L. Colour-matching Investigation: Final Report. In International Journal of Optics, 1958, 1958; S.1–26.
- [Pok87] Pokorny, J.; Smith, V. C.; Lutze, M.: Aging of the human lens. In Applied Optics, 1987, 1987; S. 1437–1440
- [Nor93] North, A. D.; Fairchild, M. D.: Measuring Color-Matching Functions Part II. New Data for Assessing Observer Metamerism. In Color Research & Application, 1993; S. 163–170]
- [Smi94] Smith, G. et al.: Color recognition and discrimination under full-moon light. In Applied Optics, 1994; S. 4741–4748
- [Sto08] Stockman, A.: Physiologically-based color matching functions. In (Society for Imaging Science and Technology Hrsg.): 16th Color and Imaging Conference. Final Program and Proceedings, 2008; 1-5 (5).
- [Haa15] Haag, S.; Hartwig, U. M.: Aufbau einer Untersuchungskabine zur Abmusterung von Lichtfarben. Projektseminar, Ilmenau, 2015
- [Pöh16] Pöhler, S.; Batuchtin, I.; Zhi, S.: Aufbau eines Flimmerphotometers zur Untersuchung der altersabhängigen Vergilbung der Augenlinse. Projektseminar, Ilmenau, 2016

Veränderung des wahrgenommenen Lichtspektrums durch farbige Raumumschließungsflächen

Christina Königl, Prof. Mathias Wambsganß Hochschule Rosenheim

Problemstellung

Wie verändern sich Lichtparameter durch Reflexion an Wandflächen unterschiedlicher Farbigkeit? Lichttechnische Angaben zu einer Leuchte oder Lampe beziehen sich ausschließlich auf das Licht, welches aus dieser austritt. Bei speziellen Lichtenforderungen - beispielsweise einer biologisch wirksamen Beleuchtung - ist aber jenes Licht und dessen Parameter relevant, welches am Auge ankommt und dort auf die Rezeptoren trifft. Licht gelangt in der Regel nicht nur auf direktem Weg von einer Lichtquelle ins Auge, sondern ist zuvor Veränderungen durch Reflexion, Absorption und Transmission an unterschiedlichen Materialien und farbigen Oberflächen im Raum ausgesetzt.

Ziel

Gerade wenn Beleuchtung gezielt biologisch wirksam sein soll, ist die spektrale Zusammensetzung des Lichts von entscheidender Bedeutung. Eine Veränderung der Lichtfarbe kann die gewünschte Wirkung stark beeinträchtigen. Der Beitrag beschäftigt sich mit einer systematischen Untersuchung diffus reflektierender Wandflächen unterschiedlicher Farbigkeit und gibt Hinweise für die farbliche Gestaltung von Räumen, um eine unerwünschte Beeinflussung des Lichtspektrums und eine dadurch veränderte Wirkung auf den Hormonhaushalt zu vermeiden.

Beschreibung der Innovation/»best practice«

Anhand von Modellversuchen wurde die Veränderung der spektralen Zusammensetzung des Lichtes im Raum untersucht. Für die Wandflächen wurden 4 Testfarben (Gelb, Grün, Rot, Blau) in jeweils 6 Farbsättigungen verwendet. Um eine gleichmäßige Reflexion und damit repräsentative Ergebnisse zu erhalten, wurde die Anordnung der Lichtquellen so gewählt, dass alle raumumschließenden vertikalen Flächen ähnliche Beleuchtungsstärken aufwiesen. Als Lichtquelle fanden 2 LED Module mit variabler Farbtemperatur Anwendung. Spektral aufgelöst erfasst wurden der Reflexionsgrad der Testfarben und im Modellraum die Lichtparameter in Augpunkthöhe. Die in den Versuchsreihen gemessenen Lichtspektren waren Basis zur Bewertung der biologischen Wirksamkeit und deren Veränderung durch variierende Farbsättigungen, Farbkombinationen und Farbflächenanteile.

Realisierungsgrad

Die Ergebnisse liefern Planungshinweise für die farbliche Gestaltung von Räumen, in denen eine biologisch wirksame Regulierung der Beleuchtung angestrebt wird. Es wird deutlich, dass die Farbgestaltung einen essenziellen Einfluss auf die spektrale Zusammensetzung des Lichtes im Raum und somit auf die biologische Wirkung hat und daher nicht unbeachtet bleiben sollte. Die Ergebnisse verdeutlichen auch, dass die Angaben zu einer Lichtquelle nur als Richtwerte gesehen werden können und wenig über die biologische Wirksamkeit im Raum aussagen.

Change of the perceived light spectrum by coloured room enclosure surfaces

Christina Königl, Prof. Mathias Wambsganß Hochschule Rosenheim

Issue

How do light parameters change by reflection on wall surfaces of different colours? Photometrical information of a luminaire or lamp refers solely to the light emitted from it. On specific light requirements - for example, a biologically effective lighting - that light and its parameters are relevant which arrives at the eye and strikes the receptors. Generally light does not only enter the eye on a direct way from a light source, but is previously exposed to changes by reflection, absorption and transmission on different materials and coloured surfaces in the room.

Aim

Especially when lighting is aimed to be biologically effective, the spectral composition of light is of crucial importance. A change of the colour temperature can strongly impair the desired effect. The contribution deals with a systematic investigation of diffusely reflecting wall surfaces of different colours and gives hints for the colour scheme of rooms to avoid an undesired influencing of the light spectrum and thereby a changed effect on the hormonal balance.

Description of the innovation/»best practice«

By means of model experiments, the change of the spectral composition of the light was investigated in the room. For the wall surfaces 4 test colours (Yellow, Green, Red, Blue) were used with 6 colour saturations in each case. To achieve a steady reflection and thus representative results, the arrangement of the light sources was chosen so that all room enclosure vertical surfaces had similar illuminances. As light sources 2 LED modules with variable colour temperature were used. Spectral resolved the reflectance of the test colours and in the model room the light parameters on eye point level were captured. The light spectra measured in the series of experiments were the base for the assessment of the biological effectiveness and its change by varying colour saturations, colour combinations and colour surface percentages.

Level of realization

The results provide planning tips for the colour scheme of rooms where a biologically effective adjustment of lighting is aimed at. It becomes clear that the colour scheme has an essential influence on the spectral composition of the light in the room and thus on the biological effect and hence should not be unnoticed. The results also make clear that the specification of a light source can be seen as guide values only and state little about the biological effectiveness in the room.

Veränderung des wahrgenommenen Lichtspektrums durch farbige Raumumschließungsflächen

*Christina Königl, Prof. Mathias Wambsganß
Fakultät für Innenarchitektur, Hochschule Rosenheim
Hochschulstraße 1, 83024 Rosenheim*

Zusammenfassung

Wie verändern sich Lichtparameter durch Reflexion an Wandflächen unterschiedlicher Farbigkeit? Diese Frage stellt sich besonders, wenn eine Beleuchtung mit biologischer Wirksamkeit geplant werden soll. Farben im Raum können das Lichtspektrum maßgeblich verändern. Eine systematische Untersuchung, die durch Modellversuche gestützt wird, zeigt, wie sich farbige Wandflächen auf das Lichtspektrum am Auge auswirken. Die Ergebnisse liefern Planungshinweise, die bei der Gestaltung beachtet werden sollten, um eine biologische Wirksamkeit im Raum zu unterstützen und nicht zu reduzieren.

1 Einführung

Lichttechnische Angaben zu einer Lichtquelle beziehen sich üblicherweise auf das Licht, welches aus dieser austritt. Bei speziellen Anforderungen, wie zum Beispiel bei der Planung einer biologisch wirksamen Beleuchtung, ist aber jenes Licht und dessen spektrale Zusammensetzung relevant, welches am Auge des Nutzers ankommt und dort auf die Rezeptoren trifft. Das Maximum der biologischen Wirksamkeit wird durch eine hohe Farbtemperatur und damit hohem Blauanteil des Lichts am Auge erreicht. [1] Eine Veränderung der Lichtfarbe kann die gewünschte Wirkung stark beeinträchtigen. Licht gelangt in der Regel nicht nur auf direktem Weg von einer Lichtquelle ins Auge, sondern ist zuvor Veränderungen durch Reflexion, Absorption und Transmission an unterschiedlichen Materialien und farbigen Oberflächen im Raum ausgesetzt. Die Raumgestaltung hat daher neben der Lichtquelle selbst einen essenziellen Einfluss auf die Lichtplanung und insbesondere auf Lichtplanungen, bei denen eine gezielt biologische Wirksamkeit angestrebt wird.

2 Methodik

Anhand von Modellversuchen wird die Veränderung der spektralen Zusammensetzung des Lichtes im Raum untersucht. Dabei wird der Modellraum bei unterschiedlichen Wandfarben mit einer Kunstlichtquelle bestrahlt und Messwerte mit einem Spektromessgerät in Augenhöhe erfasst.

2.1 Testfarben

Festgelegt werden 4 Testfarben (Gelb, Grün, Rot, Blau) in jeweils 6 Farbsättigungen. Die Farben decken die Bandbreite des sichtbaren Spektrums ab, um repräsentative Ergebnisse für die verschiedenen Bereiche zu erhalten. Weiß wird als Referenzfarbe gewählt. Zum Einsatz kommen weiße Dispersionsfarbe und Vollton-Abtönfarben, die entsprechend den Sättigungsstufen manuell gemischt werden. Die Mischungsverhältnisse der Volltonfarben mit weißer Farbe betragen 1:0, 1:1, 1:5, 1:10, 1:20, 1:40 und sind so gewählt, dass auch

die Relevanz der Farbhelligkeit für die Veränderung des Lichtspektrums beurteilt werden kann.

2.2 Modellraum

Der Modellraum dient zur Untersuchung der Fragestellung. Da unterschiedliche Farben im Raum getestet werden sollen, ist eine Variabilität der Wandflächen erforderlich. Die Raumgeometrie ist einfach rechteckig gehalten. Fenster sind nicht vorhanden, sodass der Lichteinfall immer gleich ist. Das Modell muss vollständig dicht geschlossen sein, damit kein Streulicht von außen eintreten kann.

Als Lichtquelle finden zwei LED Module mit variabler Farbtemperatur Anwendung. Die Anordnung der Lichtquellen ist so gewählt, dass alle raumumschließenden vertikalen Flächen ähnliche Beleuchtungsstärken aufweisen. Dadurch wird eine stets gleichmäßige Reflexion an den Wandflächen gewährleistet, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten.

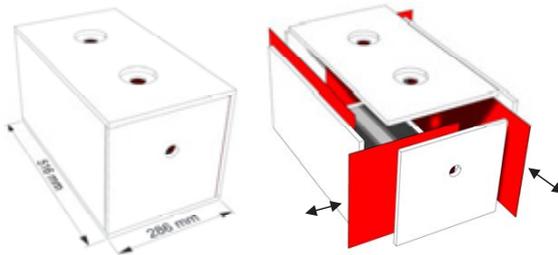


Abb. 1-2: Darstellung des Modellraums in der Perspektive und als Explosionszeichnung. Ein Austausch der Wandflächen wird durch seitliche Schlitze des Modells ermöglicht. In den Deckenöffnungen werden die Lichtquellen platziert und in der Aussparung der Modellvorderseite der Messsensor des Spektroradiometers.

2.3 Versuchsfolgen

Sämtliche Modellmessungen werden jeweils unter der Bestrahlung des Modellraums mit Weißlicht bei 2700K und 5000K durchgeführt. Die Farbtemperaturen wurden so eingestellt, dass bei Messung der einzelnen Lichtquelle die gewünschte zu testende Farbtemperatur erreicht wurde, da der Messwert nicht exakt den Einstellungen entspricht. Gedimmt werden die Lichtquellen auf 13%. Dies ist ausreichend, um eine Beleuchtungsstärke von 3000-4000 Lux im Bereich der Wände und des Bodens im Modellraum zu erreichen. Der Messsensor befindet sich in einer Augpunkthöhe von 1,60m. Daher werden die Lichtwerte erfasst, welche im 1:1 Raum am menschlichen Auge auftreten würden. Also genau jene Lichtparameter, welche speziell zur Beurteilung von biologischen Lichtwirkungen auf den Menschen benötigt werden.

Spektral aufgelöst erfasst werden der Reflexionsgrad der Testfarben und im Modellraum die Lichtparameter in Augpunkthöhe. Folgende Parameter wurden dabei ermittelt und mit Hilfe von Diagrammen veranschaulicht:

- Farbort CIE Farbtafel
- Farbtemperatur
- Farbwiedergabeindex
- Farbreinheit
- Beleuchtungsstärke
- melanopischer Wirkungsfaktor

Um eine nachteilige Veränderung der biologischen Wirksamkeit auszuschließen, sollten die Werte der Farbtemperatur und des melanopische Wirkungsfaktor gegenüber der Lichtquelle wenig reduziert sein. Damit die Lichtqualität nicht vermindert wird, sollten die Farborte im CIE Farbraum wenig von Planck'schen Kurvenzug abweichen, die Farbwiedergabe einen hohen Wert und die Farbreinheit einen niedrigen Wert aufweisen. Die Beleuchtungsstärke ist abhängig von den Reflexionswerten der Testfarben und sollte gegenüber der Referenzmessung mit weißen Wänden wenig vermindert sein. Reflexionsgrad und Beleuchtungsstärke sind daher auch ein Indiz für die Energieeffizienz der Beleuchtung.

Für die Versuchsmessungen werden vier Wandscheiben in das Modell eingesetzt. Der Anteil farbiger Wandflächen entspricht daher 100%. Der Oberflächenanteil des Messsensorausschnitts bleibt auf Grund der Geringfügigkeit unbeachtet. Decke und Boden werden nicht verändert und sind mit der Referenzfarbe Weiß gestrichen. Für jede Farbkombination werden die zuvor genannten Parameter als Messwerte festgehalten.

Die folgenden Fragestellungen in Bezug auf die Veränderung des Lichtspektrums durch unterschiedliche Farbgestaltungen werden dabei überprüft:

- **Veränderung durch Reduktion der Farbsättigung:**
Zum Einsatz kommen sämtliche Testfarben und entsprechende Farbabstufungen mit jeweils 100% Wandflächenanteil. Dabei wird die Änderung des Spektrums bei Raumgestaltungen mit vollflächigem Farbeinsatz analysiert.
- **Veränderung durch Farbkombinationen:**
Messtechnisch ermittelt wird die Veränderung des Spektrums durch die Kombination von 50% Rot und 50% Blau Flächenanteil, als auch die Kombination aus allen vier gesättigten Testfarben (Gelb, Grün, Rot, Blau). Zur Anwendung kommen ausschließlich gesättigte Testfarben. Ermöglicht wird dadurch eine Beurteilung, ob die Kombination von kalten und warmen Farben, die spektralen Abweichungen ausgleichen kann.
- **Veränderung durch Farbflächenanteil:**
Der Farbflächenanteil beträgt hier jeweils nur noch 3% der gesättigten vier Testfarben und 97% Weißflächenanteil. Überprüft werden kann dadurch der Einfluss von Farbgestaltungen auf das Spektrum, bei denen kein vollflächiger Farbeinsatz stattfindet.

3 Auswertung

Die in den Versuchsreihen gemessenen Lichtparameter sind Basis zur Bewertung der biologischen Wirksamkeit. Die Wandfarben sollen danach bewertet werden, wie stark die Veränderung der Lichtparameter ausfällt und ob diese für besondere Anforderungen an die biologische Wirksamkeit noch ausreichen. Relevant sind dabei besonders die Messungen bei 5000K, da das Maximum der biologischen Wirksamkeit, also die Melatonin-suppression, erreicht werden muss.

3.1 Reflexionseigenschaften

Zu Beginn werden Farbproben aller 25 Testfarben spektral vermessen. Die spektralen Reflexionsgrade liefern erste Hinweise für Veränderungen des gemessenen Lichtspektrums am Augpunkt. Die Messungen wurden im Bereich des sichtbaren Spektrums von 380-780nm mit einer Schrittweite von 10nm durchgeführt.

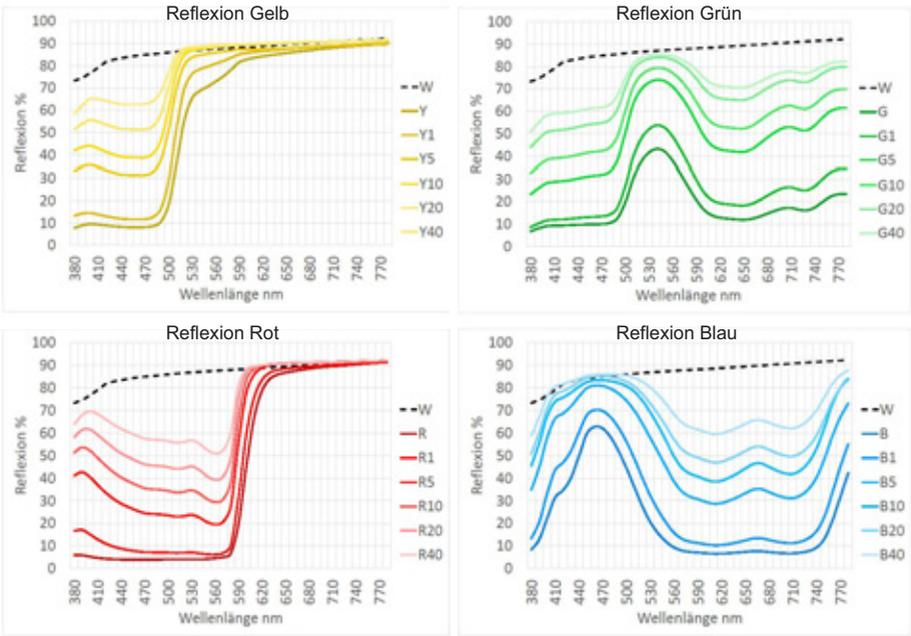


Abb. 3-6: Spektrale Reflexion der Testfarben. Die Diagramme zeigen jeweils Reflexionswerte einer Testfarbe und entsprechender Farbabstufungen.

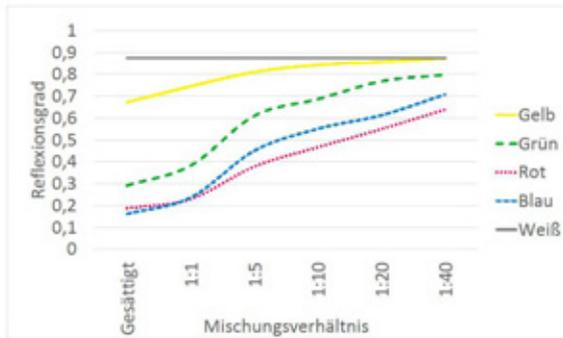


Abb. 7: Diagramm: Photopisch bewertete Reflexionsgrade der Testfarben

Erkennbar ist, dass Weiß bei allen Wellenlängen den höchsten Reflexionsgrad aufweist, aber dennoch im blauen Bereich minimal abfällt.

Die gelben Testfarben erreichen erwartungsgemäß den höchsten und die blauen Testfarben den niedrigsten photopischen Reflexionswert. Grundsätzlich lässt sich feststellen, je höher der Weißanteil einer Farbmischung ist, desto höher ist dessen Reflexionswert. Die warmen Farben Gelb und Rot weisen im roten Spektralbereich eine sehr hohe Reflexion

auf und sind im blauen Spektralbereich stark abfallend, während das Maximum der Reflexion bei Blau im blauen und bei Grün im grünen Bereich liegt.

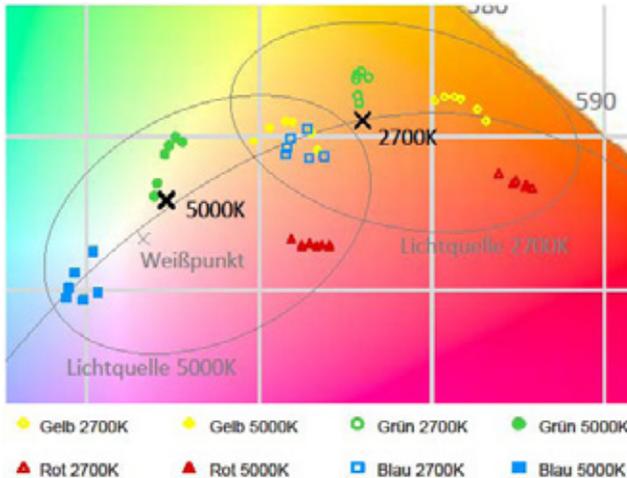


Abb. 8: Darstellung der Farborte der Modellmessungen in einem Ausschnitt des CIE Farbraums. Es sind ausschließlich Messungen mit 100% Farbflächenanteil dargestellt. Die schwarzen Markierungen stellen die Farborte der Lichtquellen dar.

Erkennbar sind die Abweichungen der Farborte, welche den unterschiedlichen Wandfarben geschuldet sind. Ablesbar ist auch das Schema der Abweichungen. Die Farborte der gelben und roten Wandflächen befinden sich jeweils rechts von denen der Lichtquellen, die Farbtemperaturen müssten hier also geringer ausfallen, als die der Lichtquellen. Die Orte bei grünen Wänden sind in etwa auf Höhe der Farborte der Lichtquellen, vermutlich sollte hier also die Abweichung der Farbtemperatur von der Lichtquelle am geringsten sein. Da die blauen Farborte links neben der Lichtquelle liegen, ist hier ein Anstieg der Farbtemperaturen zu erwarten.

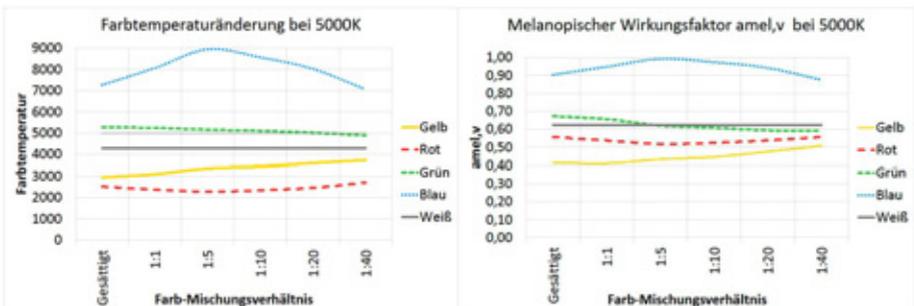


Abb. 9-10: Diagramme Messungen Farbtemperatur und melanopischer Wirkungsfaktor bei 5000K

Die Ergebnisse zeigen, dass Farben grundsätzlich einen bedeutenden Einfluss auf das Licht haben. Dies verdeutlicht auch die Bandbreite der Abweichungen. So reichen die ge-

gemessenen Farbtemperaturen der 5000K Lichtquelle von 2275K bis 8944K. Bei immer gleicher Lichtquelle beträgt die Differenz also mehr als 6000K. Die Farbtemperatur und daher auch der melanopische Wirkungsfaktor steigt bei Blau und reduziert sich bei Rot am stärksten. Grün weist die geringsten Abweichungen auf, während Gelb ebenfalls sinkt.

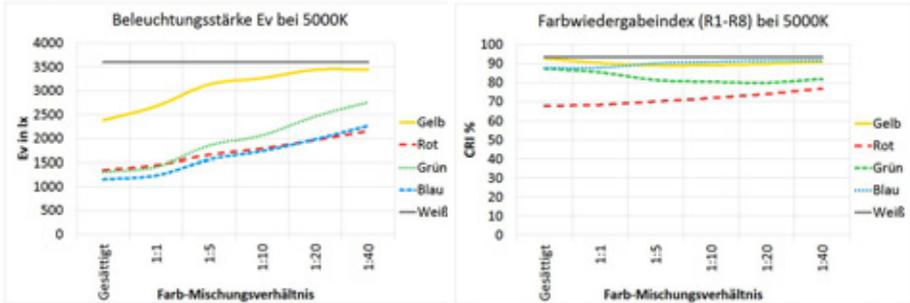


Abb. 11-12: Diagramme Messungen Beleuchtungsstärke und Farbwiedergabeindex bei 5000K

Auffallend ist, dass bei Blau und Grün zwar die biologische Wirksamkeit positiv zu bewerten ist, die Beleuchtungsstärke sich aber stark verringert, was eine geringere Effizienz bedeutet. Bei Gelb verhalten sich die Werte entgegengesetzt. Die Farbwiedergabe ist auch bei Blau positiv zu bewerten, was bereits der Farfort im CIE Farbraum vermuten ließ.

Ein Schema bei der Reduktion der Farbsättigung und Reduktion des Flächenanteils ist erkennbar. Die biologische Wirksamkeit steigt bei Gelb und Rot, während diese bei Grün und Blau sinkt. Die Effizienz erhöht sich bei allen Farben mit Reduzierung der Farbsättigung und des Farbflächenanteils.

4 Erkenntnisse

Für eine Optimierung der biologischen Wirksamkeit ist eine Raumgestaltung mit blauen Wandflächen förderlich. Die Gestaltungsfreiheit würde dabei aber stark eingeschränkt sein. Dieser Beitrag soll keine Vorgaben und Einschränkungen zur Farbwahl definieren, sondern veranschaulichen, dass Farben einen essenziellen Einfluss auf das Lichtspektrum haben, und daher bei speziellen Lichtenforderung unbedingt beachtet werden müssen.

Bei einer biologischen Wirksamkeit sollte bewusst sein, welche Farben die Wirksamkeit stark reduzieren und diese eventuell nicht vollflächig oder mit geringer Farbsättigung eingesetzt werden. Sollen aber aus gestalterischen Gründen Farben zum Einsatz kommen, welche die Lichtwerte und somit auch die Wirksamkeit reduzieren, müssen die Lichtparameter der Leuchte entsprechend erhöht werden. Die Ergebnisse verdeutlichen auch, dass die Angaben einer Leuchte nur als Richtwert gesehen werden können und wenig über die biologische Wirksamkeit im Raum aussagen.

5 Quellen

- [1] DIN SPEC 67600:2013-04, Biologisch wirksame Beleuchtung – Planungsempfehlungen, S. 11



LED LINEAR™
lighting solutions

THORN

TRIDONIC



ZUMTOBEL





Die Studierenden von deutschen Universitäten und Hochschulen (FH), die an der Tagung LICHT 2016 teilnehmen, bedanken sich für die hohe Spendenbereitschaft der der Lichttechnik verbundenen Unternehmen, durch die ihre Teilnahme in Karlsruhe ermöglicht wird.

Diesem Dank schließt sich die Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LiTG) an.



ADELS-CONTACT Elektrotechnische Fabrik GmbH & Co. KG

Anschluss- und Verbindungsklemmen
D - 51469 Bergisch-Gladbach
www.adels-contact.de



Ansorg GmbH (Member of the Vitra Group)

Innovative Leuchten und Lichtlösungen für den Einzelhandel
D - 45473 Mülheim an der Ruhr
www.ansorg.com



Auer Lighting GmbH

LED-Optiken aus Glas für anspruchsvolle Beleuchtungskonzepte
D - 37581 Bad Gandersheim
www.auer-lighting.com



Aura Light GmbH

Nachhaltige Long Life Beleuchtungslösungen
D - 22305 Hamburg
www.auralight.de



BÄRO GmbH & Co. KG

Fresh Light for Fresh Products
D - 42799 Leichlingen
www.baero.com



Technik für Licht
Komponenten - Optik - Automation

BJB GmbH & Co. KG

Komponenten für die Leuchten- und Hausgeräteindustrie
D - 59755 Arnsberg
www.bjb.com



All students of German universities and universities of applied sciences taking part in the conference LICHT 2016 would like to thank the listed companies for their donations which enable their participation.

The German Society for Light and Lighting (LiTG) would like to thank them, too.



BLV Licht- und Vakuumtechnik GmbH

Entladungslampen + LED-Lösungen für Spezialbeleuchtung
D - 85643 Steinhöring
www.blv-licht.de



Cohausz Leuchten GmbH

Innovative technische Leuchten - Sonderleuchten
D - 48612 Horstmar
www.cohausz-leuchten.de



ELECTRIC-SPECIAL Photronicsysteme GmbH

Tunnelbeleuchtungs-, Automatisierungs- + Visualisierungssysteme
D - 26125 Oldenburg
www.electric-special.de



Feilo Sylvania Germany GmbH

Komplettanbieter für Beleuchtungslösungen
D - 91056 Erlangen
www.feilosylvania.com



Gigahertz-Optik GmbH

Hersteller von Lichtmesstechnik und Kalibrierdienstleister
D - 82299 Türkenfeld
www.gigahertz-optik.de



Hadler GmbH

Betriebsgeräte auch Ex, Schlanke Leuchten, Lichtsteuerungen
D - 34587 Felsberg
www.hadler-gmbh.de



HAHN-LICHT, Gustav Hahn GmbH

Dekorative Außen- u. Projektbeleuchtung, LED + konventionell
D - 12349 Berlin
www.hahnlichtberlin.de



Hauber & Graf GmbH

HID- + LED-Leuchtmittel für Industrie- und Straßenbeleuchtung
D - 71711 Steinheim
www.hauber-graf.de



HELLA KGaA Hueck & Co.

Kfz-Beleuchtung + -Elektronik, LED-Straßenbeleuchtung
D - 59552 Lippstadt
www.hella.de/karriere



HELLUX International GmbH

LED-Lichtlösungen für den Außen- und Innenbereich
D - 30880 Laatzen
www.hellux.de



Heraeus Noblelight GmbH

Photonik-basierte Lösungen von Ultraviolett bis Infrarot
D - 63450 Hanau
www.heraeus-noblelight.com



Hess GmbH Licht + Form

Stadtmobilar, Außen- und Straßenleuchten
D - 78050 Villingen - Schwenningen
www.hess.eu



INOTEC Sicherheitstechnik GmbH

Innovative Sicherheitsbeleuchtungs- und Fluchtwegleitsysteme
D - 59469 Ense
www.inotec-licht.de



INSTA

Insta Elektro GmbH

LED-Leuchtsysteme für Innen- und Außenbeleuchtung
D - 58509 Lüdenscheid
www.insta.de



INSTRUMENT SYSTEMS GmbH

Komplettlösungen für die Lichtmesstechnik
D - 81673 München
www.instrumentsystems.com



JORDAN REFLEKTOREN GmbH & Co. KG

Entwicklung und Produktion von Reflektor Systemen + Druckguss
D - 40764 Langenfeld
www.jordan-reflektoren.de

JUNG

JUNG

Lichtschalter, Steckdosen und Gebäudesystemtechnik
D - 58579 Schalksmühle
www.jung.de

KLILUX

KLILUX GmbH

Förderberatung, Lichtplanung, Lichttechnik und Elektronik
D - 69221 Dossenheim
www.klilux.de



LED Linear GmbH

Frei skalierbare lineare LED Beleuchtungssysteme
D - 47506 Neukirchen-Vluyn
www.led-linear.de



LMT LICHTMESSTECHNIK GMBH BERLIN

Präzisionsgeräte zur Licht- und Farbmessung
D - 10587 Berlin
www.lmt.de



LMT Leuchten + Metall Technik GmbH

Projektleuchten nach Maß für Architektur, Bahn und Technik
D - 91161 Hilpoltstein
www.lmtgmbh.de



NORKA GmbH & Co. KG

Hersteller technischer Leuchten hoher Schutzart
D - 22335 Hamburg
www.norka.de



Richard Pflaum Verlag GmbH & Co. KG

Die LICHT-Fachzeitschrift
D - 80636 München
www.lichtnet.de



Oktalite Lichttechnik GmbH

Standard- + Sonderprodukte, Serviceleistungen, Komplettanbieter
D - 50829 Köln
www.oktalite.com



opsira GmbH

Optikdesign, Spektro-, Goniophotometer, Messdienstleistungen
D - 88250 Weingarten
www.opsira.de



OSRAM Lighting Solutions

Intelligente Lichtlösungen der Marken OSRAM, Siteco und Traxon
D - 80807 München
www.lightingsolutions.osram.com



OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Entwicklung und Fertigung von optischen Halbleitern
D - 93055 Regensburg
www.osram-os.com


Philips Lighting GmbH

Beleuchtungsprodukte, -systeme und -services
D - 22335 Hamburg
www.philips.de/lighting

Alfred Pracht Lichttechnik GmbH

Hochwertige Leuchten für besondere Anwendungsgebiete
D - 35232 Dautphetal-Buchenau
www.pracht.com

REI-LUX Prüf-, Mess-, Verfahrenstechnik GmbH & Co. KG

Standortsicherheitsprüfungen und Sanierung von Masten
D - 41812 Erkelenz
www.rei-lux.de

RIDI Leuchten GmbH

Technische-, Hospitality- und designorientierte Leuchten
D - 72417 Jungingen
www.ridi-group.de

RZB Rudolf Zimmermann, Bamberg GmbH

Professionelle Innen-, Außen- und Sicherheitsbeleuchtung
D - 96052 Bamberg
www.rzb.de

Schmidt Strahl GmbH

Technische Innen-, Außen- und Straßenbeleuchtung
D - 40668 Meerbusch
www.schmidt-strahl.de

Adolf Schuch GmbH

Lichttechnische Spezialfabrik
D - 67547 Worms
www.schuch.de

selux

Selux AG

Entwicklung & Herstellung hochwertiger Lichtlösungen
D - 12277 Berlin
www.selux.de

SILL

SILL Leuchten GmbH

Außen- und Innenbeleuchtung, LED-Beleuchtung
D - 10553 Berlin
www.sill-lighting.com



SPITTLER Lichttechnik GmbH

Wirtschaftliche und professionelle Lichtlösungen
D - 38644 Goslar
www.performanceinlighting.com



SWARCO V.S.M. GmbH

Planung, Lieferung, Montage und Betrieb von Außenbeleuchtung
D - 10553 Berlin
www.swarco.com/svsm



TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH

Bildauflösende Lichtmesstechnik, Nahfeldgoniophotometer
D - 98693 Ilmenau
www.technoteam.de



tecnolight Leuchten GmbH

Technische Leuchten mit hoher Projektkompetenz
D - 59755 Arnsberg - Neheim
www.tecnolight.de



Thorlux Lighting

Außen-, Innenraumleuchten, LEDs, Steuerungssysteme
D - 40219 Düsseldorf
www.thorlux.de



TRILUX GmbH & Co. KG

Anbieter kompletter und professioneller Lichtlösungen
D - 59753 Arnsberg
www.trilux.de



uv-technik meyer gmbh

UV-Strahler + Komponenten für UVC- und UV-Curing
D - 63683 Ortenberg
www.uv-technik.com



Vossloh-Schwabe Deutschland GmbH

Komponenten und Systemlösungen für die Lichttechnik
D - 73660 Urbach
www.vossloh-schwabe.com



Herbert Waldmann GmbH & Co. KG

Leuchten für Büro, Industrie, Pflege- und Gesundheitsbereiche
D - 78057 Villingen-Schwenningen
www.waldmann.com



Wieland Electric GmbH

Elektrische Verbindungstechnik
D - 96052 Bamberg
www.wieland-electric.com



Zumtobel Group

Leuchten, Lichtsteuerungen und Lichtlösungen
A - 6850 Dornbirn
www.zumtobelgroup.com

AUTORENVERZEICHNIS · LIST OF AUTHORS

A		<i>Peter Bodrogi</i>	727
<i>Arne Abromeit</i>	319	<i>Jan de Boer</i>	19, 311, 335, 407
<i>Farhang Afshar</i>	509	<i>Volkmar Boerner</i>	285
<i>Petar Aleksiev</i>	75	<i>Matthias Boeser</i>	707
<i>Andreas Ampenberger</i>	107	<i>Sven Bogdanow</i>	361, 385
<i>Silke Appelhans</i>	619	<i>Wout van Bommel</i>	351
<i>Myriam Aries</i>	99, 351, 611	<i>Sebastian Bremer</i>	343
		<i>Siegfried Brenke</i>	125
B		<i>Marc Briede</i>	579, 627
<i>Christel de Bakker</i>	99	<i>Renske de Bruijn</i>	697
<i>Meike Barfuß</i>	35, 433	<i>Eike Budde</i>	311, 335
<i>Sebastian Beck</i>	221	<i>Mike Bülters</i>	285
<i>Alexander Behr</i>	393	<i>Matthias Bues</i>	211
<i>Paola Belloni</i>	483, 535, 545		
<i>Barbara Benkert</i>	53	C	
<i>Krister Bergenek</i>	509	<i>Markus Canazei</i>	595
<i>Klaus Bieckmann</i>	491	<i>Wolfgang Cornelius</i>	359
<i>Karin Bieske</i>	709	<i>Guihua Cui</i>	727
<i>Ulrich Binder</i>	465	<i>Herbert Cybulska</i>	235

D		Antonio Álvarez	
		Fernández-Balbuena	293, 535, 545
Raimund Dachsel	211	Norbert Fernkorn	269
Oliver Dannberg	393	Sebastian Fischer	727
Peter Dehoff	203	Ulrich Fischer-Hirchert	431
Fabian Denk	501	Marc Fontoynt	407
Aicha Diakité	343	Martin Frauenhofer	637
Carsten Diem	679	Carolin Fröhlich	255
Erik Dietl	11	Anja Frohnappel	709
Kay-Uwe Dingeldein	67	Carsten Funke	27, 67 , 563
Marie-Claude Dubois	407		
Juliëtte van Duijnhoven	611		
E		G	
Oliver Ebert	91	Alexander Gärtner	483
Alexandra Ehrlitzer	579	Gregor Gärtner	423
Andrea Ehrmann	303	Berta García-Fernández	293 , 545
Daniel Englisch	647	David Geisler-Moroder	91
		Valchan Georgiev	75
		Thorsten Gerloff	457, 663
		Matthias Giesener	135
		Stefan Gramm	533
		Roland Greule	579 , 627
F			
Yuan Fang	19		
Franz Feldmeier	603		

H

<i>Karsten Hähre</i>	501
<i>Nils Haferkemper</i>	647, 655
<i>Jörg Haller</i>	43
<i>Julien Hansen</i>	377
<i>Wolfgang Heering</i>	501
<i>G. Heidel</i>	525
<i>Melanie Helmer</i>	369
<i>Andreas Herrmann</i>	303
<i>Ingo Herzog</i>	393
<i>Sebastian Hesse</i>	197
<i>Tobias Hofer</i>	213
<i>Frank Hofmann</i>	197
<i>Edith Holländer</i>	415
<i>Sabrina Hoppstock</i>	431
<i>C. Horst</i>	525
<i>Carolin Hubschneider</i>	19

I

<i>Dilyan Ivanov</i>	75
----------------------	----

J

<i>Roman Jakobiak</i>	399 , 533
<i>Werner Jordan</i>	465
<i>Bert Junghans</i>	67, 91

K

<i>Jérôme Kaempf</i>	407
<i>Arne Kalbreyer</i>	171
<i>Zoran Kapor</i>	125
<i>Tran Quoc Khanh</i>	221, 415, 647, 655, 727
<i>Jens Kilian</i>	147
<i>Raphael Kirsch</i>	3
<i>Martin Kirsten</i>	433
<i>Benedikt Kleinert</i>	361, 385
<i>Thomas Klimiont</i>	61
<i>Rainer Kling</i>	501
<i>Sebastian Knoche</i>	155
<i>Christian Knoflach</i>	301
<i>Martine Knoop</i>	229, 343, 407, 637
<i>Dennis Köhler</i>	619
<i>Christina Königl</i>	747

<i>Olga Kombeiz</i>	11
<i>Denan Konjhodzic</i>	475
<i>Susanne Korhammer</i>	117
<i>Helianthe Kort</i>	99, 611
<i>Yvonne de Kort</i>	697
<i>Tobias Kraus</i>	285
<i>Sarah Kroetz</i>	179
<i>Jan Krüger</i>	645
<i>Udo Krüger</i>	671
<i>Matthias Kuhr</i>	579
<i>Malte Kummrow</i>	627
L	
<i>Alexander Lenhardt</i>	139
<i>Bernhard Lenz</i>	319
<i>Carolin Liedtke</i>	637
<i>Matthias Lindemann</i>	663
<i>Xiaoyu Liu</i>	727
<i>Stefanie Löcherer</i>	415
<i>M. Ronnier Luo</i>	727

M	
<i>Oliver Maak</i>	587
<i>Hildegard Manz-Schumacher</i>	147
<i>Michael Marutzky</i>	361, 385
<i>Johannes Michl</i>	709
<i>Jörg Minnerup</i>	189
<i>Benedikt-Alexander Mokroß</i>	139
<i>Daniel Vázquez Molini</i>	535, 545
<i>Cornelia Moosmann</i>	27, 83
<i>Maike Müller</i>	555
N	
<i>Cornelius Neumann</i>	277, 369, 449, 671
<i>Mathias Niedling</i>	571
<i>Philipp Novotny</i>	699
<i>Dominic Nußbaum</i>	285
O	
<i>Kazim Hilmi Or</i>	635

P		<i>Philipp Ritter</i>	171
<i>Martijn Pakkert</i>	351	<i>Richard Roeder</i>	393
<i>Bernard Paule</i>	407	<i>Alexander Rosemann</i>	99, 351, 611
<i>Stefan Pendsa</i>	457	<i>Annette Roser</i>	415
<i>Martin Perner</i>	671	<i>Inga Rothert</i>	163
<i>Iva Petrinska</i>	75	<i>Ingo Rotscholl</i>	671
<i>Sabine Piller</i>	117, 125	<i>Benjamin Rudolf</i>	393
<i>Santiago Mayorga Pinilla</i>	535	<i>David Ruland</i>	725
<i>Herbert Plischke</i>	699	<i>Sarah Christiane Ruppert</i>	243
<i>Wilfried Pohl</i>	107, 595		
<i>Dieter Polle</i>	335	S	
<i>Emiliano Proietti</i>	603	<i>Oliver Sandfuchs</i>	277
<i>Achim Pross</i>	179	<i>Inca Leopoldo Sayanca</i>	449 , 671
<i>Martin Przewloka</i>	139	<i>Gudrun Schach</i>	263
		<i>Karin Schakib-Ekbatan</i>	415
R		<i>Christoph Schierz</i>	67, 393, 465, 563, 587, 645, 709, 717, 739
<i>Mario Rechsteiner</i>	249	<i>Christoph Schiller</i>	647
<i>Thomas Reiners</i>	679	<i>Johannes Schlenger</i>	579
<i>Christian Reisecker</i>	301	<i>Franz Schmidt</i>	671, 679
<i>Klaus Reiter</i>	555	<i>Paul W. Schmits</i>	423
<i>Christian Riedel</i>	211		

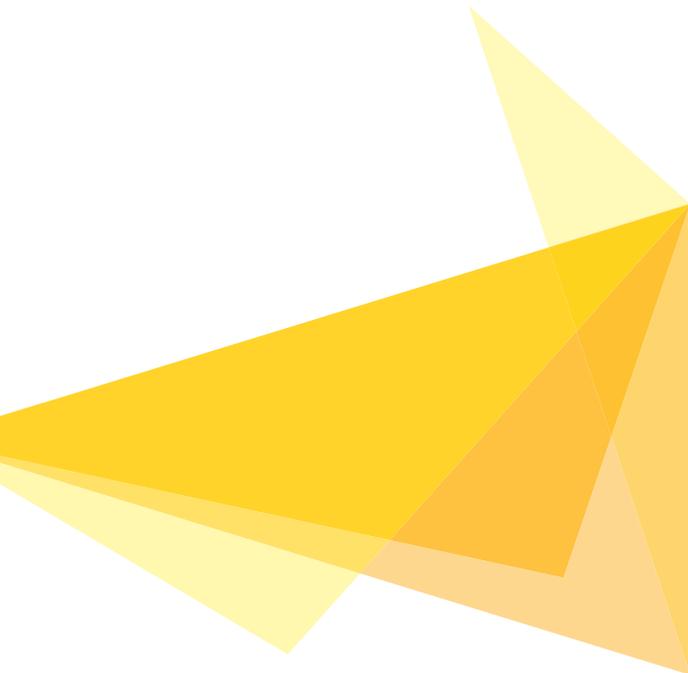
<i>Katharina Schneider</i>	655	<i>Nicole Stubenrauch</i>	709, 739
<i>Michael Schneider</i>	555	<i>Matthias Szarafanowicz</i>	221
<i>Philipp Schneider</i>	457		
<i>Michael Schöne</i>	277	T	
<i>Björn Schrader</i>	327	<i>Katrin Tanzer</i>	595
<i>Benjamin Schulz</i>	441	<i>Carolin Tatulla</i>	587
<i>Christian Schwanengel</i>	679	<i>Birthe Tralau</i>	717
<i>Eva Schwenzfeier-Hellkamp</i>	147, 555	<i>Klaus Trampert</i>	449, 671
<i>Marco Seegers</i>	311, 335		
<i>Dirk Seifert</i>	35	V	
<i>Karin Smolders</i>	697	<i>Cornelia Vandahl</i>	27 , 67
<i>Ernst Smolka</i>	137	<i>Hristo Vasilev</i>	75
<i>Armin Sperling</i>	457, 663	<i>Daniel Vazquez</i>	293
<i>Georg Spielberger</i>	301	<i>Stephan Völker</i>	133 , 163, 229, 343, 377, 571
<i>Siegfried Staggel</i>	107		
<i>Juri Steblau</i>	133	W	
<i>Oliver Stefani</i>	179	<i>Max Wagner</i>	415
<i>Anna Steidle</i>	11	<i>Mathias Wambsganß</i>	603, 689, 747
<i>Andreas Steinbach</i>	517	<i>Maissam EL Wardani</i>	465
<i>Walter Steudtner</i>	465	<i>Nils Weber</i>	229
<i>Christoph Stöver</i>	285	<i>Meik Weckbecker</i>	509

<i>Daria Wehlage</i>	303	Z	
<i>Herbert Weiß</i>	509	<i>Johannes Zauner</i>	689
<i>Juergen Weisshaar</i>	681	<i>Yuteng Zhu</i>	727
<i>Christian Werner</i>	361		
<i>Daniel Werner</i>	555		
<i>Matthias Werner</i>	91		
<i>Nino Wessolowski</i>	579		
<i>Falk Wieland</i>	171		
<i>Alexander Wilm</i>	525, 709		
<i>Daniel Witzel</i>	311, 335		
<i>Helmut Wörner</i>	139		
<i>Simon Wössner</i>	311, 335, 407		
<i>Gerald Wötzl</i>	115, 499		
<i>Stefan Wolf</i>	587		
<i>Günther Wuchterl</i>	51		
<i>Alexander Wunsch</i>	187		
X			
<i>Lihao Xu</i>	727		

WWW.LICHT2016.EU

TAGUNG 25. - 28. SEPTEMBER

DESIGN: ZWO-ELF.DE



22. GEMEINSCHAFTSTAGUNG 22ND ASSOCIATIONS' MEETING

DEUTSCHE LICHTTECHNISCHE GESELLSCHAFT E.V. (LITG)
NEDERLANDSE STICHTING VOOR VERLICHTINGSKUNDE (NSVV)
LICHTTECHNISCHE GESELLSCHAFT ÖSTERREICHS (LTG)
SCHWEIZER LICHT GESELLSCHAFT (SLG)

KARLSRUHE INSTITUTE OF TECHNOLOGY (KIT)

ISBN 978-3-7315-0564-8



9 783731 505648 >

